CIENCIAS SOCIALES

Métodos y técnicas de monitoreo y predicción temprana en los escenarios de riesgos socionaturales

Coordinadores
José Emilio Baró Suárez
José Ramón Hernández Santana
Enrique Guevara Ortiz

Universidad Autónoma
del Estado de México

Métodos y técnicas de monitoreo y predicción temprana en los escenarios de riesgos socionaturales

José Emilio Baró Suárez
José Ramón Hernández Santana
Enrique Guevara Ortiz

(Coordinadores)

2021

CONACYT
Registro Nacional de Instituciones
y Empresas Científicas y Tecnológicas
Registro: 1900555

Métodos y técnicas de monitoreo y predicción temprana en los escenarios de riesgos socionaturales

Coordinadores
José Emilio Baró Suárez
José Ramón Hernández Santana
Enrique Guevara Ortiz

Dirección del proyecto
Eduardo Licea Sánchez, Esther Castillo Aguilar, José Eduardo Salinas de la Luz

Arte
Mariana Mancino
Paulina Cordero Mote

Primera edición, septiembre de 2021
2021 Fernando de Haro y Omar Fuentes

ISBN AM: 978-607-437-569-5
ISBN UAEM: 978-607-633-330-3

CLAVE Editorial
Paseo de Tamarindos 400 B, Suite 109.
Col. Bosques de las Lomas, Ciudad de México, México. C.P. 05120
Tel. 52 (55) 5258 0279/80/81
ame@ameditores.mx
coediciones@ameditores.mx
www.ameditores.com

Universidad Autónoma del Estado de México
Av. Instituto Literario 100 Ote.
Toluca, Estado de México
C.P. 50000
Tel. 722 226 21 40
http://www.uaemex.mx
publicaciones@uaemex.mx

Las opiniones y puntos de vista expresados en la presente obra, son responsabilidad única y exclusiva de su autor y no necesariamente representan las posiciones u opiniones de la editorial, y las de sus integrantes.

Esta obra está sujeta a una licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivadas 4.0 Internacional. Los usuarios pueden descargar esta publicación y compartirla con otros, pero no están autorizados a modificar su contenido de ninguna manera ni a utilizarlo para fines comerciales. Disponible para su descarga en acceso abierto en: http://ri.uaemex.mx

Esta obra ha sido evaluada por pares académicos ciegos.
Elaborado en México.

Contenido

Prólogo 9

Introducción 13

Sección 1. Vulnerabilidad y resiliencia

1.1. *Vulnerabilidad ambiental de la cuenca florícola del Estado de México* 21
Clarita Rodríguez Soto, Edgar Daniel Hernández César, Miguel Ángel Gómez Albores y Rebeca Angélica Serrano Barquín

1.2. *Perfil de resiliencia urbana. Un instrumento de medición y seguimiento en la gestión integral del riesgo* 41
María Milagros Campos Vargas, Francisco Monroy Gaytán, Luz Elena Rivera Cano, Enrique Guevara Ortiz, Rafael Humberto Cambranis Marín y Alonso Reyes López

1.3. *Indicadores de vulnerabilidad en la valoración de niveles de riesgo ante peligro volcánico asociado al Volcán de Fuego de Colima* 57
Frances Rodríguez Van Gort

Sección 2. Riesgos geólogo geomorfológico: el pulso de la corteza terrestre

2.1. *Monitoreo de la actividad volcánica y comunicación del riesgo asociado. Experiencias en el Volcán de Colima* 81
Nick Varley y Juan Carlos Gavilanes-Ruiz

2.2. *Estudio y monitoreo de volcanes activos en México* 109
Amiel Nieto Torres, María del Carmen Jaimes Viera y Anaid Pérez Pérez

2.3. *Monitoreo de la actividad sísmica en la red sismológica del suroccidente colombiano* 134
Nathalie García Millán, Jhonattan Fernández Córdoba, Jorge Andrés Vélez Correa, César Augusto Cardona Parra y Elkin de Jesús Salcedo Hurtado

2.4. *Geodinámica reciente del relieve: expresiones de la tectogénesis regional y la morfogénesis fluvial local en la planeación territorial y la gestión del riesgo* 156
José Ramón Hernández Santana, Luis Miguel Espinosa Rodríguez, Ana Patricia Méndez Linares, Alexis Ordaz Hernández, Juan Carlos Garatachía Ramírez y Norma Angélica Dávila Hernández

2.5. *Monitoreo y sistemas de alerta ante la presencia de deslizamientos* 189
José Emilio Baró Suárez, Srahyrlandy Rocío Díaz Sánchez y Luis Miguel Espinosa Rodríguez

2.6. *Métodos y técnicas tradicionales en campo para el monitoreo de la erosión hídrica* 209
Miguel Ángel Balderas Plata, Luis Miguel Espinosa Rodríguez y Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo

2.7. *Riesgos geotécnicos inducidos en asentamientos humanos* 223
Alexis Ordaz Hernández, José Ramón Hernández Santana y José Emilio Baró Suárez

2.8. *Evaluación de Riesgo Volcánico en la Región del volcán Jocotitlán, Estado de México* 241
Miguel Martínez Tapia, José Luis Escalona Hernández y Rubén López del Campo

2.9. *Cambios costeros contemporáneos y sus riesgos: algunas aproximaciones metodológicas* 270
Alexis Ordaz Hernández, José Ramón Hernández Santana y Ana Patricia Méndez Linares

2.10. *Medidas de control de la erosión* 288
José Miguel Febles Diaz y José Manuel Febles González

Sección 3. Riesgos hidrometeorológicos

3.1. *Inundaciones: causas, efectos y elementos mínimos a considerar en la construcción de sistemas de alerta temprana* 333
Carlos Díaz Delgado, Humberto Salinas Tapia, Khalidou M. Bâ, Carlos Alberto Mastachi Loza, Adrián Torres Maya, Miguel Ángel Gómez Albores y José Emilio Baró Suárez

3.2. *Sequía: causas, efectos, impactos y método para construcción de planes de gestión en México* 345
Carlos Díaz Delgado, Aleida Yadira Vilchis Francés, Khalidou M. Bâ, Rocío Becerril Piña, Carlos Alberto Mastachi Loza, Alondra Balbuena Medina, Ricardo Arévalo Mejía y José Emilio Baró Suárez

3.3. *Huracanes: amenazas desde dos océanos* 356
Armando Antonio Domech González y José Emilio Baró Suárez

Sección 4. Geotecnología aplicada a la vigilancia y predicción de las dinámicas de los escenarios de riesgos socionaturales

4.1. *Análisis de problemáticas ambientales y fenómenos naturales perturbadores a partir de imágenes satelitales MODIS y GOES: algunas aplicaciones de LANOT (Unidad Facultad de Geografía)* 381
Francisco Zepeda Mondragón, Yered Gybram Canchola Pantoja, Miguel Eduardo García Reyna, Cristina Estrada Velázquez, Juan Carlos Garatachía Ramírez y Martin Pánfilo Soto Romero

4.2. *El Sistema de Alerta Temprana de Tabasco (construcción a la Fase 1 del módulo hidrometeorológico). Estado de Tabasco* 399
Jorge Mier y Terán Suarez

4.3. *El Sistema de Alerta Sísmica Mexicano. Perspectiva de su desempeño desde la Gestión Integral de Riesgos y los Sistemas de Alerta Temprana comunitarios* 437
Mario Álvaro Ruiz Velázquez

4.4. *Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT)* 456
Enrique Guevara Ortíz, Gilberto Castelán Pescina y Paulino Alonso Rivera

Sección 5. Universidades y educación ciudadana: hacia una cultura de la gestión del integral del riesgo como base en la preparación para la alerta temprana

5.1. *La Protección Civil en la Universidad Autónoma del Estado de México* 473
José Emilio Baró Suarez, Armando Arriaga Rivera, Fernando Carreto Bernal y Ruggiero Olivera Guadarrama

Prólogo

En 2016, planteamos en el Colegio Mexicano de Profesionales en Gestión de Riesgos y Protección Civil realizar un primer Congreso Internacional en la ciudad de Hermosillo, Sonora que, por presiones ajenas a la organización tuvo que ser cancelado e inmediatamente adoptado por la Delegación Iztapalapa de la ciudad de México con un excelente programa académico.

Ya por rescatar el compromiso asumido con el Consejo Directivo, quienes nos habíamos involucrado en el evento decidimos realizar el viaje y participar en ese primer Congreso donde, en lo personal, cambió en un clic mi perspectiva de la protección civil a la gestión integral del riesgo de desastres, motivándome al compromiso de estudiar y adentrarme en éste interesante tema. En ese evento conocí a destacados personajes en la materia que hoy puedo decir son grandes amigos, uno de ellos es el Dr. José Emilio Baró Suárez quién desde entonces me ha honrado con ella.

Hablar del Dr. Baró es hacerlo de una persona sencilla, entusiasta y comprometida. Su currícula académica es impresionante: Doctor en Geografía por la UNAM, especializado en Riesgos socionaturales e impactos socioeconómicos de los desastres; Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1; actualmente Profesor-Investigador y Coordinador de la Licenciatura en Geología Ambiental y Recursos Hídricos de la Universidad Autónoma del Estado de México. Galardonado con diversos reconocimientos: Autor de la mejor Tesis de Doctorado en Geografía Humana en 2010; Distinción al Mérito en Geografía y reconocimiento por el aporte científico técnico del trabajo investigativo "Metodología para la valoración económica de la vulnerabilidad socioeconómica y demográfica ante inundaciones en la República Mexicana"; Premio Estatal de Medio Ambiente 2013 y Reconocimiento del Gobierno de Colombia (UNGRD) por sus aportes a la gestión de riesgos de desastres.

Para hablar de la obra del Dr. José Baró es importante contextualizar que México tiene una superficie de 1,964,375 km^2, su diversidad en el medio geográfico, regiones naturales y biogeografía lo convierten en un territorio de enormes riquezas naturales como pocas en el mundo; sin embargo, el territorio es altamente vulnerable ante la ocurrencia de fenómenos de origen natural. El territorio se encuentra ubicado en cinco placas tectónicas: Caribe, Pacífico, Norteamérica, Rivera y Cocos, por otro lado, la ubicación geográfica en el planeta también lo hacen vulnerable a los fenómenos hidrometeorológicos. De acuerdo con información de The International

Disaster Database, de 1900 a 2017 se registraron en México 259 desastres de los cuales el 97% corresponden a aquellos provocados por fenómenos perturbadores de origen natural, el 80% a hidrometeorológicos y el 17% a geológicos, todos ellos han causado más de 23 mil muertes, casi 19 millones de personas afectadas y daños por más de 46 mil millones de dólares.[1]

Como se puede observar, históricamente los desastres ocasionados por eventos naturales han generado un alto costo económico por daños y pérdidas. Con información de la Evaluación del Impacto social y económico 2000 a 2017, en el nuevo milenio los desastres en México han ocasionado 9,009 decesos, 53 millones de personas afectadas, pérdidas económicas por 512,413 millones de pesos y daños en 1.5 millones de viviendas, 38 mil escuelas y 2,140 hospitales y centros de salud. El 90% de las Declaratorias de Emergencia y Desastres son causadas por fenómenos hidrometeorológicos (CENAPRED, 2019).[2]

El riesgo se define como los daños o pérdidas probables sobre un agente afectable, resultado de la interacción entre su vulnerabilidad y la presencia de un agente perturbador. Este tiene varias características como el ser dinámico y cambiante, posee un carácter social, por tanto, su percepción en diferenciada pero afortunadamente disminuye con la preparación.

De acuerdo con la Ley General de Protección Civil, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 2012 con su última reforma del 19 de enero de 2018, la gestión integral del riesgo es el conjunto de acciones encaminadas a la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos considerando su origen multifactorial. Aquí cobra sentido la Prioridad 1 del Marco de Sendai: comprender el riesgo de desastres en todas sus dimensiones de la vulnerabilidad, capacidad, exposición de las personas, los bienes, las características del peligro y el medio ambiente y para el entendimiento completo del riesgo es menester la certidumbre de que dicho análisis se haga basado en una metodología que defina de manera sistémica cada uno de los pasos que lleven a una solución satisfactoria que incluya el conocimiento de la causa raíz o el origen del desastre.

En el rubro de la evaluación de riesgos, el Dr. Emilio Baró es coautor y coordinador de dos libros, el primero Metodología para la valoración económica de daños potenciales tangibles directos por inundación literatura que ha sido usada por académicos e investigadores de varios países en Latinoamérica por adecuarse de manera pertinente al contexto de países en desarrollo,

---

1 Zepeda G. Raúl; Huerta P. Alejandra; Sánchez C. Marra K.; Sánchez R. María C. (2018), "La vulnerabilidad de México ante el cambio climático", Instituto Belisario Domínguez. Senado de la República. p.24.

2 García A., Norlang M.; Méndez E., Karla M.; Franco V., Ernesto; Olmedo S., Cristina. (2019), "Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana 2017", Versión electrónica. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.

que retoma como fuente de información los datos estadísticos oficiales del INEGI y otras dependencias, además cuenta con bases técnicocientíficas para seleccionar el tipo de bienes susceptibles al daño, la definición de estrategias de cuantificación y la estimación metodológica de los daños tangibles ocasionados por fenómenos hidrometeorológicos extremos en un territorio, que como se ha mencionado, es altamente expuesto a inundación.[3]

Incluso, si consideramos la prospección como *"la previsión del riesgo tanto para la propia inversión, como para terceros, y la adecuación de la inversión o la acción para que no genere riesgo o que éste tenga conscientemente un nivel aceptable"* (Lavell, 2003), la metodología propuesta en el libro en comenta, viene desde la gestión prospectiva del riesgo, a ofrecer a los responsables de hacerlo, el componente que de manera integral y transversal ofrezca certidumbre en la valoración de los daños potenciales, así como certeza técnica y económica en la toma de decisiones para realizar obras de infraestructura y políticas públicas que prevengan daños y pérdidas en las localidades.[4]

En 2019, el Dr. Emilio Baró me obsequió su segundo libro coordinado denominado "Enfrentando los riesgos socionaturales". Aun cuando nominalmente el agente perturbador socionatural no se incluye en la norma federal, pero ya era abordado por la academia desde hace algunos años, los autores enfatizan esta amenaza como el agente perturbador derivado de la intersección de la práctica humana en el ambiente natural. El libro se enfoca al personal operativo de protección civil a nivel local, para que aprendan o se actualicen de conocimiento avanzado en la materia, desde el conceptual y normativo, las diversas amenazas o peligros generados por fenómenos adversos de origen natural, el uso de la tecnología aplicada a la reducción de riesgos, la construcción de escenarios para la gestión del riesgo, así como el análisis geoespacial del territorio en el estudio de los riesgos. [5]

Los autores nos indican que los escenarios de riesgos socionaturales se construyen como consecuencia de los factores subyacentes de las políticas públicas enfocadas al desarrollo de un territorio que, sumadas a las condiciones de

---

3 Baró S., José E.; Díaz D., Carlos; Calderón A. Georgina; Esteller A., María V.; Cadena V. Edel; Franco P., Roberto. (2012), "Metodología para la valoración económica de daños potenciales tangibles directos por inundación", 1ª. Edición, Universidad Autónoma del Estado de México.

4 Lavell, Allan. (2003). La gestión local del riesgo, nociones y precisiones en torno al concepto y la práctica. Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Buró para la Prevención de Crisis y Recuperación. pp. 31, 32.

5 Baró S., José E; Monroy, F. (2018), Enfrentando los riesgos socionaturales, 1ª. Edición, Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

vulnerabilidad socioeconómica de la población, se acumulan para la construcción social del riesgo de desastres.

En una reflexión final, los coordinadores de la obra hacen una propuesta de nueve aspectos para trabajar desde lo local en la reducción integral de la vulnerabilidad institucional y el desarrollo de capacidades financieras y de resiliencia comunitaria, acciones importantes para la gestión integral del riesgo de desastres. La adecuación e implementación de estos aspectos en el entorno local actualmente cobran una importancia significativa ante los acontecimientos políticos y económicos que se pueden visualizar al corto plazo en la gestión integral del riesgo de desastres.

En esta nueva obra, Métodos y técnicas para la vigilancia y predicción de las dinámicas de los escenarios de riesgos socionaturales, para la que me ha concedido el privilegio de escribir éste prólogo, el Dr. José Emilio Baró y coautores de alto nivel y prestigio en nuestro país, proporcionan mediante un lenguaje comprensible para quienes desde lo local toman decisiones en el ámbito de la protección civil y gestión de riesgos de desastres, así como para los especialistas y apasionados al tema, herramientas y procedimientos de secuencia lógica resultado de múltiples investigaciones que permiten monitorear y obtener productos enmarcados en la gestión prospectiva de los escenarios de riesgos socionaturales.

Considerando las características del riesgo citadas en párrafos arriba, y que su impacto siempre es proporcional a las capacidades del territorio, instituciones e individuos donde se presentan, éste libro que completa la trilogía bibliográfica del autor, aporta al deber ser y deber hacer de los tomadores de decisiones locales, permitiendo a quienes tengan la oportunidad de disfrutarlo y aprender de él, desarrollar sus capacidades homologando la percepción del riesgo, elemento indispensable para la consecución de la frase adoptada por nuestro Colegio, *"lograr territorios más humanos, seguros y resilientes frente al riesgo de desastres"* realizando proactivamente por los diversos actores involucrados, acciones locales con impacto global.

Por el nivel y relevancia de la obra, agradezco al Dr. José Emilio Baró, la honrosa distinción.

M. Arq. Mariano T. Katase Ruiz

Presidente del Consejo Directivo Nacional

Colegio Mexicano de Profesionales en Gestión de Riesgos y Protección Civil, AC

Introducción

El incremento de los daños y pérdidas en los escenarios de riesgo, además del surgimiento de nuevos escenarios, se encuentra motivado por la ausencia o débil gestión de las dinámicas de estos, entre otras causas.

Un aspecto importante de la gestión del riesgo lo constituye el monitoreo, el seguimiento, y la alerta temprana de los eventos naturales, así como la evaluación de los impactos en el territorio. Todo ello contribuye a la reducción de la vulnerabilidad y representa una acción vital en materia de prevención.

El monitoreo, el seguimiento y la alerta temprana de las dinámicas que caracterizan los fenómenos naturales tienen una importancia significativa ya que permite su conocimiento, investigación, análisis y pronóstico de sus impactos tempranamente a través de las bases de datos que se van estructurando y manejando en los modelos de análisis prospectivo.

Otro aspecto importante del conocimiento y la aplicación práctica de los métodos y técnicas de seguimiento es la creación y consolidación de una cultura de prevención temprana en todo el sistema de protección civil en todos los niveles, pero fundamentalmente en el comunitario. También hay que considerar que permiten estar en una permanente preparación en coordinación con la población expuesta, es por ello que las instituciones juegan un papel importante en el impulso de esta estrategia de gestión del riesgo ya que reduce la vulnerabilidad institucional que es, a nuestro juicio, la principal de todas las vulnerabilidades.

Tanto en México como en muchos países del entorno latinoamericano, la vulnerabilidad institucional es un asunto estructural de los sistemas de gobierno, la cual es muy alta a nivel de los municipios, y es el factor subyacente más relevante en materia de gestión del riesgo y de protección civil.

Resulta importante plantear que la principal medida preventiva y de alerta temprana en materia de escenarios de riesgo, lo componen la planeación y el ordenamiento territorial, en lo relacionado con los usos del suelo.

Por todo lo anterior, los objetivos de este libro son:

1- Promover, compartir y transformar la información científico-técnica en conocimiento ciudadano.

2- Desarrollar capacidades y comportamientos preventivos que permitan a nuestras comunidades ser más resilientes y menos vulnerables ante el impacto de los fenómenos naturales.

3- Contribuir a la difusión y comunicación social del riesgo en los centros educativos, laborales e investigativos.

El libro constituye un material básico para ser utilizado y consultado por las autoridades, técnicos e investigadores en materia de gestión de riesgos socionaturales y sus escenarios, ya que engloba todos los métodos y técnicas utilizados en los sistemas de alerta temprana.

La estructura de esta obra se divide en cinco secciones, cada una integrada por artículos especializados sobre la gestión de riesgos socionaturales y sus escenarios.

En la "Sección 1. Vulnerabilidad y resiliencia" se conforma por tres artículos:

•1.1. "Vulnerabilidad ambiental de la cuenca florícola del Estado de México", los autores son: Clarita Rodríguez Soto, Edgar Daniel Hernández César, Miguel Ángel Gómez Albores y Rebeca Angélica Serrano Barquín. El objetivo es analizar el uso desmedido de productos químicos y su inadecuado manejo en su entorno, como sus graves problemas de contaminación a los suelos y aguas, para establecer el alto riesgo a la salud de los usuarios y a la biodiversidad.

•1.2. "Perfil de resiliencia urbana. Un instrumento de medición y seguimiento en la gestión integral del riesgo" sus autores son: María Milagros Campos Vargas, Francisco Monroy Gaytán, Enrique Guevara, Luz Elena Rivera Cano, Rafael Marín y Alonso Reyes López. El objetivo es proporcionar una visión general del perfil de resiliencia urbana como un instrumento de medición y seguimiento de apoyo en la gestión integral del riesgo, con la finalidad de definir el concepto de resiliencia y su injerencia en la GIR, posteriormente con la descripción metodológica del perfil de resiliencia urbana, para plantear los alcances y lo que aún se debe trabajar dentro de la propuesta.

•1.3. "Indicadores de vulnerabilidad en la valoración de niveles de riesgo ante peligro volcánico asociado al Volcán de Fuego de Colima", la autora Frances Rodríguez Van Gort. El objetivo es presentar los indicadores de vulnerabilidad por peligro volcánico del Volcán de Fuego de Colima, a través de mediciones, para determinar la vulnerabilidad volcánica.

En la"Sección 2. Riesgos geólogo geomorfológicos: el pulso de la corteza terrestre" se conforma de diez artículos, siendo los siguientes:

•2.1. "Monitoreo de la actividad volcánica y comunicación del riesgo asociado. Experiencias en el volcán de colima", los autores son Nick Varley y Juan Carlos Gavilanes Ruiz. El objetivo de estees describir de manera básica los aspectos básicos del monitoreo volcánico, a través de algunos principios de la reducción del riesgo asociado a los volcanes, para establecer la actividad volcánica y su comunicación del riesgo.

•2.2. "Estudio y monitoreo de volcanes activos en México" los autores son Amiel Nieto Torres, María del Carmen Jaimes Viera y Anaid Pérez Peréz. El objetivo es el monitoreo de los principales volcanes de México, con base en los instrumentos de monitoreo volcánico, para la detección oportuna de los volcanes activos.

•2.3. "Monitoreo de la actividad sísmica en la red sismológica del suroccidente colombiano", los autores son Nathalie García Millán, Jhonattan Fernández Córdoba, Jorge Andrés Vélez Correa, César Augusto

Cardona Parra y Elkin de Jesús Salcedo Hurtado. El objetivo es monitorear la actividad sísmica en la red sismológica del suroccidente colombiano, a través de instrumentos, para detectar el riesgo sísmico nacional.

•2.4. "Geodinámica reciente del relieve: expresiones de la tectogénesis regional y la morfogénesis fluvial local en la planeación territorial y la gestión del riesgo", sus autores son José Ramón Hernández Santana, Luis Miguel Espinosa Rodríguez, Ana Patricia Méndez Linares, Alexis Ordaz Hernández, Juan Carlos Garatachía Ramírez y Norma Angélica Dávila Hernández. El objetivo es abordar dos procesos naturales caracterizados por su periodicidad, por su desarrollo lento permanente y por su detonación súbita con consecuencias instantáneas, a través de su origen litosférico e hidroatmosférico, para reducir el riesgo.

•2.5. "Monitoreo y sistemas de alerta ante la presencia de deslizamientos", los autores José Emilio Baró Suárez, Srahyrlandy Rocío Díaz Sánchez y Luis Miguel Espinosa Rodríguez. El objetivo es realizar un estudio de estabilidad de taludes o laderas, con base en establecer medidas de prevención y control, para reducir los niveles de amenaza y riesgo.

•2.6. "Métodos y técnicas tradicionales en campo para el monitoreo de la erosión hídrica", los autores son Miguel Ángel Balderas Plata, Luis Miguel Espinosa Rodríguez y Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo. El objetivo es reconocer de inicio las técnicas o métodos tradicionales, para el monitoreo del proceso por erosión hídrica directamente en campo.

•2.7. "Riesgos geotécnicos inducidos en asentamientos humanos", los autores son Alexis Ordaz Hernández, José Ramón Hernández Santana y José Emilio Baró Suárez.El objetivo es explicar algunas características geotécnicas sobre las cuales se cimientan la infraestructura y el equipamiento urbano, para la mitigación y reducción del riesgo socionatural.

•2.8. "Evaluación de Riesgo Volcánico en la Región del Volcán Jocotitlán, Estado de México", los autores son Miguel Martínez Tapia, José Luis Escalona Hernández y Rubén López del Campo. El objetivo es aportar información y desarrollar una metodología aplicable a nuestro ámbito cultural y económico de ordenación del territorio ante procesos naturales, relacionada al riesgo volcánico en la región del volcán Jocotitlán, Estado de México, para la disminución del riesgo.

•2.9. "Cambios costeros contemporáneos y sus riesgos: algunas aproximaciones metodológicas", los autores Alexis Ordaz Hernández, José Ramón Hernández Santana y Ana Patricia Méndez Linares. El objetivo es analizar los cambios costeros actuales y sus riesgos ante la crisis ambiental de las zonas costeras, para las próximas décadas.

•2.10. "Medidas de control de la erosión", los autores son José Miguel Febles Diaz, José Manuel Febles González. El objetivo es proporcionar conocimientos sobre los principales métodos y técnicas conectadas, para remediar, prevenir o reducir la degradación del suelo.

La "Sección 3. Riesgos hidrometeorológicos" se integra por tres artículos, que a continuación se presentan:

•3.1. "Inundaciones: causas, efectos y elementos mínimos a considerar en la construcción de sistemas de alerta temprana", los autores son Carlos Díaz Delgado, Humberto Salinas Tapia, Khalidou M. Bâ, Carlos Alberto Mastachi Loza, Adrián Torres Maya, Miguel Ángel Gómez Albores y José Emilio Baró Suárez. El objetivo es presentar de manera simple el concepto de inundación y su tipología, a través de ejemplos, para determinar las causas y efectos.

•3.2. "Sequía: causas, efectos, impactos y método para construcción de planes de gestión en México", los autores son Carlos Díaz Delgado, Aleida Yadira Vilchis Francés, Khalidou M. Bâ, Roció Becerril Piña, Carlos Alberto Mastachi Loza, Alondra Balbuena Medina, Ricardo Arévalo Mejía, José Emilio Baró Suárez. El objetivo consiste en presentar de manera sencilla el concepto de la ocurrencia de sequías y las condiciones que hacen que regiones geográficas sean vulnerables ante este agente, para la mitigación de los riesgos.

•3.3. "Huracanes: amenazas desde dos océanos", los autores son Armando Antonio Domech González y José Emilio Baró Suárez. El objetivo es presentar los daños causados por los huracanes, a través de estudios de casos, para establecer las medidas preventivas ante el riesgo.

La "Sección 4. Geotecnología aplicada a la vigilancia y predicción de las dinámicas de los escenarios de riesgos socionaturales" se compone por cuatro artículos:

•4.1. "Análisis de problemáticas ambientales y fenómenos naturales perturbadores a partir de imágenes satelitales MODIS y GOES: Algunas aplicaciones de LANOT (Unidad Facultad de Geografía)", los autores Francisco Zepeda Mondragón, Yered Gybram Canchola Pantoja, Miguel Eduardo García Reyna, Cristina Estrada Velázquez, Juan Carlos Garatachía Ramírez y Martin Pánfilo Soto Romero. El objetivo es presentar los productos derivados del análisis geoespacial en sequias, anomalías térmicas y degradación ambiental, que permita comprender la evolución y aplicación en cuanto a la aplicación de los sensores remotos en los trabajos de investigación realizados por esta Unidad del LANOT, para el estudio de los riesgos.

•4.2. "El Sistema de Alerta Temprana de Tabasco (construcción a la Fase 1 del módulo hidrometeorológico). Estado de Tabasco", el autor es Jorge Mier y Terán Suarez. El objetivo es el desarrollo de un sistema de alerta temprana, a través de un módulo hidrometeorológico, para prevenir y mitigar los riesgos.

•4.3. "El Sistema de Alerta Sísmica Mexicano. Perspectiva de su desempeño desde la Gestión Integral de Riesgos y los Sistemas de Alerta Temprana comunitarios", el autor Mario Álvaro Ruiz Velázquez. El objetivo es describir el Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX), a través de los sistemas aplicados en México, para su conformación y trascendencia en el ámbito nacional e internacional.

•4.4. "Los sistemas de Alerta Temprana", los autores Enrique Guevara Ortíz, Gilberto Castelán Pescina y Paulino Alonso Rivera. Este presenta los sistemas

de monitoreo de alerta temprana como una contribución a la toma efectiva de decisiones ante situaciones de riesgo; permitiendo alertar oportunamente a la población en riesgo, siendo su principal objetivo el salvaguardar la vida. Se ha aceptado internacionalmente, y se ha demostrado, que los sistemas de alerta temprana constituyen un componente en la reducción del riesgo ante desastres.

La "Sección 5. Universidades y educación ciudadana: hacia una cultura de la gestión del integral del riesgo como base en la preparación para la alerta temprana, se conforma de un artículo, siendo el siguiente:

•5.1. "La Protección Civil en la Universidad Autónoma del Estado de México", los autores son José Emilio Baró Suarez, Armando Arriaga Rivera, Fernando Carreto Bernal y Ruggiero Olivera Guadarrama. El objetivo es que el alumno aprenda los principios de la Protección Civil en la vida cotidiana, familiar, estudiantil y laboral a través de métodos y técnicas de prevención, para evitar y mitigar situaciones de riesgos.

Finalmente, nuestro agradecimiento a los investigadores de las universidades que colaboraron en la realización de esta obra, la cual será una herramienta que apoye a la toma de decisiones de los servidores públicos de las áreas de protección civil nacional, federal y municipal.

Dr. José Emilio Baró Suárez

Coordinador

Sección 1
Vulnerabilidad y resiliencia

1.1. Vulnerabilidad ambiental de la cuenca florícola del Estado de México

Clarita Rodríguez Soto

Edgar Daniel Hernández César

Miguel Ángel Gómez Albores

Rebeca Angélica Serrano Barquín

Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

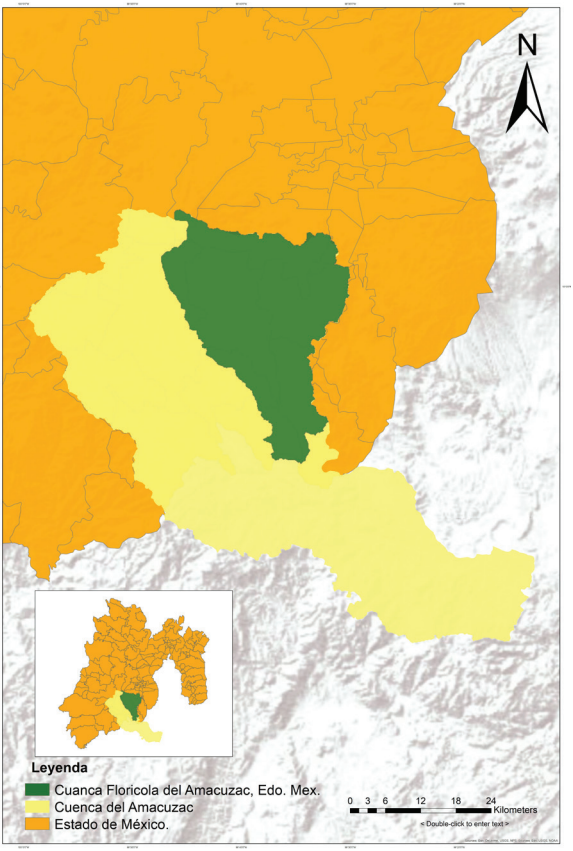
Introducción

México enfrenta procesos de acelerada transformación debido a actividades económicas y sociales que representan amenazas a las sociedades humanas y a la biodiversidad. Se requiere el desarrollo de una gama de acciones encaminadas a la sustentabilidad en los contextos locales y regionales. En estos tópicos, la planificación ocupa un lugar primordial en las agendas nacionales debido a la necesidad de influir en el curso tendencial de los sucesos. Especial importancia se otorga a la dimensión territorial de la planificación, teniendo en cuenta que es el territorio el espacio físico donde confluyen actividades de todo tipo, reflejándose el complejo entramado de relaciones sociales que se establecen entre el ser humano y la naturaleza (Barbero, 2013).

En consecuencia, hay abundantes estudios de corte territorial, basado en las múltiples posibilidades que ofrecen para el análisis y comprensión de la heterogeneidad de fenómenos asociados a la biodiversidad, la cultura, la economía, lo social, el ambiente, entre otros. Dichos estudios se han expresado en metodologías de análisis con enfoque local y regional, cuyas vertientes analíticas dan cabida a una serie de componentes multidisciplinarios para la toma de decisiones. A pesar de estos avances, todavía existe una amplitud temática que requiere ser abordada regionalmente de manera inmediata, entre estos temas se encuentra el análisis de la vulnerabilidad y el riesgo a escalas regionales y locales a fin de dirigir estrategias de atención.

En el presente artículo se toma como caso de estudio a la cuenca florícola del Estado de México, ubicada al sur del Estado en los municipios de Villa Guerrero, Tenancingo y Coatepec Harinas; con una superficie de 687 km², dentro de la subcuenca del Alto Amacuzac (Figura 1).

Figura 1. Localización de la cuenca florícola



Fuente: elaboración propia.

El mayor problema dentro de la denominada cuenca florícola del Estado de México se desarrolla por la actividad florícola intensiva (aporta cerca del 90 % de la producción estatal, y con casi el 80 % de la producción nacional (Mena, 2018)) y agrícola extensiva que ha exigido el uso de altas cantidades de agroquímicos. Su importancia permea en los mercados internacionales a través de la exportación de algunas variedades de rosas y plantas ornamentales, misma que ha inducido a una diversificación de dicho subsector, con ciertas

innovaciones técnicas e infraestructurales, propiciando el cultivo de nuevas variedades de cultivos florícolas (Piña, Meléndez, & Nonato, 2015). El uso desmedido de estos productos químicos y su inadecuado manejo ocasiona graves problemas de contaminación a los suelos y aguas, así como un alto riesgo a la salud de los usuarios y a la biodiversidad. En este contexto, la actividad florícola en la zona de estudio representa un peligro alto para las condiciones ambientales de la región.

Por otro lado, es evidente que, en los últimos 50 años, el uso de fertilizantes y pesticidas químicos en la agricultura ha incrementado la productividad de los cultivos. En México se producen anualmente más de 100,000 toneladas de insecticidas y plaguicidas para el control de plagas en los cultivos (INEGI, 2018). Sin embargo, no existe a detalle información geoespacial relacionada con el uso de los agroquímicos en México. Los riesgos asociados a la exposición a dichas sustancias requieren ser evaluados a través de un enfoque integral. Esto se ha convertido en un problema nacional que urge atender; en México los plaguicidas autorizados y prohibidos o no autorizados en otros países suman 140 ingredientes activos, dicho total suma 65 los plaguicidas prohibidos o no autorizados en otros países que son plaguicidas altamente peligrosos según los criterios establecidos por el grupo de expertos de la Organización Mundial Agroalimentaria (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), mencionan que aumentan a 111, el 79,29% de los plaguicidas según los criterios adicionales propuestos por la Red Internacional de Plaguicidas (PAN Internacional) (Bejarano *et al.*, 2017).

Aunado a lo anterior, en la zona se han detectado una gran cantidad de casos de enfermedades relacionadas a la contaminación por plaguicidas y fertilizantes. En el municipio de Villa Guerrero se encontró que el 60% de las mujeres del campo se sobreexponen a los plaguicidas y el 80% de los trabajadores no usa equipo de protección para aplicar agroquímicos. La tasa de fertilidad es de 1,6 hijos por mujer, en comparación con el 2,5 nacional (Oliva, Rodríguez, & Silva, 2005). En el mismo municipio se ha documentado que de la cantidad de plaguicidas aplicados un gran porcentaje es depositado en el recurso hídrico y edáfico. En las pruebas de toxicidad se encontró que el suelo y agua de los invernaderos resultaron tóxicos y generan gran impacto ambiental negativo debido al tipo, cantidad y frecuencia de los productos aplicados (Tecuapleta María *et al.*, 2014). Además se ha determinado el posible daño del Ácido Desoxirribonucleico (ADN) y daños inmunológicos en floricultores crónicamente expuestos a estas sustancias (Castillo-Cadena *et al.*, 2006; Castillo-Cadena *et al.*, 2013).

En torno a esto, el propósito de este artículo es evidenciar los sitios de mayor vulnerabilidad ambiental en la cuenca florícola del Estado de México, que permitan dirigir y generar alternativas estratégicas de atención a dicha problemática; lo anterior, con énfasis en los recursos hídricos y edáficos, a

través de un análisis espacial. El artículo contiene tres apartados, el primero corresponde al desarrollo metodológico, el segundo a los resultados y el tercero detalla algunas estrategias y directrices para continuar el monitoreo y reducir la vulnerabilidad ambiental de la cuenca, y de esta manera contribuir a la toma de decisiones.

Métodos y técnicas

La vulnerabilidad ambiental es ampliamente considerada como la inversa de la resiliencia (DeAngelis, 1980). Holling (1973like the burrow entrance, is detected only by contact with the antennae, it facilitates the return to the burrow after an excursion. When a desert isopod returns from foraging it reaches the burrow entrance itself (diameter 12 mm), la cual se define como "la capacidad de los sistemas para absorber los cambios de las variables de estado, las variables de conducción y los parámetros, y aún persisten". Nguyen y Liou (2019) señalan que existen varias formas de evaluar la vulnerabilidad ambiental, una de ellas se aborda al observar los factores naturales, como los cambios climáticos a través del análisis de la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración y el aumento del nivel del mar (Janssen y Ostrom, 2006; Metzger *et al.*, 2005). La segunda forma es investigar la vulnerabilidad del entorno ecológico considerando la dinámica humana y social (Ippolito *et al.*, 2010; Viles & Cutler, 2012; Johnson *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2016; Nguyen & Liou, 2019).

Para evaluar la vulnerabilidad ambiental, resulta imprescindible contar con herramientas y metodologías que sean viables y de rápida aplicación, debido a que los procesos de cambios en el ambiente son constantes. En este punto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han demostrado a nivel mundial su eficiencia e importante utilidad en el ámbito de la planificación (Javier, Silva, Cardozo, Las, & Resistencia, 2015). Por otra parte, el análisis multicriterio y los modelos de decisión son una herramienta útil en el análisis de la vulnerabilidad debido a que ofrecen la oportunidad de obtener un análisis equilibrado de las diferentes caras de los problemas de planificación, particularmente debido a que varios efectos intangibles, como los sociales y las repercusiones ambientales pueden ser considerados cabalmente (Delft & Nijkamp, 1977). En el análisis espacial multicriterio, los datos geográficos se transforman en una decisión.

En este contexto, para poder evidenciar los sitios de mayor vulnerabilidad ambiental en la cuenca florícola del Estado de México, se realizó un análisis espacial con base en dos fases metodológicas, la primera corresponde a la aplicación del método Delphi para conocer las variables que influyen de manera significativa en la vulnerabilidad y la segunda en una evaluación multicriterio.

Fase 1

La selección de variables físicas, bióticas y socioeconómicas útiles en la definición de la vulnerabilidad de agua y suelo de la cuenca florícola, lo efectuamos a través del método Delphi; un procedimiento eficaz (Linstone y Murray, 2002) y sistemático que tiene como objeto la recopilación de opiniones de expertos sobre un tema particular con el fin de incorporar dichos juicios en la configuración de un cuestionario y conseguir un consenso a través de la convergencia de las opiniones de expertos diseminados geográficamente (Bass, 1983; Ludwig, 1996, 1997). Su principal novedad consiste en el uso desde la primera ronda de un cuestionario estructurado al que se van adicionando o modificando, si es el caso, las diferentes opiniones de los expertos en las sucesivas rondas hasta completar al menos dos (Linstone y Murray, 2002). En la presente investigación se aplicó el método Delphi con dos rondas, la primera para conocer las variables relacionadas con la vulnerabilidad hídrica y edáfica en el área y la segunda para ponderarlas y así poder decidir cuales utilizar en el análisis multicriterio.

La selección del panel de expertos tuvo dos dimensiones: una cualitativa (se seleccionaron en función del objetivo del estudio y atendiendo al criterio de experticidad) y otra cuantitativa (la elección del tamaño de la muestra estuvo en función de los recursos, medios y tiempo disponibles). Para garantizar un buen nivel de calidad, la selección de expertos la efectuamos con base en un criterio estándar preestablecido. Por criterio de experticidad se refiere a aquellos que poseen un alto grado de conocimientos en materia de Medio Ambiente y Recursos Naturales, ya sea porque se han dedicado a la investigación y estudios de aspectos relacionados, o bien porque en su experiencia profesional, el tema ha constituido parte importante de su trabajo (Bass 1983). Para el presente caso de estudio, el grupo de expertos estuvo conformado por doce investigadores adscritos a la Universidad Autónoma del Estado de México y a la Universidad Federal de Sao Carlos, Brasil.

Se seleccionaron seis de las variables mencionadas con mayor frecuencia (repetición) en el resultado de la encuesta, aquellas con acceso gratuito en formatos geoespaciales, así como aquellas que tuvieran relación con el recurso hídrico y edáfico de la zona de estudio. Todas las variables fueron proyectadas y estandarizadas (0-1) en formato Raster en WGS1984 y celdas 30x30 m, para hacerlas comparables en el análisis multicriterio (Cuadro 1). Elegimos el método de estandarización de acuerdo con el rol de cada criterio (para mayor detalle revisar, Hernández, 2019).

Para generar la variable de distancia a invernaderos utilizamos una distancia de costo, una imagen que incorpora tanto la distancia real recorrida hacia los invernaderos desde las corrientes y cuerpos de agua como los efectos de fricción (usos de suelo) encontrados en el camino. Se utilizó la herramienta "cost" en el software TerrSet.

También se consideró el uso de suelo y la cobertura vegetal obtenidos a través de la clasificación supervisada de imágenes Landsat 8 OLI con resolución espacial de 30 metros (23 enero de 2017). Se procesaron las imágenes considerando correcciones radiométricas, geométricas y topográficas; con base en el método de sustracción de objetos oscuros (Chávez, 1988; 1989). Aplicamos el compuesto de bandas RGB en falso color 6-5-4, utilizada para análisis de vegetación, uso de suelo y humedad (Franco, 2017). La clasificación se realizó en TerrSet con el método de máxima verosimilitud (Maxlike y Vargas, 2018).

Cuadro 1
Fuentes de las variables geoespaciales

Variable	Fuente	Año
Proximidad a cuerpos de agua	Atlas geológico ambiental del Estado de México (Mitre *et al.* , 2013)	2013
Textura de suelo	Carta edafológica	2013
Precipitación	Superficies bioclimáticas de la Cuenca Lerma Chapala (Manzano-Solís 2018)	1960 - 2010
Pendiente del terreno	Servicio geológico de Estados Unidos (USGS)	2000
Uso de suelo	Servicio geológico de Estados Unidos (USGS). Landsat 8	2017
Invernaderos	Servicio geológico de Estados Unidos (USGS). Landsat 8	2017

Fuente: elaboración propia.

Se realizó la ponderación de variables a partir de los resultados de la encuesta Delphi, a través de una comparación pareada, propuesta por Saaty (1977) en el contexto del proceso jerárquico analítico. Este método se basa en la elaboración de una matriz de comparación entre los factores, de acuerdo con la importancia relativa entre pares de factores; definido por el número de factores a ponderar (pares de factores), comparando la importancia de uno sobre cada uno de los demás, de acuerdo con una escala de ponderaciones de 1/9 a 9 (Eastman, 2001).

Fase 2

Corresponde a la Evaluación Multicriterio (EMC) dirigida a conocer la vulnerabilidad ambiental (hídrica y edáfica) en la cuenca florícola. La EMC considera el Método de Sumatoria Lineal Ponderada, el cual corresponde a una operación aritmética simple del tipo compensatorio aditivo (Gómez y Barredo, 2005). Este método consiste en multiplicar el valor de cada

criterio o factor (coberturas georreferenciadas y normalizadas en escala de 0 a 1) por su peso (Eastman, 2006).

Donde, "*S*" es la aptitud de la alternativa "i", "wj" el peso del factor "i" y "vi" es el valor ponderado del factor "i" (Drobne y Lisec, 2009).

Una vez definidos los pesos ejecutamos una EMC por cada esquema de integración y con el esquema de pesos iguales, obteniendo dos modelos cuya denominación se conservó de forma respectiva. Para esta tarea se utilizó el módulo MCE de TerrSet con la opción de Combinación Lineal Ponderada (WLC, por sus siglas en inglés), en donde se ingresaron los seis factores con sus respectivos pesos. El resultado de este proceso es el mapa de vulnerabilidad ambiental. Se obtuvo la razón de consistencia de acuerdo con la lógica de Matriz por Pares de Saaty, que se encuentra en el modelador de decisión espacial (*Spatial Decision Modeler*) de TerrSet.

Adicionalmente, se seleccionaron las 100 hectáreas prioritarias contiguas y no contiguas, con mayor vulnerabilidad a través del análisis MOLA de TerrSet con la opción de operación de objetivo único. Para explorar la sensibilidad del modelo se elaboraron seis escenarios diferentes, en cada uno de los escenarios eliminamos uno de los seis factores con los que se trabajó en el análisis multicriterio (en el presente artículo solo se presenta el resultado del escenario que mostró mayor variación). Para desarrollar este análisis de sensibilidad se elaboró una matriz de comparación por cada escenario distribuyendo el peso del factor eliminado entre los cinco restantes, pero siempre respetando la consistencia de la matriz.

Resultados y discusión

A partir de la primera ronda Delphi, se obtuvieron 84 variables. De las cuales 34 fueron para el enfoque del recurso hídrico y 50 para el enfoque del recurso edáfico. De estas, se seleccionaron las seis con mayor frecuencia en todas las encuestas Delphi: proximidad a cuerpos de agua, textura de suelo, precipitación, pendiente del terreno, uso de suelo e invernaderos.

Como se mencionó, para poder obtener las variables de uso de suelo e invernaderos se aplicó una clasificación supervisada de uso de suelo, ubicando 4,393.26 hectáreas cubiertas con invernaderos, lo que representa un 6.35% del área y 21,174.03 hectáreas de bosque denso, lo que corresponde a un total de 30.61% convirtiéndola en la cobertura con mayor presencia en la región (Cuadro 2, Figura 2).

La variable mencionada con mayor frecuencia y ponderada como la más importante es la que representa a las zonas con mayor actividad florícola y la probabilidad de convertirse en ese tipo de uso de suelo, simboliza la fuente de mayor contaminación y vulnerabilidad al suelo y al agua por la gran cantidad de agroquímicos de alta toxicidad depositados y por la explotación excesiva

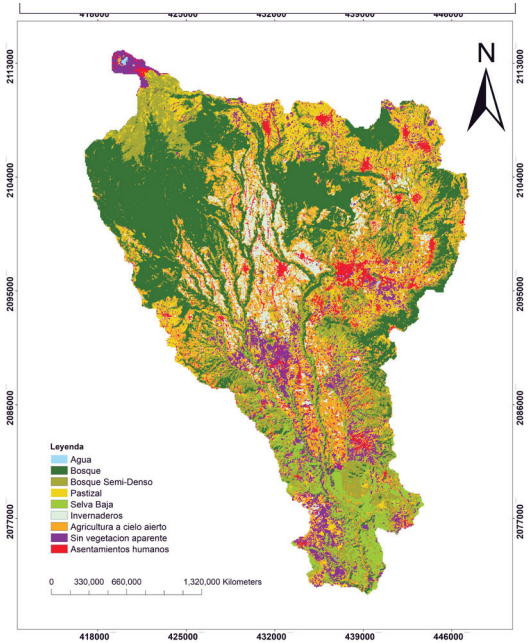
de ambos recursos. La imagen de distancia de costo resultante se observa en la Figura 3: los valores de mayor costo se encuentran dentro del municipio de Villa Guerrero y Tenancingo (los mayores productores de flores). Para nuestra investigación el índice de consistencia (CI) es de 0.03, mientras que la razón de consistencia (CR) es de 0.027, lo que indica que la evaluación de la matriz presenta una adecuada consistencia.

Cuadro 2
Uso y cobertura de suelo de la cuenca florícola, 2017

Cobertura	Hectáreas	Porcentaje%
Agua	119.43	0.1
Bosque	21174.03	30.6
Bosque Semi- Denso	11338.3	16.3
Pastizal	9275.4	13.4
Selva	3880.4	5.6
Invernaderos	*4393.2*	6.3
Agricultura a cielo abierto	10649.6	15.3
Sin vegetación Aparente	5629.23	8.1
Asentamientos Humanos	2700.6	3.9
Total	69160.5	100

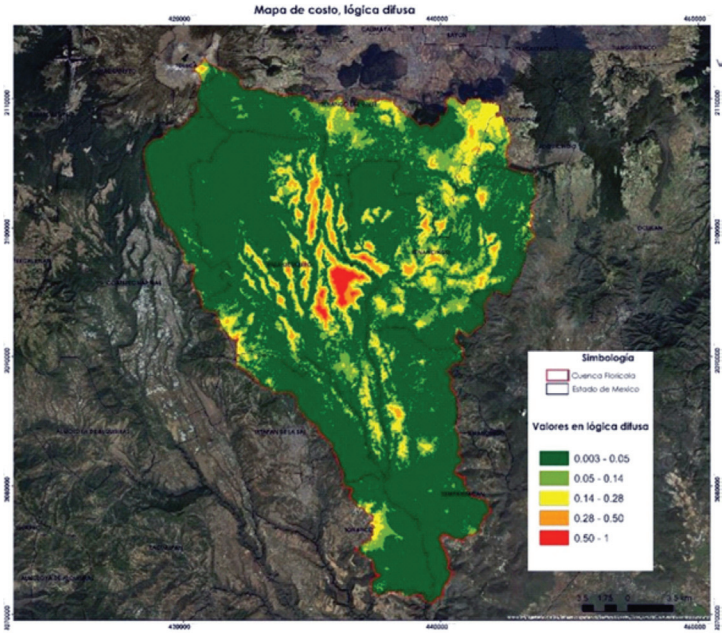
Fuente: elaboración propia a partir de imagen LandSat7, USGS, 2017.

Figura 2. Uso y cobertura de suelo de la cuenca florícola, 2017



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Distancia a invernaderos



Fuente: elaboración propia a partir de imágenes de *Google Earth*.

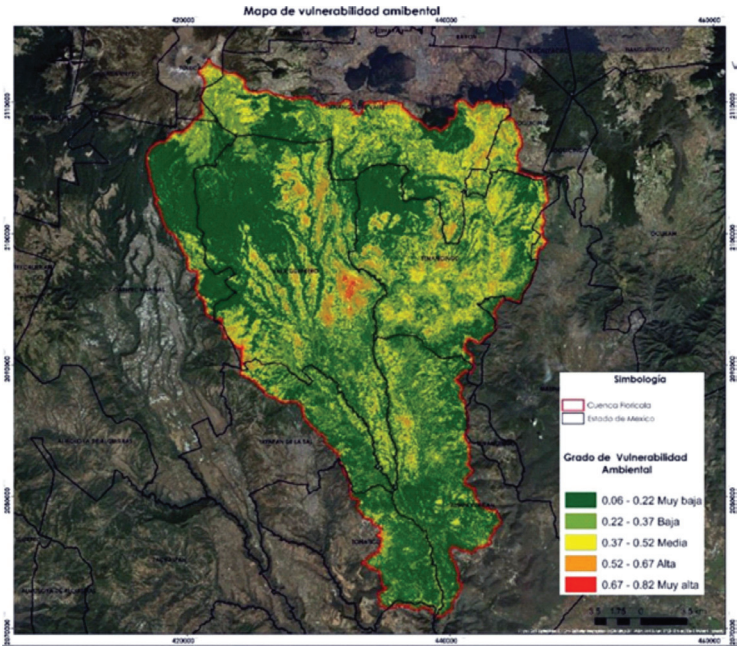
El mapa de vulnerabilidad muestra la etapa final del análisis multicriterio (Figura 4). En el cual los colores rojos, representan una vulnerabilidad alta, dentro de la cuenca florícola. De acuerdo con lo que se puede observar en el mapa, los sitios con mayor vulnerabilidad ambiental (en color rojo) para la cuenca florícola del Estado de México, se encuentran ubicados en los municipios de Villa Guerrero y Tenancingo, aunque es preciso mencionar que, dependiendo del modelo, los sitios presentan diferencias en sus superficies.

El Cuadro 3 expone las superficies en km^2 de acuerdo con los grados de vulnerabilidad ambiental que se obtuvieron por el modelo. Como inicio se puede indicar que la superficie que corresponde a la vulnerabilidad muy baja tiene los valores más altos, es decir: que la superficie más grande corresponde a las áreas con vulnerabilidad ambiental muy baja. Por otro lado, los valores más bajos se presentan en la vulnerabilidad ambiental muy alta.

En la Figura 5 se observa que las 100 hectáreas contiguas prioritarias se encuentran dentro del municipio de Villa Guerrero, mientras que las áreas no contiguas se presentan en este municipio, pero también con en otros, como Tenancingo. Este mapa delinea de manera muy específica los sitios prioritarios de atención, que requieren de la intervención inmediata de

agentes gubernamentales y no gubernamentales, así como el involucramiento de la academia y la sociedad civil, con el fin de atender los graves daños socioambientales. En la zona ya se han iniciado este tipo de intervenciones, enfrentándose a grandes limitantes: como la prevalencia de un pensamiento capitalista y extractivista antepuesto a la salud humana e incluso a la vida; así como la carente vinculación interinstitucional; la falta de continuidad de planes y programas dirigidos a la educación ambiental y capacitación.

Figura 4. Vulnerabilidad ambiental



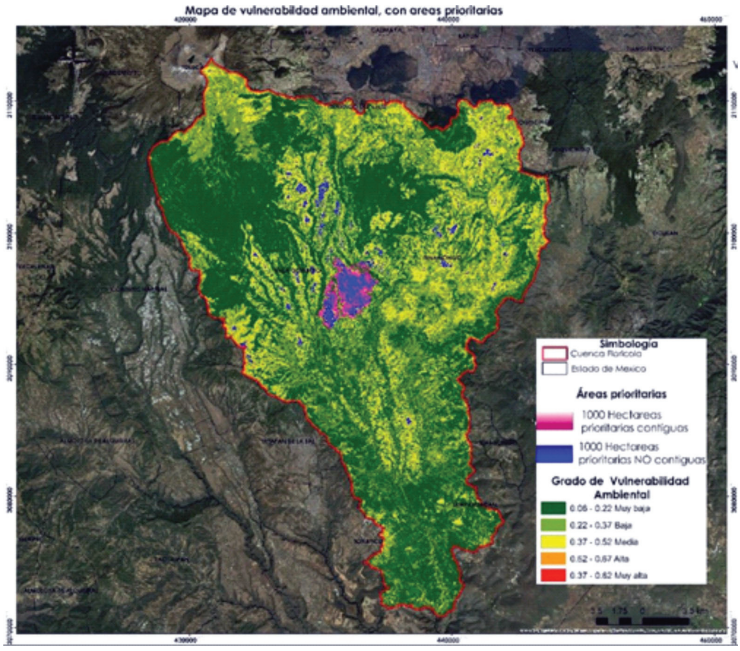
Fuente: elaboración propia a partir de imágenes de *Google Earth*.

Cuadro 3
Superficie por grado de vulnerabilidad ambiental

Tipo Vulnerabilidad	Superficie km²	Porcentaje
Muy baja	344.73	50.12%
Baja	185.61	26.99%
Media	147.05	21.38%
Alta	9.58	1.39%
Muy Alta	0.80	0.12%
Total	687.74	100

Fuente:elaboración propia.

Figura 5. Análisis MOLA



Fuente: elaboración propia a partir de imágenes de *Google Earth*.

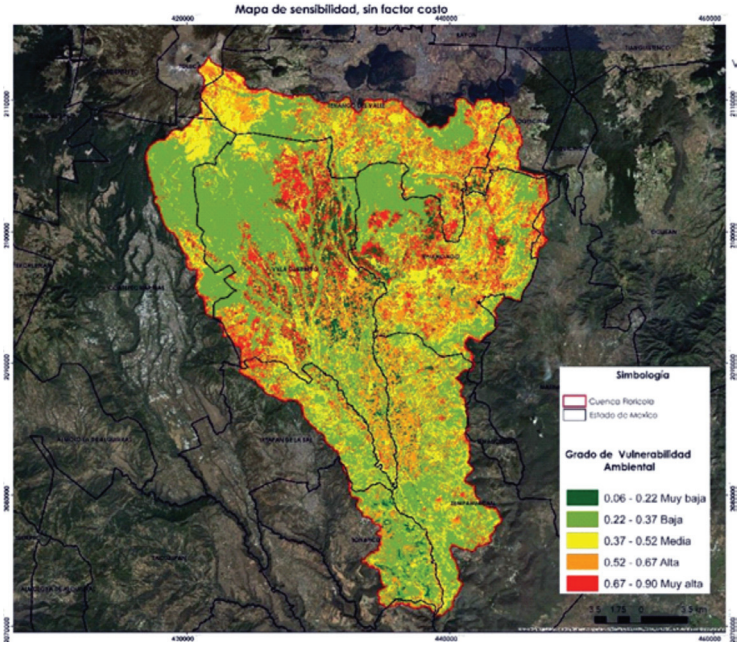
En el análisis de sensibilidad, es evidente que al remover la variable costo (que representa a los invernaderos y a la distancia a cuerpos de agua) del análisis de vulnerabilidad, ésta aumentó considerablemente en otras zonas de la cuenca. Además de expandirse sobre Villa Guerrero, abarca una gran parte de Tenancingo y el norte de Ixtapan de la Sal (Figura 6). Este mapa es útil para resaltar zonas en donde se requieren acciones de prevención más que de reducción de impactos, limitando el desarrollo de cultivos florícolas.

Estrategias para reducir y monitorear la vulnerabilidad ambiental

En el apartado anterior se evidenciaron cinco variables importantes para analizar la vulnerabilidad ambiental en la zona de estudio, haciendo énfasis en el agua y el suelo: proximidad a cuerpos de agua, textura de suelo, precipitación, pendiente del terreno, uso de suelo y presencia de invernaderos. Resaltamos que el cambio de uso de suelo, como la principal variable que debe monitorearse a través del tiempo, sobre todo de las zonas florícolas con mayor proximidad a las corrientes de agua.

Dos variables adicionales que requieren ser monitoreadas periódicamente en la zona de estudio, con el fin de conocer la vulnerabilidad ambiental, son la calidad de agua y del suelo a través de muestreos estratificados en campo, datos que aún no se encuentran disponibles. Es evidente que la zona sur del Estado de México presenta una problemática en cuanto a desabasto del recurso; se reconoce la tendencia a la disminución de su disponibilidad, su persistente contaminación, y la sobreexplotación de los acuíferos. Por esta razón, es necesario implementar herramientas que permitan ponderar su calidad en un determinado intervalo de tiempo. El Índice de Calidad del Agua (ICA) es una herramienta que permite diagnosticar la calidad de este recurso natural de manera integral, especificando condiciones ambientales, de igual manera representa el marco de referencia ideal para establecer programas de control en la contaminación de los cuerpos de agua, y finalmente contribuye en la oportuna toma de decisiones gubernamentales en pro de un adecuado manejo de los recursos hídricos.

Figura 6. Análisis de sensibilidad sin factor costo



Fuente: elaboración propia a partir de imágenes de *Google Earth*.

Actualmente se encuentran en marcha algunas investigaciones, en las que ya se está evaluando la calidad del agua de los pozos de agua y las corrientes en la zona de estudio, no así para el suelo. Tener datos reales que describan las

condiciones de estos elementos en la zona, son esenciales para poder conocer la magnitud del problema y fundamentar estrategias de atención inmediata con los tomadores de decisiones. Como antecedente, a partir de entrevistas con la población y productores de la región, se sabe que el agua que corre a través de los ríos perennes de la zona ya no es usada para ninguna actividad humana, por la contaminación evidente, toda el agua que se usa para consumo humano y otras actividades proviene de manantiales del nevado de Toluca, ubicados al norte de la zona florícola. Es importante puntualizar que el monitoreo de estas variables no necesariamente requiere una gran inversión, existen actualmente técnicas muy sencillas y accesibles, que permiten obtener datos incluso a partir de bioindicadores.

Además de las variables biofísicas mencionadas, en esta cuenca existen otros elementos socioeconómicos que están siendo abordados a través de diversos enfoques, entre ellos: la salud humana, la marginación y la distribución de los recursos.

Con base en estas prioridades a continuación se describen algunas estrategias de atención para mitigar la vulnerabilidad ambiental en la zona de estudio. Estas fueron formuladas tratando de aprovechar las oportunidades y abordar las amenazas de cada nivel de organización: regional, microregional, gubernamental, institucional, empresarial, productivo y población local estratificada, con el fin de apoyar en la toma de decisiones.

Dentro de las estrategias se resaltan aquellas que tienen que ver con la educación ambiental, la transferencia del conocimiento y el empoderamiento de la población. En torno a ellas, se diseñó e implementó un curso-taller participativo piloto dirigido a productores florícolas, con el objetivo de concientizar a los productores del impacto que tiene dicha actividad en el ambiente y en su salud, así como la planeación de acciones y actividades para atender la problemática en el sitio. El curso taller comprende tres apartados: introducción y sensibilización ambiental; planeación, y definición de acciones y actividades locales.

Considerando que la floricultura en la región tiende a ser una actividad en expansión, es necesario tener en cuenta que, el impulso y desarrollo de un solo tipo de actividad en los espacios menos desarrollados puede resultar peligroso, más aun, en países puramente agrícolas, que tiene todas las posibilidad de no progresar, ni siquiera en su agricultura (Galbrait, citado por Barre, 1992), por lo que se debe buscar una gama de posibilidades productivas, de tal manera que se aproveche tanto la disponibilidad de los recursos como la experiencia del capital humano, a fin de reducir el desempleo, los ingresos raquíticos y deficientes, mitigar los desplazamientos de mano de obra hacia las zonas urbanas y metropolitanas, y sobre todo contribuir a mejorar las condiciones y niveles de vida de la sociedad local y regional.

El hecho de que se diversifique la producción no implica una baja en la calidad de los bienes y/o servicios que se vayan a generar, al contrario, producir y ofrecer una mayor gama de productos significa poner en juego toda la capacidad de que se dispone en la localidad o región, buscando ser competitivos en los mercados local y regional. La búsqueda de esta ampliación productiva permite tener una mayor probabilidad de crecimiento y creación de oportunidades, fortalecimiento de capacidades e iniciativas de los agentes económicos, incrementar el empleo de mano de obra rural y/o campesina, y adoptar tecnologías apropiadas para finalizar en una mejora social. En este proceso de diversificación productiva, la tecnología, se entiende como el conjunto de información y conocimientos que puede ser aplicable a la producción de bienes y servicios y que a tal fin puede combinar elementos novedosos y tradicionales, o conocimiento transmisible y aplicable, de forma sistemática a la transformación del medio para la producción de bienes y servicios agrícolas (Imade, citado por Méndez, 1997), por lo que este actúa como un elemento determinante en el nivel de productividad, competitividad y sustentabilidad para las unidades de producción.

En el uso de la tecnología para la producción de una mayor gama de bienes agrícolas en el ambiente local, implica mejorar la forma de hacer mediante la reducción de costos, aumento del rendimiento, aprovechamiento del uso de recursos, fomento de ciclos de uso de materiales para reducir la presión ambiental y, sobre todo, la creación de ambientes productivos sustentables. En el intento de diversificar la producción agrícola local y regional, puede partirse mediante dos vías (Iglesias, 2018):

1. A partir de la gama de labores tradicionales dinámicas (TRADIN), que implica aprovechar toda la experiencia y conocimiento de la sociedad local para producir, vinculado con el uso de técnicas modernas acorde a las condiciones del entorno, con el fin de configurar ambientes productivos tradicionales más dinámicos y sustentables, modificando consecuentemente algunas etapas del proceso productivo, implementando mecanismo o modo de intervención para reducir el costo y tiempo de producción. Diversificar las actividades agrícolas a partir de la condición local-regional, implica aprovechar el potencial acumulado en el patrimonio sociocultural, humano, natural y productivo, a fin de crear un espacio económico más sustentables y de desarrollo social, para no caer en la degradación social y en la economía espuria (Sunkel, 1991; Blakely, 1994; Coraggio, 2000).
2. La diversificación a partir de labores emergentes progresivas (EMERPROG), refiriéndose aquellas actividades que tienen nula o escasa preponderancia en la localidad, pero con la implementación de tecnología, inversiones, programas públicos específicos o algún otro mecanismo de soporte, estas pueden emerger y fomentarse, incluso pueden ser mucho más rentables y viables que las tradicionales. Esta forma de producción está encaminada al aprovechamiento de las potencialidades disponibles (recursos materiales,

naturales, humanos, infraestructura, entre otros), que están desaprovechados o descuidados. Con el fomento de estas actividades productivas, también se busca satisfacer nuevas necesidades sociales, preservar el ambiente y mejorar la calidad de vida en la temporalidad. De hecho, esta forma de producción es recomendable implementarlas en las localidades menos favorecidas, pues también en los espacios rurales se pueden desplegar actividades productivas turísticas, agroindustriales, piscícolas, mineras, artesanales de alto valor agregado y otros aprovechamientos posibles para crear escenarios de futuro progresivo y sustentables (Alburquerque, 2002, Iglesias, *et al.*, 2018).

Es así que la diversificación productiva a escala local y regional permite tener una mayor probabilidad de crecimiento y creación de oportunidades, fortalecimiento de capacidades e iniciativas de los agentes económicos, incrementar el empleo de mano obra rural y/o campesina, así como adoptar tecnologías apropiadas para finalizar en una mejora social.

En la cuenca florícola se observa este ambiente productivo, propiciado en gran medida por la disponibilidad de grandes afluentes hídricos perennes en la mayoría del territorio, lo que permite tener varios cultivos de riego y cosechas en el mismo ciclo agrícola (intercalo productivo). De hecho, en las localidades donde la disponibilidad de agua para riego agrícola es abundante, se cultiva y produce arroz, caña de azúcar, mamey, mango, limón, café y aguacate, considerado como productos de alta rentabilidad en términos de toneladas por hectárea y precio de mercado.

La promoción de la producción a la intemperie y de manera orgánica es otra estrategia que se debe fortalecer y que puede darles un valor agregado a los productos de la región y que lo puede hacer muy atractivo al mercado nacional, pues los insumos utilizados para el cuidado de los cultivos y plantas también son de base orgánica, aun y cuando son más caros respectos a los insumos inorgánicos industrializados. Utilizan composta, lombricomposta, lixiviados de residuos orgánicos para combatir y controlar plagas y enfermedades, entre otros. En la región ya existen productores que aplican estás estrategias y que pueden servir como ejemplo para que el resto poco a poco puede ver que es rentable, además pueden contribuir a la capacitación para que poco a poco todos migren a una producción con menor impacto en el ambiente.

Misma situación es la caña de azúcar, aguacate, mamey, limón y café, que, si bien no son productos agrícolas que caracterizan el perfil productivo de la región objeto de estudio, la gran experiencia de los productores, las condiciones físicoambientales y sobre todo la disponibilidad de microcuencas hídricas favorecen el cultivo de estos productos, e incluso están tomando gran relevancia nivel local, aun cuando en la región todavía es marginal la importancia de dicha actividad.

La producción de agave para la elaboración de mezcal también es una alternativa productiva que se puede fomentar más en la región. Después de

100 años de tradición, los agaveros del Estado de México en 2018 recibieron la denominación de origen para la producción de mezcal. En otros estudios que se realizan en la región se ha identificado que esta tradición incluye a cuatro generaciones que conocen la forma de sembrar el agave, sacar la piña, pelarla, cocerla, machacarla, destilar, envasar y comercializar; todo ello de forma orgánica y artesanal que le brindan al proceso un entorno rústico que atrae al turismo. Con siete municipios que hoy producen un destilado de agave, los 678 productores de localidades como Malinalco, Ocuilan, Tenancingo, Zacualpan, Zumpahuacán, Tonatico e Ixtapan de la Sal, principalmente, siembran agave criollo y realizan un proceso totalmente orgánico. En este contexto ya se han iniciado talleres en la zona de estudio, dirigidos a productores de mezcal, enfocados a prevenir los impactos derivados de la actividad y a fomentar una producción agroecológica sustentable.

En estrategias de prevención se puede mencionar la promoción y participación en el desarrollo de programas de manejo de la zona de estudio, de toda la región no solo de la cuenca. La cuenca presenta tres Áreas Naturales Protegidas, de las cuales solo cuatro cuentan con Programa de Manejo vigente. Los programas de manejo son las herramientas principales para dirigir la conservación, aprovechamiento y uso sustentable de los recursos dentro de las ANP y sin ellos no existe dirección alguna que asegure la permanencia de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que representan. En este tema ya se ha iniciado con el trabajo conjunto entre investigadores, la Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna del Estado de México, los habitantes y gobiernos locales para desarrollar los programas de manejo faltantes de las ANP de la región. Lo anterior con estrategias de investigación acción participativa que permitan el empoderamiento de la población local, incluyendo a niños y mujeres.

Una de las estrategias de mayor relevancia y que está dirigida a todos los ámbitos y niveles educativos es la educación ambiental y sensibilización ambiental que permitan transmitir toda la información recabada sobre el tema, además de plantear acciones viables en cada una de las localidades. Se puede realizar a través de cursos-talleres con diferentes enfoques, promoviendo temas como: el uso adecuado de agroquímicos; la prevención y atención oportuna de intoxicaciones; reconocimiento de polinizadores clave en los ecosistemas locales; el uso de controles biológicos de plagas y fertilización orgánica de suelos; el desarrollo y monitoreo de programas de recolección de envases de agroquímicos; el desarrollo de programa para el manejo de residuos, y la generación de programas de reconversión de uso de agroquímicos.

Conclusiones

Los municipios con mayor vulnerabilidad ambiental en la cuenca florícola son los municipios de Villa Guerrero y Tenancingo, convirtiéndose en zonas prioritarias para el desarrollo oportuno de acciones resilientes encaminados a la protección del suelo y agua, así como a la mitigación y control del uso de plaguicidas.

Se definieron cinco variables importantes para analizar la vulnerabilidad ambiental en la zona de estudio, haciendo énfasis en el agua y el suelo: proximidad a cuerpos de agua, textura de suelo, precipitación, pendiente del terreno, uso de suelo y presencia de invernaderos. Resaltando el cambio de uso de suelo, como la principal variable que debe monitorearse a través del tiempo, sobre todo de las zonas florícolas con mayor proximidad a las corrientes de agua.

Además de las variables biofísicas mencionadas, en esta cuenca existen otros elementos que deben ser monitoreados y están siendo abordados en otras investigaciones a través de diversos enfoques, entre ellos: la calidad del agua, la calidad del suelo, la salud humana, la marginación y la distribución de los recursos.

En el último apartado de este artículo, se describe una serie de estrategias de atención para mitigar la vulnerabilidad ambiental en la zona de estudio. Como punto crucial para la implementación de estas se encuentra la promoción de foros interinstitucionales que permitan delinear y fomentar la aplicación de políticas públicas dirigidas específicamente a las condiciones y problemáticas de la región.

Todo lo anterior debe ir ligado al desarrollo de proyectos de investigación inter y multidisciplinarios que pueda atender cada una de las amenazas, así como monitorear de manera más local y precisa las condiciones de los recursos naturales, así como el efecto socioambiental que genera la implementación de cada una de las estrategias.

Bibliografía

Alburquerque, F., 2002: *Desarrollo económico territorial. Guía para agentes*. Sevilla: Instituto de Desarrollo Regional, Fundación Universitaria.

Ávalos, H.C., A.G. Pérez, N.L. González, B. Turpin, L. Mascarenhas, N. Federman y D.S. Hawkins, 2017: "Las cuencas hidrográficas de México, diagnóstico y priorización" en *Journal of Clinical Oncology*, 35.

Barbero Sierra, C. 2013: "Retos ambientales globales y desarrollo" en Ramos García-Serrano, C. y V. Sánchez Maldonado (eds.), 2013: Manual de Medio ambiente. Retos ambientales y cooperación al desarrollo, Madrid: Alianza por la Solidaridad y Agencia Española de Cooperación para el Desarrollo – AECID.

Barre, R., 1992: El desarrollo económico, México: Fondo de Cultura Económica.

Bass, B.M. 1980: Organizational decision making, USA: Homewood, IL Irwin.

Bejarano, F., C. Colín, I. González, I. Eugenia, M. Rodríguez, C. Martínez y W. Kubiak, 2017: Los Plaguicidas Altamente Peligrosos en México, México: Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas en México, A.C. (RAPAM), 351.

Blakely, E.J., 1994: Planning local economic development, theory and practice, USA: Sage publications.

Castillo-Cadena, J., L.E. Tenorio-Vieyra, A.I. Quintana-Carabia, M.M. García-Fabila, E. Ramírez-San Juan y E. Madrigal-Bujaidar, 2006: "Determination of DNA damage in floriculturists exposed to mixtures of pesticides" en Journal of Biomedicine and Biotechnology, 1–12.

Castillo-Cadena, J., A.L. González-Mercado, N. Hernández-Caballero, E.R.S. Juan, I. Álvarez-González y E. Madrigal-Bujaidar, 2013: "Immunotoxic damage in floriculturists exposed to pesticide mixtures" en Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 48(1), 33–39.

Chavez, P.S., 1988: "An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data" en Remote Sensing of Environment, 24(3): 459-479.

Coraggio, J.L. 2000: Economía urbana, la perspectiva popular, Quito: Alba-Laja.

DeAngelis, L.D. 1980: "Energy flow, nutrient cycling, and ecosystem resilience" en The Ecological Society of America, 32(2), 275–283.

Delft, A. va., y P. Nijkamp, 1977: Multicriteria Analysis and Regional Decision-Making, Boston: The Hague, Martinus Nijhoff.

Drobne, S. y A. Lisec, 2009: "Multi-Attribute Decision Analysis in GIS: Weighted Linear Combination and Ordered Weighted Averaging" en Informática, 33, 459-474.

Duarte, Y.A., F., Bautista, M.E., Mendoza y C. Delgado, 2013: "Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos" en Tropical and Subtropical Agroecosystems, 16(2), 243–263.

Eastman, J.R., 2016: TerrSet Manual. Clark Labs.

Eastman, J.R., 2001: Guide to GIS and Image Processing, Volumen Capítulo 1. Decision Support: Decision Strategy Analysis, Worchester, EUA: Clark University.

Eastman, J.R. 2006. Idrisi Andes Tutorial. Clark Labs, Worcester, MA

Franco, R., 2017: Composiciones Landsat en ARCGIS. Guía Básica, Bogotá, Colombia: 45p. Disponible en http://wp.me/p2IwQU-1bh

Gálvez Gamboa, G.T., M.R. Sánchez Servín, F. Parra Cota, J. García Pereyra, G.N. Aviña Martínez, S. Santos Villalobos, 2018: "Plaguicidas en la agricultura mexicana y potenciales alternativas sustentables para su sustitución" en Revista Científica Biológico Agropecuaria Tuxpan 7 (11).

Gómez M., J. Barredo, 2005: Sistemas de Información Geográfica y evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio, Madrid-España: Segunda Edición RA-MA.

Hernández, Cesar Edgar Daniel, 2019: *Vulnerabilidad ambiental de la cuenca florícola del Estado de* México, Evaluación mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica, México: Tesis de Maestría en Análisis Espacial y Geoinformática, Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Holling, C.S., 1973: "Resilience and stability of ecological systems" en *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4:1-23.

INEGI Instituto Nacional de Geografía y Estadística, 2018: *Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera* EMIM

Iglesias, D., C. Meléndez, C., y C. Nonato, 2015: Posibilidades de integrar un sistema productivo sustentable en la región VI, Sur del Estado de México" en *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1, 251-256.

Iglesias, D., C. Meléndez y J. Castillo, 2018: "La diversificación productiva en la región sur, Estado de México ¿sustentabilidad productiva o externalidades ambientales crecientes?" en *Dinámica económica y procesos de innovación en el desarrollo regional*. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, Coeditores, México.

Ippolito, A., S. Sala, J.H. Faber y M. Vighi, 2010: "Ecological vulnerability analysis: A river basin case study" en *Science of the Total Environment*, 408(18), 3880–3890.

Janssen, M.A. y E. Ostrom, 2006: "Empirically based, agent-based models" en *Ecology and Society*, 11(2): 37.

Javier da Silva, C. y O.D. Cardozo, 2015: "Evaluación multicriterio y Sistemas de Información geográfica aplicados a la definición de espacios potenciales para uso del suelo residencial en resistencia (Argentina)": en *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 23–40.

Johnson, J.E., D.J. Welch, J.A. Maynard, J.D. Bell, G. Pecl, J. Robins y T. Saunders, 2016: "Assessing and reducing vulnerability to climate change: Moving from theory to practical decision-support" en *Marine Policy*, 74(July), 220–229.

Kumar, P., D. Geneletti y H. Nagendra, 2016: "Spatial assessment of climate change vulnerability at city scale: A study in Bangalore, India" en *Land Use Policy*, 58, 514–532.

Linstone H.A. y T. Murray, (Eds), 2002: *The Delphi Method: Techniques and Applications. New Jersey Institute of Technology,* USA: University Heights, Newark, 618 pp.

Ludwing, B.G. 1996: "U.S. Extension systems Facing the Challenge to Internationalize" en *Journal of Extension*, 34(2).

Ludwing, B.G., 1997: Predicting the future: Have you considered using the Delphi methodology? en *Journal of Extension*, 35(5).

Malczewski, J., 1999: *GIS and multicriteria decision analysis*. New York: W. & Sons, Ed.

Manzano-Solís, L.R., M.A. Gómez-Albores, C. Díaz-Delgado, C.A. Mastachi-Loza, R. Ordoñez-sierra, K.M. Bâ y R. Franco-Plata, 2018: "Identification of Variations in the Climatic Conditions of the Lerma-Chapala-Santiago Watershed by Comparative Analysis of time series en *Advances in Meteorology*, 16 p. Ed. Hindawi.

Mena, C.G., 2018: "México, tercer lugar en cultivo de flores" en *La Jornada*.

Méndez, R., 1997: *Geografía económica. La lógica espacial del capitalismo global.* Barcelona: Ariel.

Metzger M.J., R.G.H. Bunce, R.H.G. Jongman, C.A. Mücher y J.W. Watkins, 2005: "A climatic stratification of the environment of Europe" en *Global Ecology and Biogeography,* 14: 549–563.

Mitre Salazar, M.L., J. Martínez Reyes y A. Bayona Celis, 2013: *Atlas geológico ambiental del Estado de México*: Centro de Geociencias de la UNAM.

Nguyen, K.A. y Y.A. Liou, 2019: "Global mapping of eco-environmental vulnerability from human and nature disturbances" en *Science of the Total Environment*, 664, 995–1004.

Oliva, M., Rodríguez J. y G. Silva, 2005: "Estudio exploratorio de los problemas de salud humana derivados del uso de plaguicidas en Bellavista, municipio de Villa Guerrero, Estado de México" en *Manejo integrado de plagas y agroecología*, (76), 71–80.

ONU, 2018: No Title. Recuperado el 30 de septiembre de 2018, de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2018/06/la-agenda-de-desarrollo-sostenible-necesita-un-impulso-urgente-para-alcanzar-sus-objetivos/

Saaty, T.L. 1977: "A scaling method for priorities in a hierarchichal structure" en *Journal of Mathematical Psychology,* 15(3) 234–281.

SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2017: *Uso de fertilizantes químicos en la superficie sembrada 2016*, 8. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/220645/Boletines_superficie_sembrada.pdf

Soares Moraes, D. y R. Romero, 2008: "Recursos hídricos de la cuenca del Amacuzac" en *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos,* (8), 13–22.

Sunkel, Osvaldo, 1991: *El desarrollo desde adentro, un enfoque neoestructuralista para América Latina,* México: Fondo de Cultura Económica.

Tecuapleta, V.M.G., 2014: *Ecotoxicidad producida por agroquímicos empleados en el cultivo de Gerbera jamensonii en invernadero, en Villa Guerrero, Estado de México*. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma del Estado de México.

Vargas, D. 2018: *Situación actual y perspectivas del uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca florícola del Río Alto Amacuzac, Estado de México mediante el uso de Teledetección y herramientas SIG*. Tesis de Licenciatura en Geoinformática, Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Viles, H.A. y N.A. Cutler, 2012: "Global environmental change and the biology of heritage structures" en *Global Change Biology*, 18(8), 2406–2418.

1.2. Perfil de resiliencia urbana. Un instrumento de medición y seguimiento en la gestión integral del riesgo

María Milagros Campos Vargas
Francisco Monroy Gaytán
Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

Luz Elena Rivera Cano
Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil CDMX

Enrique Guevara Ortiz
director general del CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres)

Rafael Humberto Cambranis Marín
Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil CDMX

Alonso Reyes López
Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

A casi 40 años del temblor de 1985 en México, los avances del gobierno en cuanto al tema de la protección civil para hacer frente a los efectos y potencial de daño de los procesos naturales de magnitudes diversas, ha presentado un avance paulatino que transita desde la visión reactiva de la reconstrucción a la idea de la gestión del riesgo de desastre. En este contexto se han creado instituciones e instrumentos operativos para evaluar la capacidad administrativa en el país, relacionada con las emergencias y desastres. Los organismos trabajan en el fortalecimiento de las políticas relacionadas con la Gestión Integral del Riesgo y a partir de 2015 una de las estrategias es el estudio de la resiliencia urbana, con lo que se pretende que las ciudades cuenten con conocimientos de las características de asimilación y recuperación de la infraestructura de las ciudades y de sus residentes ante el impacto de un evento de riesgo de desastre y con esto formar planes de acción que den respuesta en términos de efectiva y protección, tanto del patrimonio como en los habitantes de las ciudades.

En este contexto la resiliencia es un tema que se encuentra en desarrollo; dentro de estas se pueden encontrar contribuciones tanto de conceptualización como de cuestiones prácticas, por lo que en la presente investigación se estableció como objetivo el proporcionar una visión general del perfil de resiliencia urbana como un instrumento de medición y seguimiento de apoyo en la gestión integral del riesgo, para logar esto, en un primer momento se hace el planteamiento del concepto de resiliencia (urbana) y su injerencia en la Gestión Integral del Riesgo, se continua con la descripción metodológica del perfil de resiliencia urbana y en la sección final se plantean los alcances y lo que aún se debe trabajar dentro de la propuesta.

La idea de resiliencia y su enfoque en la gestión integral de riesgo

La primera noción del concepto de resiliencia dirigida a estudios ambientales fue publicada en 1973 por Holling´s, dentro de un marco de investigación ecológica; en el estudio el autor plantea a la resiliencia como la persistencia de las relaciones dentro de un sistema siendo una medida de la capacidad de estos sistemas para absorber los cambios de estado de sus variables de conducción y parámetros, y aún persistir. Desde este punto de vista la resistencia a las perturbaciones y la velocidad para que el sistema vuelva a un equilibrio es la medida de la resiliencia (Davoudi, 2012: 300). Otros autores como Walker (2006, en Balázs, 2015) retoman esta base y plantean que la resiliencia es la capacidad de un sistema para absorber perturbaciones y reorganizarse mientras sufre cambios para retener, esencialmente, la misma función, estructura, identidad y retroalimentación, por lo que la resiliencia debe considerarse como el potencial de un sistema dado para preservar sus configuraciones y funciones, y sugiere que la estructura tiene la capacidad de reorganizarse a sí misma.

Hasta este momento se observa que el termino resiliencia plantea la resistencia y capacidad de recuperación de los ecosistemas biológicos, sin embargo estas interpretaciones fueron tomadas como referentes para distintas disciplinas, pero con diversas especificaciones adicionales, ejemplo de esto, es la definición del concepto para la línea de trabajo de la Gestión Integral del Riesgo (GIR), en la que autores como Norris (*et al.,* 2008) y Macías (2015) plantean a la resiliencia como un proceso que vincula, conecta o enlaza un conjunto de capacidades de adaptación de un sistema hacia una trayectoria positiva del funcionamiento y adaptación después de un disturbio, y en que las características positivas o deseables forman comunidades resistentes que pueden recuperarse con mayor facilidad de un desastre. En esta misma línea, autores como Walker, Holling Carpenter, y Kinzig (2004: 1) la definen como la capacidad de un sistema para absorber perturbaciones y reorganizarse mientras se experimentan cambios para retener esencialmente la misma función, estructura y retroalimentación. Martin (2012) menciona que la

resiliencia puede ser por un lado ecológica, es decir que asume que un sistema está caracterizado por múltiples equilibrios, y por otro lado adaptativa: que se relaciona con la capacidad de ajuste de la estructura de una comunidad en respuesta a conmociones externas.

En este punto, la visión del concepto de resiliencia toma una perspectiva orientada hacia los sistemas socioecológicos, compuesto por elementos sociales y ambientales, por lo que la teoría se extiende de ser un concepto estático, descriptivo y medible a una cualidad o propiedad deseable de los sistemas naturales y humanos frente a una variedad de tensiones potenciales (Klein, 2004: 35).

En la actualidad la línea de pensamiento en cuanto a la resiliencia en la GIR se dirige más a ser una propiedad emergente de los sistemas sociales, ecológicos y tecnológicos coproducidos con los individuos, es decir, la resiliencia se mantiene y se produce a través de interacciones sociales (Kruse *et al.,* 2017: 2332), que, de acuerdo con Pendall *et al.* (2007), se da cuando una persona, la sociedad, el ecosistema o ciudades resistentes ante un shock o estrés rápidamente 'vuelven a la normalidad' (es decir, al equilibrio), o al menos es fácilmente incitado a una "nueva normalidad" (una armonía alternativa). De forma más específica, la UNISDR (2005, en Palekiene, 2015) precisa que en la GIR el concepto de resiliencia refiere a la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad potencialmente expuesta a peligros para adaptarse, resistiéndose o cambiando para alcanzar y mantener un nivel aceptable de funcionamiento y estructura; en resumen, si la sociedad puede extender su resiliencia, entonces tendrá mejores condiciones de resistir la adversidad y recuperarse en caso desastre (Cutter *et al.*, 2010). Como se puede observar el concepto involucra premisas en cuanto al riesgo y la vulnerabilidad en distintos grados, esto, determinado por características internas, ambientales y estratégicas que pueden favorecer o dificultar la respuestas de recuperación positivas, lo que exige tomar decisiones y emprender acciones por medio de un enfoque que integre modelos dinámicos más que unidireccionales (Méndez, 2012), por lo tanto, la resiliencia se exalta como cualidad referente al nivel de las capacidades de la comunidad para anticiparse o adaptarse al peligro, por lo que se puede considerar un aporte al estudio de los desastres y su gestión.

En cuanto al concepto de resiliencia urbana, Méndez (2012) menciona uno de los primeros trabajos relevantes: el de Polése, 2010, en el que vincula a dos tipos de resiliencia desde la perspectiva de los estudios urbanos. Por una parte, la que denomina como Resiliencia-A, que se entiende como la capacidad de sobrevivir a diferentes tipos de desastres coyunturales, acaecidos en determinados momentos, ya sean de origen natural (sismos, tsunamis, ciclones, inundaciones) o humano (bombardeos masivos, ataques terroristas) y la Resiliencia-B, entendida como la capacidad de determinadas ciudades para resistir a crisis sistémicas de origen externo, pero reforzadas por ciertas debilidades locales, causantes de un proceso de declive a largo plazo que pone

en cuestión su funcionalidad anterior, consiguiendo una transformación interna que permite su adaptación positiva al contexto imperante en la nueva etapa.

De acuerdo con esto la resiliencia urbana se muestra desde dos vertientes la primera relacionada con la resistencia y la segunda con la capacidad de adaptabilidad y continuidad de funcionamiento de los sistemas urbanos; aspectos que sin lugar a duda dependerán de las tensiones internas vinculados a procesos, sociales, políticos y económicos.

En este sentido el estudio de resiliencia urbana se centra en cuestiones que identifican y operativizan indicadores adecuados, capaces de reflejar con eficacia la recuperación de las dimensiones materiales como las claves internas que exponen las desigualdades en la capacidad de adaptación; (ONU-HABITAT, 2016) la resiliencia adopta un enfoque frente a amenazas múltiples considerando la capacidad de recuperación frente a todo tipo de peligros plausibles, así como en orientar esfuerzos que apoyen la reducción de riesgos, a partir de incidir en los tipos de vulnerabilidad física, social e institucional; por lo que las estrategias se conciben de forma integral y pone en el centro de sus acciones a la ciudadanía, y sumen las capacidades del gobierno, sector privado y sociedad civil en torno a propósitos compartidos.

ONU-Hábitat promueve un nuevo enfoque para implementar ciudades resilientes: el Programa de Perfiles de Ciudades Resilientes (*City Resilience Profiling Programme*, CRPP, por sus siglas en inglés) promulgada por de las Naciones Unidas (ONU), para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR)[1], una guía que provee a gobiernos nacionales y locales de herramientas necesarias para medir y aumentar la resiliencia frente al impacto de múltiples amenazas. El CRPP desarrolla un enfoque de planificación y gestión urbana amplio e integrado para elaborar perfiles y acompañar la resiliencia de una ciudad frente a los posibles peligros, con lo cual el desarrollo de indicadores será el reto principal (Yamagata y Sharifi, 2018).

El programa tiene objetivos basados en la postura de la GIRD, la cual desarrollan la idea, de que el desastre es simplemente la concreción de un riesgo, en la cual el evento físico sirve únicamente de detonador, pero no es la causa única que le da origen, si no que las razones se deben a consideraciones más profundas que tienen su raíz en las estructuras sociales, políticas y económicas de las comunidades (Lavell, 2003). En este sentido, se plantea la premisa de entender a las comunidades, como sistemas complejos con exigencias relacionadas a una fuerte demanda de ocupación de tierra, la

1 El Marco de Acción de Hyogo fue creado para impulsar los esfuerzos mundiales predecesores, contenidos en El Marco Internacional de Acción del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (1989); la Estrategia de Yokohama para un Mundo Más Seguro: Directrices para la prevención de los desastres, la preparación para casos de desastre y la mitigación de sus efectos (1994) y la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres (1999), entre otros.

cual imprime cierto deterioro físico y social que puede derivar en profundas transformaciones del espacio (Carrillo F., 2005), así como oportunidades de acción enfocadas en planeación urbana y ordenamiento territorial.

En concordancia a los objetivos de la GIR en cuanto a la Reducción de Riesgo de Desastre, en la visión de las ciudades como sistemas complejos, en México se da una reforma a la Ley General de Protección Civil (LGPC) publicada en el Diario Oficial de la Federación el 12 de junio de 2012, la cual contempla en sus líneas de acción la elaboración de perfiles de resiliencia urbana, con orientación a reducir y mitigar los efectos de los fenómenos perturbadores y contribuir al crecimiento ordenado de los asentamientos humanos, y a la realización de acciones de prevención y mitigación de riesgos de desastres (SEDATU, 2016). Dentro de este documento se define a la resiliencia como:

> *"La Capacidad de un sistema, comunidad o sociedad, potencialmente expuesta a un peligro para resistir, asimilar, adaptarse y recuperarse de sus efectos a un corto plazo y de manera eficiente, a través de la preservación y restauración de sus estructuras básicas y funcionales, logrando una mejor protección futura y mejorando las medidas de reducción de riesgos" (LGPC, 2012).*

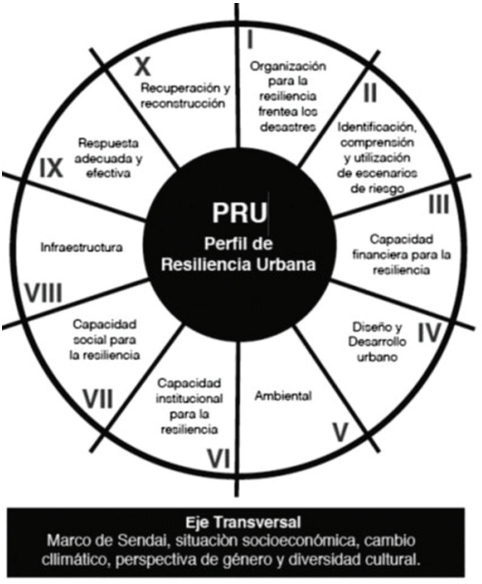
Para 2015, el planteamiento de resiliencia en el país se materializa en la agenda 2015-2030 en el marco de SENDAI firmado por México donde se suma a la "Reducción del Riesgo de Desastres" como acuerdos de política en la Gestión Integral del Riesgo adoptada por los países miembros de la Organización de las Naciones Unidas. A partir de esto, se consuma la postura en el marco jurídico, con la enmienda de la construcción del perfil de resiliencia urbana como un instrumento operativo, con el objetivo de "*conocer la capacidad de resistencia, adaptación, absorción y recuperación de una ciudad ante el impacto de algún proceso natural que implique amenaza o riesgos de desastre*". Con base en esto, en 2016 se estableció el perfil de resiliencia urbana mediante una guía metodológica para la valoración del índice.

Métodos y técnicas

El perfil se enfoca en la construcción de un índice de resiliencia urbana, elaborado a partir de evaluar 10 aspectos esenciales y uno transversal (Figura 1), tales como: organización para la resiliencia frente a los desastres; identificación, comprensión y uso de escenarios de riesgo; diseño y desarrollo urbano, ambiental; capacidad institucional y capacidad financiera, por mencionar algunos. La base metodológica fue tomada de la propuesta por las Naciones Unidas para la Reducción de Riesgos de Desastre (UNISDR) y complementada con indicadores adicionales adaptados al contexto nacional. Estos aspectos permiten conocer la dinámica de factores clave que contribuyen a la estimación de resultados que inciden directamente en el nivel de resiliencia de las ciudades. Con estas acciones, el país intenta transitar a una política de

prevención, desde el conocimiento de las amenazas, la disminución de riesgos y la reducción de vulnerabilidades.

Figura 1. Ejes para la construcción del perfil de resiliencia urbana



Fuente: Guía de Resiliencia Urbana, 2016.

A partir de la técnica de los 10 esenciales se integraron indicadores y subindicadores, que surgen de un trabajo de investigación amplio y riguroso, en el cual se analizaron diversas metodologías vigentes, como la de la Fundación Rockefeller (*Rockefeller Fundation*, 2016), el CENAPRED (García, Norlang *et al*., 2015), el Colegio de México, A. C., la del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2011) y otras (Cardona, 2013). La estructura final concluyo en 11 ejes principales y uno transversal. Los ejes se evalúan por indicadores de primer, segundo y tercer orden. En el Cuadro 1 se muestra los ejes y los indicadores y subindicadores.

Los factores relevantes del sistema varían con la escala, pero sobre todo porque los universos de trabajo tienen incidencia diferenciada a distintos niveles de acción y sus planes de acción son disímiles. Los indicadores en general permiten crear una "línea de base" sobre la que se harán comparaciones relativas, mediciones de procesos o cambios en el tiempo de cada una de las ciudades.

El diseño metodológico para la medición del índice se obtuvo a partir de la elaboración de un modelo conceptual por fases de operación (Figura 2), el

Cuadro 1
Ejes e indicadores

Eje	Indicador	Subindicadores
I.- Organización para la resiliencia frente a los desastres	I.1 La GIR es un tema clave en el Plan Municipal de Desarrollo vigente, I.2) Se realizan gestiones de colaboración con organismos internacionales/nacionales para fortalecer la GIR y resiliencia; I.3) Existen mecanismos funcionales para identificar el riesgo, priorizar los recursos de inversión para una gestión efectiva de los riesgos; I.4) Existe un marco normativo sólido en GIRD y en aumentar resiliencia.	7 indicadores de nivel 2 y 7 de nivel 3, que se definen en temas de participación y consulta de múltiples actores; colaboración de proyectos y apoyo a nivel internacional o nacional para fortalecer la GIR y resiliencia; existen acciones de planeación para mantener la continuidad y gobernanza en caso de desastre; y si las inversiones municipales toman lo suficiente en cuenta el análisis de riesgos y se logran reducir los mayores riesgos; si, tomadores de decisiones consultan el Atlas o evaluación de Riesgos para realizar sus labores. . Identificación, comprensión y utilización de escenarios de riesgo.
II.- Identificación, comprensión y utilización de escenarios de riesgo	II.1 Un análisis técnico de los peligros y/o riesgos para identificar la exposición y la vulnerabilidad, II.2 Una plataforma de información de riesgos actualizada periódicamente que permite a los actores y a la población acceder e intercambiar información relacionada con el riesgo.	Profundiza sobre otros instrumentos y se cuantifica su calidad, difusión, acceso a la información y vinculación con el desarrollo urbano del municipio.
III.- Capacidad financiera	III.1 El municipio cuenta con un plan (o procedimientos), financieros(s) adecuado y recursos disponibles para fortalecer la GIRD y resiliencia, incluida la adaptación climática a largo plazo, III.2 El municipio cuenta con un presupuesto específico y los arreglos para atender contingencias y la prevención gestión y prevención del riesgo de desastres a nivel local (mitigación prevención respuesta y recuperación), III.3 Existen medios para garantizar un apoyo financiero adecuado a la protección de los sectores vulnerables de la población del municipio.	/ indicadores de segundo nivel y 10 de tercero, constituidos por temas específicos de medidas operativas para garantizar las actividades de la GIR y resiliencia, como, por ejemplo: conocimiento y disponibilidad de fondos en el rubro, recursos propios, seguros en transferencia de riesgos, etc.
IV.- Diseño y desarrollo urbano	IV.1 El programa Municipal de Desarrollo Urbano y de Ordenamiento Territorial está vigente, lo ejecutan e integran la información de riesgo actualizada, IV.2 Existe un mecanismo/proceso para implementar una planificación urbana y ordenamiento territorial, integrando el enfoque de riesgos y se hace de manera participativa, IV.3 El municipio desarrolla, actualiza y aplica el uso de códigos y normas de construcción e inversión, de acuerdo con el marco legal, la información de riesgos y posibles impactos pertinentes del cambio climático.	5 de nivel 2 y 7 del nivel tres que se enfocan en cuestiones particulares en cuanto a: si el Pian o el Programa Municipal de desarrollo incorpora medidas de protección y restauración de los ecosistemas, si existen servicios ambientales que contribuyan a la mitigación y reducción de riesgos, si se cuenta con indicadores que midan la vulnerabilidad ambiental y si estos se integran en los planes y programas municipales (PPM), si existen mecanismos legales y normativos para preservación y restauración de la tierra para aumentar su productividad y biodiversidad, y si existe un plan de manejo de la basura bajo un esquema normativo.
V.- Ambiental	V.1 Existen soluciones para tratar los riesgos ambientales actuales y futuros. Por ejemplo, infraestructura verde y azul (soluciones basadas en la naturaleza o en la protección de los ecosistemas), V.2 El municipio protege y restaura los ecosistemas en la medida en que ofrecen la suficiente adaptación y mitigación de los riesgos actuales y futuros.	En este eje se evalúan la forma de protección de los ecosistemas y zonas de amortiguamiento, así como la forma de adaptación a los efectos producidos por el cambio climático.
VI.- Capacidad institucional para la resiliencia.	VI.1 Se cuenta con la normatividad en gestión de riesgos de desastres y resiliencia, VI.2 El municipio ha establecido procedimientos que permiten fortalecer las capacidades de los actores que participan en los temas de gestión de riesgos y resiliencia frente a los desastres, VI.3 El municipio controla el riesgo y se han establecido procedimientos de transparencia, de información y comunicación vinculados con la GIRD y resiliencia, VI.4 El municipio utiliza la capacidad del sector privado, la sociedad civil y de academia para la protección civil, GIRD, cambio climático y resiliencia.	8 indicadores de nivel 2 y 8 de nivel 3; las variables de estos se encaminan en aspectos de si el municipio donde se localiza la ciudad cuenta con normatividad/leyes de protección civil, gestión de riesgos de desastres actualizados y armonizados con las leyes estatales, si el municipio tiene identificado, prohibido y controlado por ley o por reglamento, la construcción en zonas de riesgo (identificadas en el Atlas de Riesgos) y aplica una herramienta de análisis o dictamen de riesgos para evaluar las nuevas invasiones.
VII.- Capacidad social para la resiliencia	VII.1 El municipio proporciona apoyo social a los sectores más vulnerables de la ciudad, aumentando así su capacidad y reduciendo su vulnerabilidad frente a desastres, VII.2 Se entiende que hay cohesión y tejido social en el Municipio.	5 indicadores de nivel 2 y 6 de nivel 3, relacionados con si se tienen suficientes programas, enfocados al apoyo social de la población más vulnerable, si existe una red de colaboración y participación en la gestión de riesgos y la construcción de resiliencia frente a los temas de desastres, si la población en general está al corriente de las amenazas y riesgos de cómo prevenir y preparase y actuar en caso de emergencia, si la gestión de riesgo de desastre, cambio climático y/o resiliencia está incluida en los planes de estudio y en los cursos comunitarios de formación y capacitación, y si la GIR, Cambio Climático y resiliencia es un tema importante en el sector privado, sociedad civil, sector académico y si la municipalidad promueve el tema.

VIII.- Infraestructura	VIII.1 El municipio pone en práctica un plan o estrategia de resguardo y protección de infraestructura y servicios críticos para garantizar la continuidad de las operaciones, VIII.2 El municipio cuenta con infraestructura de protección/mitigación de riesgos, acorde a las necesidades y recibe el mantenimiento adecuado, VIII.3 Se han implementado obras y acciones para proteger la infraestructura crítica, reducir el riesgo y aumentar la resiliencia.	4 indicadores de nivel 2 y 7 indicadores de nivel 3 que se insertan en tópicos referentes a si la infraestructura y equipamiento municipal se encuentra en zonas de bajo riesgo, si el municipio garantiza los procesos para mantener la infraestructura, equipamiento, y servicios críticos en operación ante un fenómeno perturbador, si cuenta el gobierno local con una normatividad que permita el monitoreo, mantenimiento y actualización de la infraestructura de drenaje considerando escenarios provocados por el cambio climático, y si el municipio ha establecido programas y obras de mitigación y protección de infraestructura.
IX.- Respuesta adecuada y efectiva	IX.1 Planeación de gestión de desastres/preparación frente a desastres/emergencia que describe las medidas de mitigación preparación y respuesta a las emergencias locales, IX.2 Adaptación para continuar con las funciones críticas incluso en una situación de emergencia, IX.3 Implementación de alerta temprana.	4 indicadores de segundo y 10 de tercer nivel, basados en temas correspondientes a si el plan contiene la estrategia, organización y estructura municipal, así como la definición de funciones y responsabilidades; la disponibilidad de recursos y capacidad suficiente de preparación y respuesta en caso de desastre o emergencia; si cuenta con sistemas de alerta temprana con acceso a información sobre todas las amenazas relevantes y están completos; si existen y se utilizan recursos y herramientas adecuadas para la difusión de las alertas a través de diversos medios (redes sociales, radio, SMS, sirenas, etc.); si la capacitación en temas de preparación y respuesta.
X.-Reconstrucción y recuperación	X.1 El municipio cuenta con una estrategia proceso o plan para la reconstrucción y recuperación después de un desastre, tanto en términos económicos como sociales.	3 indicadores de nivel dos y 6 indicadores de tercer nivel, relacionados con si el municipio tiene una estrategia y/o un plan y cuenta con la organización, definición de funciones y responsabilidades para la reconstrucción y recuperación adecuadas; si se cuenta con recursos financieros para la reconstrucción y recuperación post desastre; y si En caso de un desastre, existe una estrategia o procedimiento para usar el esquema de Evaluación de Daños y Análisis de Necesidades (EDAN) para la reconstrucción y recuperación.
Eje XI Transversal	XI. 1 Situación socioeconómica de la ciudad, cambio climático, perspectiva de género y diversidad y cultura.	4 indicadores de primer nivel, 1) Afectación y vulnerabilidad del municipio frente a los desastres, alineado al marco de SENDAI; 2) las acciones que realiza el municipio en materia GIRD y resiliencia toman en cuenta los objetivos del Marco de Sendai; 3) vulnerabilidad vinculada con temas transversales y el nivel de desarrollo que incidan en el nivel de resiliencia del municipio? (género, nivel educativo, etc.; y 4) se toma en consideración el cambio climático en los diversos programas del municipio.

Fuente: elaboración propia con base en la ONU – HABITAT SEDATU, 2016.

esquema comprende el cálculo del perfil para sistemas sociales definidos como Unidades Territoriales Resilientes (UTR) y consta de cuatro fases principales.

Fase I

En la fase 1 se proponen dos acciones específicas para aplicar:

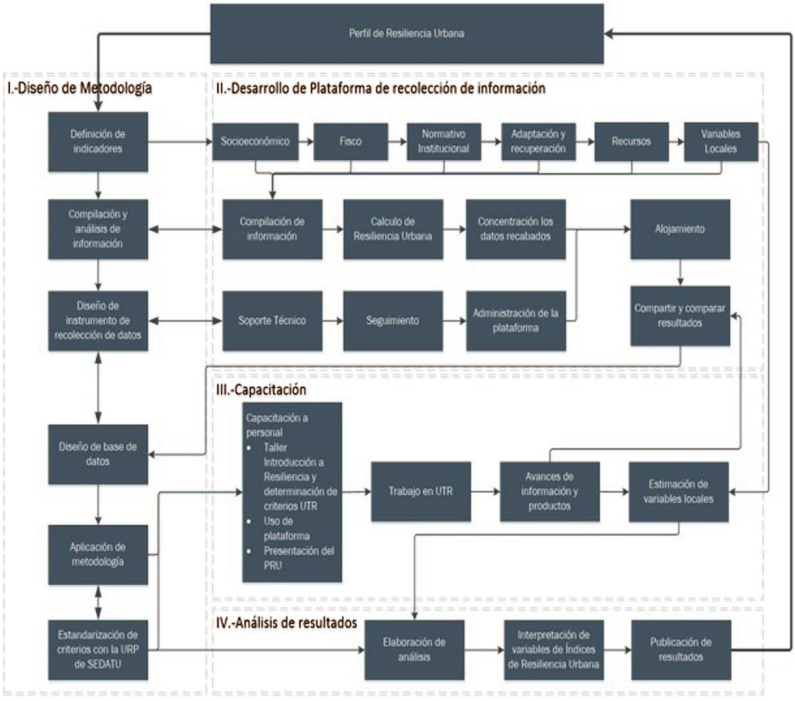
1.1 Definición de indicadores

1.1.1 Se realiza la investigación documental de los protocolos internacionales y nacionales sobre resiliencia en términos de la Gestión Integral del Riesgo, el Ordenamiento Territorial y la Planeación Urbana.

1.1.2. Se define una serie de indicadores con respecto a 11 ejes fundamentales en el que se incluye información referente al estado socioeconómico (educación, marginación, pobreza, etc.), al físico (conocimiento y evaluación de riesgos, características geográficas), el normativo-institucional (reglamentos de construcción, planes de desarrollo municipal, etc.), el de adaptación y recuperación (Sistemas de Alerta Temprana, capacidad de respuesta, transferencia de riesgos, etc.), el de recursos (Humanos, Materiales y Financieros) y uno de variables

locales específicas que abarcará aquellas características puntuales de cada ciudad que, derivado de su vocación, organización social, cultural o usos y costumbres, pudieran incidir positiva o negativamente en el nivel de resiliencia de la ciudad. Así como cuestiones relacionadas con el Cambio climático, género y etnias.

Figura 2. Diagrama del diseño metodológico



Fuente: elaboración propia.

1.2. Compilación y análisis de información.

1.2.1. Una vez definidas las variables se recopiló la información estadística y cartográfica de cada variable por medio de la consulta de diversas fuentes como INEGI, CONAPO, CENAPRED, SEDATU, SEGOB y dependencias estatales y municipales.

1.2.2. Diseño de instrumento de recolección de datos, a partir de estructurar un cuestionario como herramienta de levantamiento de información que se aplicará únicamente a actores específicos (autoridades, cronistas de la ciudad, líderes o agrupaciones sociales, etc.) para poder cuantificarlas e incluirlas en el cálculo del PRU.

1.2.3. Diseño de base de datos. Con el fin de ordenar, jerarquizar y agrupar las variables en los 11 ejes, se propone el diseño de una base de datos que permita la ágil consulta de la información a nivel de municipio, AGEB y de ser posible por Unidad Territorial Resilientes.

1.2.3.1. Definición del procesamiento estadístico de los indicadores por un modelo de en el que se empleó estadística descriptiva, aplicando las fórmulas siguientes:

$$\boldsymbol{ISN} = (\boldsymbol{ia} * \boldsymbol{pa}) + (\boldsymbol{ib} * \boldsymbol{pb}) \ldots (\boldsymbol{in} * \boldsymbol{pn})$$

Donde:

ISN= Valor del Indicador de segundo nivel

ia, b…n = Valor de la respuesta del indicador de tercer nivel

pa, b…n= Ponderación asignada al indicador de tercer nivel

Tomando el valor de las respuestas se realiza el producto del exponente que da el valor del resultado del indicador a partir de despejar las variables de la fórmula:

$$ISN = (1 * 0.40) + (0.50 * 0.40) + (0.50 * 0.20)$$

o

$$ISN = 0.4 + 0.2 + 0.1 = 0.700$$

En el que el resultado se interpreta de la siguiente forma: para el indicador dos (¿Se ha establecido programas y obras de mitigación y protección de infraestructura?) el nivel de resiliencia sería de 0.700.

Para el cálculo del Perfil de resiliencia:

$$\text{PRU: } \frac{\sum_{l=1}^{N} E_l}{N}$$

Donde:

PRU = Indicador del Perfil de Resiliencia Urbana,

E_l = Valor del índice obtenido para cada uno de los diez ejes esenciales y uno para el eje transversal,

N = 11 igual al número de ejes evaluados.

En segundo lugar, toca describir la expresión para evaluar el índice de cada uno de los once ejes evaluados:

$$E_l = Pdr_{11} \cdot Pdr_{12} \cdot \sum_{k=1}^{n} 0.0183 \cdot e^{x_k} + \cdots + Pdr_{11} \cdot Pdr_{1j} \cdot \sum_{k=1}^{m} 0.0183 \cdot e^{x_k} + \cdots + Pdr_{i1} \cdot Pdr_{i2} \cdot \sum_{k=1}^{n} 0.0183 \cdot e^{x_k} + \cdots + Pdr_{i1} \cdot Pdr_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{m} 0.0183 \cdot e^{x_k}$$

Donde:

E_l = Indicador (l) del Perfil de Resiliencia Urbana, en donde l va de uno a once,

Pdr_{ij} = Ponderador asignado para la i–ésima categoría de Nivel 1, con la j–ésima categoría de Nivel 2,

x_k = Valor obtenido como respuesta a la k–ésima categoría de Nivel 3 para cada categoría i, j,

n, m = Valores máximos que toman en cada una de las categorías en los niveles 1 y 2 respectivamente.

Valor escalar (de 0 a 1) de cada indicador, se utiliza una fórmula para los indicadores cualitativos, a los cuales se le asigna un valor en una escala que va de Muy bajo a Muy alto en función de las listas de verificación, y una fórmula para los indicadores cuantitativos, obtenidos en los cuestionarios a los municipales.

Para el cálculo del eje se utiliza la siguiente fórmula:

$$Eje_j = \sum_{i=1}^{n} valor\ esclar_i$$

Donde:

n: es el número de indicadores por eje.

t: el valor observado de cumplimiento del indicador.

Los resultados se fijaron en un nivel de resiliencia por intervalos pasando de valores cuantitativos a una escala o rangos de carácter cualitativo (Cuadro 2).

Fase II Desarrollo de plataforma para levantamiento de información

2.1 Plataforma de administración de formularios.

Cuadro 2
Intervalos de valores cuantitativos-cualitativos

Intervalo de valores	Nivel de resiliencia
0.841 - 1.000	Muy alta
0.681 - 0.840	Alta
0.521 - 0.680	Media
0.361 - 0.520	Baja
0.000 - 0.360	Muy baja

Fuente: elaboración propia.

2.1.1 Sistema WEB que permita recabar, consultar, actualizar y consolidar datos, el módulo posibilita la inclusión de nueva información, borrar, modificar y consultar, así como la posibilidad de adjuntar archivos.

2.1.2 Asignación de usuarios. Se proponen tres niveles: 1) usuario estándar para consulta, 2) súper usuario para administración del sistema en cuanto

a información, eliminar, actualizar la información y deberá generar reportes estadísticos, y 3) Usuario administrador para consultar toda la información y generar reportes estadísticos.

2.2 Portal WEB

2.2.1 Portal web. Plataforma de publicación de consulta. Permitir la visualización del informe estadístico, además se debe llevar un histórico que permita comparar las gráficas entre municipios para consultar y presentar información mediante arreglos tabulares de datos con posibilidad de definir columnas y renglones a desplegar con sus respectivas gráficas.

Fase III Capacitación

3.1 Taller introductorio. Curso de capacitación dirigido a elementos municipales relacionados en temas de Riegos de Desastre, Ordenamiento Territorial, y Resiliencia; descripción y explicación del contenido en cuanto a los ejes y los indicadores que integran el PRU, presentación del instrumento de levantamiento de información, modo de uso y evaluación.

3.2 Taller de avances y uso de plataforma. Criterios para alimentar la plataforma a través del sistema de compilación de información, ponderación de indicadores por medio de la herramienta de levantamiento de información.

Fase IV Análisis de resultados

4.1 Revisión. Con los encargados de área revisar cada uno de los resultados por eje, redactar informe con un formato específico para lograr comparativos entre unidades territoriales, y por último publicación del informe final. Los elementos resultantes de la propuesta del PRU se enfocan en la obtención de un modelo simplificado que percibe a la ciudad como un sistema complejo, en el que se integran las dimensiones espaciales, organizacionales, físicas y funcionales, contrapuestas a amenazas probables, para determina el comportamiento de cada una de estas. En el Cuadro 3 se muestra las dimensiones y sus competencias.

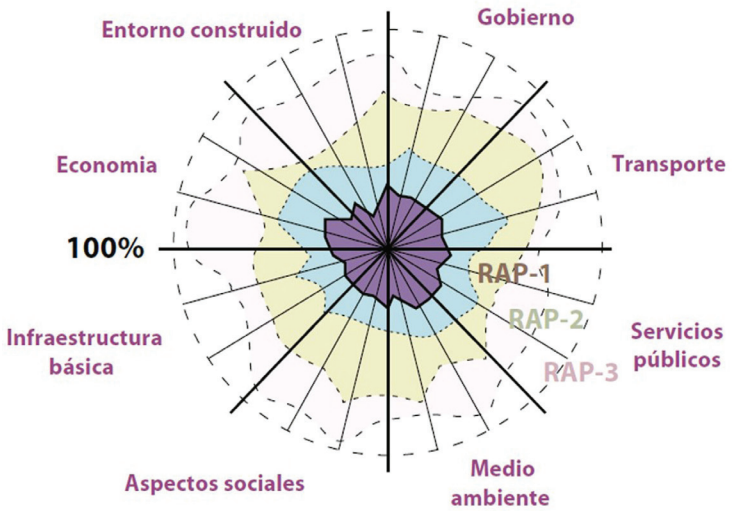
En cuanto a la medición se consideró a los indicadores antes mencionados como la base para establecer la reacción de la ciudad en términos de respuesta ante un impacto por algún fenómeno natural que represente amenaza, lo que permite verificar cuales son los factores más alejados de los niveles de resiliencia (Figura 3).

Cuadro 3
Dimensiones espaciales

Dimensión	Competencia	Observaciones
Espacial	Configuración del territorio, definición geográfica y administrativa	La representación del territorio permite detectar conflictos y oportunidades a nivel físico y organizacional Se liga a procesos de distancia, coincidencia e influencia entre territorios.
Organizativa	Elementos que participan o deberían participar de forma activa y organizada en la instrumentación de iniciativas, proyectos y acciones: gobierno local hasta el nacional, así como los distintos agentes supralocales –como los gobiernos estatales y las áreas metropolitanas– y sublocales –como barrios y distritos.	Su función es generar estrategias de coordinación para quienes ostentan la jurisdicción en determinados ámbitos y para los afectados por cada proceso
Física y funcional	La forma física de la ciudad atiende a condiciones como la infraestructura construida o la presencia física de servicios. La funcionalidad está determinada por la continuidad del servicio e incluye la sobredemanda que pueda generarse en el impacto probable de un fenómeno.	La dimensión física y funcional se complementa, condicionan recíprocamente y se evalúan de forma conjunta, aunque respondan a criterios diferentes.
El tiempo	Se refiere a la actualización de información que permita evaluar el perfil de forma continua.	Variable dinámica en el tiempo a partir de una base de datos.

Fuente: elaboración propia con base en SEDATU, 2016.

Figura 3. Perfil de Resiliencia urbana



Fuente: tomado de SEDATU, 2016.

En resumen, el PRU se plantea como un diagnóstico que muestra el estado de una ciudad en un momento específico y constituye una base a partir de la cual se podrán tomar decisiones en función a las deficiencias y capacidades en términos de resiliencia para definir líneas de acción. Los resultados evidencian que la métrica propuesta garantiza una buena aproximación lineal de la resiliencia de los sistemas, lo que permite una medición ajustada a la realidad a nivel local sobre resiliencia y reforzar planes comunitarios.

Conclusiones

Dentro de los descubrimientos del estudio se destaca la definición de los escenarios de resiliencia de un sistema antes de la ocurrencia de un evento disruptivo, lo que permite entender las maneras de reacción ante un evento de amenaza de riesgo de desastre, dependiendo del contexto evaluado y el factor de referencia (variables sociales, económicas, urbanas y físicas).

Los aspectos incluidos en el PRU permiten conocer la dinámica de factores clave que contribuirán en la estimación de resultados que inciden directamente en el nivel de resiliencia. El PRU funge como una herramienta para el diagnóstico inicial en el que se analizan avances, logros y áreas de oportunidad en la planeación urbana y ordenamiento territorial, desde la prevención.

En cuanto a la medición el trabajo propone una métrica de resiliencia que tiene la capacidad de adaptarse fácilmente a las condiciones de cada uno de los escenarios de variación definidos por el tomador de decisiones. La identificación del nivel de resiliencia de un sistema es fundamental para la toma de decisiones en la prevención y planeación de estrategias de recuperación ante fallas que lo puedan afectar.

El PRU representa un esfuerzo para trabajar en reducir los riesgos y fortalecer la resiliencia urbana de los municipios y de su población en situación de vulnerabilidad; sin embargo, es importante es aplicar, retroalimentar y perfeccionarlo, vinculándose de una manera estrecha con el desarrollo territorial y Urbano.

En suma, el diseño de los indicadores incluyó variables que permiten obtener una línea de base sobre la vulnerabilidad y el nivel de desarrollo de la ciudad vis a vis la GIRD y el marco normativo existente, por lo que la aplicación e implementación de este instrumento permitirá al municipio visualizar y tomar conciencia de sus principales vulnerabilidades, con miras a la implementación de un Plan de Acción para fortalecer sus capacidades, así como la toma de decisiones sobre el desarrollo resiliente de la ciudad, que contribuya a reducir los riesgos ante posibles desastres y/o adoptar medidas preventivas que permitan reforzar la resiliencia y el desarrollo sostenible de su entorno.

Bibliografía

Carrillo F., 2005. *Knowledge Cities: Approaches, Experiences, and Perspectives*. Knowledge City, seen as a Collage of Human Knowledge Moments, Ron Dvir.

Cutter, S. L., Ch. G. Burton y Ch. T. Emrich (2010). "Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions", *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 7(1), article 51, pp. 1- 22.

Davoudi S 2012. "Resilience: A bridging concept or a dead end? Planning Theory and Practice" 13(2): 299–307. Department for International Development (DFID) (2011) Defining disaster resilience: A DFID approach paper. London: DFID.

Holling, CS, 1973. "Resilience and Stability of Ecological Systems", Annual Review of Ecology and Systematics, vol. 4, pp. 1–23.

Klein, R., Nicholls, R., & Thomalla, F. (2004). "Resilience to natural hazards: How useful is this concept?" *Environmental Hazards*, 5, 35–45.

Kruse, S; Abeling, T; Deeming, H; Fordham, M; Forrester, J; Jülich, S; Karanci, AN; Schneiderbauer, S; view all Kruse, S; Abeling, T; Deeming, H; Fordham, M; Forrester, J; Jülich, S; Karanci, AN; Kuhlicke, C; Pelling, M; Pedoth, L; Schneiderbauer, S; view fewer, 2017. "Conceptualizing community resilience to natural hazards – the embrace framework". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17 (12) pp. 2321-2333.

Lavell, A., 2003. *La gestión local del riesgo. Nociones y precisiones en torno al concepto y la práctica.* CEPREDENAC-PNUD.

H. Congreso de la Unión, 2000 y 2012. *Ley General de Protección Civil,* Estados Unidos Mexicanos: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Diario Oficial de la Federación.

Macías, J. M., 2015. "Crítica a la noción de resiliencia en el campo de estudios de desastres". *Revista Venezolana de Geografía*, Universidad de Los Andes, Vol. 56 (2).

Martin R, 2010. "Roepke lecture in economic geography – Rethinking regional path dependence: Beyond lock-in to evolution". *Economic Geography* 86: 1–27.

Méndez, R. 2012. Ciudades y metáforas. Sobre el concepto de resiliencia urbana. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, vol. XLIV, no. 172, p. 215-231.

Norris, F. H; S. P. Stevens; B. Pfefferbaum; K. F. Wyche; R. Pfefferbaum, 2008. "Community Resilience as a Metaphor, Theory, Set of Capacities and Strategy for Disaster Readiness", *Am J. Community Pshycol*, 41: 127-150.

ONU-Habitat, 2016. *Declaración de Toluca para Habitat III América Latina y El Caribe*. Toluca Estado de México, abril de 2016.

Palekiene, O., Simanaviciene, Z. & Bruneckiene, J., 2015. "The Application of Resilience Concept in the Regional Development Context". *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 213, 179-184.

Pendall, R, Foster, KA & Cowell, M, 2007. 'Resilience and Regions: Building Understanding of the Metaphor', *Institute of Urban and Regional Development Working Paper 2007-12*. Disponible en: www.escholarship.org/uc/item/4jm157sh. Consultado el 23 octubre de 2014.

SEDATU-ONU HABITAT., 2016. "Las dimensiones de la resiliencia: Modelo del sistema urbano". En *Guía de Resiliencia Urbana 2016* (pág. 36). México.

Tóth Balázs István, 2015. "Regional economic resilience: concepts, empirics and a critical review", *Miscellanea Geographica. Regional Studies on Development, Scien-do*, vol. 19(3), pages 70-75, September.

Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A., 2004. "Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems". *Ecology and Society*, 9(2).

Yamagata, Y. y A. Sharifi (2018). *Resilience oriented urban planning: theorical and empirical insights*. Suiza: Springer,

1.3. Indicadores de vulnerabilidad en la valoración de niveles de riesgo ante peligro volcánico asociado al Volcán de Fuego de Colima

Frances Rodríguez Van Gort

Colegio de Geografía
Facultad de Filosofía y Letras
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

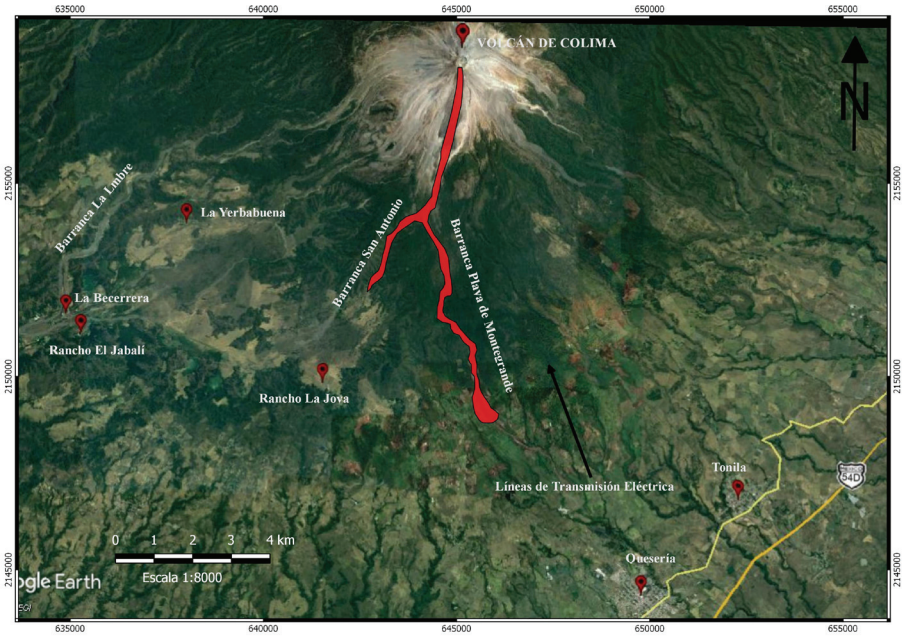
El Volcán de Fuego de Colima que se ubica entre las entidades de Colima y Jalisco, es uno de los más peligrosos de México debido a su intensa actividad y al carácter explosivo de esta. Registró una fuerte erupción en 1913; en 1997 su actividad se intensificó, lo que generó que en 1999 la localidad de la Yerbabuena, ubicada dentro de un perímetro de 5 kilómetros, fuera reubicada hacia el sur del cráter (Cuevas y Seefoo 2005). En los últimos años se ha intensificado su actividad, aumentando el riesgo de las comunidades aledañas.

Entre 2007 y 2011 se presentaron una serie de explosiones, que formaron un cráter de poco tamaño, y en 2013 el volcán presentó actividad después de casi año y medio (Zobin et al., 2015, en Reyes-Dávila et al., 2016). El 10 de julio se dio un colapso parcial del domo, generando una corriente piroclástica que alcanzó los 9.1 kilómetros hacia el sur, fundamentalmente por las barrancas de Montegrande y San Antonio. Al día siguiente se produjo un segundo colapso que generó una corriente que pasó los 10.3 kilómetros en la misma dirección (Figura 1).

Este volcán es uno de los más activos de México, presentando casi 30 erupciones significativas en los últimos 500 años. Varios investigadores coinciden en que su actividad de mayor peligrosidad puede ser identificada en ciclos de aproximadamente 100 años (Reyes-Dávila et al., 2016), por lo que es importante mantener el volcán monitoreado y desarrollar métodos de predicción, los cuales permitirían una gestión más eficiente del riesgo.

Figura 1. Mapa de flujos piroclásticos ocurridos en julio de 2015

Fuente: modificado de Reyes-Dávila *et al.*, (2016).



Ante este escenario se ha establecido un plan de contingencias de atención en caso de un evento eruptivo de gran magnitud. Dicho plan se opera principalmente desde el estado de Colima; de hecho, la Universidad de Colima es la encargada del monitoreo del volcán; contempla como prioritarias a las comunidades que se ubican en el radio de los 12 kilómetros de distancia del cráter, por lo que las comunidades fuera de esta distancia, tales como Quesería, en el estado de Colima, situado a 14 kilómetros de distancia del cráter, o Tonila en el estado de Jalisco, a 13 kilómetros de distancia, no están contempladas como prioritarias a pesar del alto nivel de peligro volcánico en el que se encuentran. Cabe señalar que estas dos localidades son cabeceras municipales y que cuentan con poca atención, a pesar de que en julio de 2015 la actividad aumentó considerablemente, lo que provocó que dos de las barrancas que provienen del volcán terreno abajo, fueran rellenadas hasta los 9 y 10 kilómetros, llegando cerca de 4 kilómetros de distancia de la localidad de Quesería.

Esta situación presenta una mayor exposición al peligro de la comunidad, por lo que establecer indicadores de vulnerabilidad y con ello identificar niveles de riesgo para cada comunidad resulta indispensable para el monitoreo y la evolución del riesgo volcánico. El objetivo de este trabajo es la identificación de las condiciones de

vulnerabilidad de las comunidades de Quesería en Colima y Tonila en Jalisco para establecer indicadores de vulnerabilidad y niveles de riesgo.

Construcción de indicadores de vulnerabilidad y de índices de riesgo volcánico

Los indicadores e índices son de gran utilidad en la síntesis de la información sobre cualquier tema que se desee exponer. Por su carácter multifactorial y su condición sintética representan información de gran complejidad, que lejos de pretender simplificar numéricamente permite a los tomadores de decisiones alertar sus trabajos en ciertas direcciones. Los índices expresan información sobre el estado relativo de cierto tema de interés en un valor numérico. Cuando la información a representar es de mayor complejidad se establecen los índices compuestos que se crean a partir de la agregación de subíndices. Los índices se componen de los elementos o valores particulares elegidos como fundamentales en la medición. Estos pueden ser inductivos cuando abordan el modelo de riesgo a través de la ponderación y la combinación de diversos peligros y vulnerabilidad y variables de reducción de riesgos. También deductivos, cuando se basan en el modelado de patrones históricos de riesgo materializado (Pelling 2004, Cardona 2003, Puente 2010, Petrosillo *et al.*, 2012).

En 2005 se llevó a cabo la Conferencia Mundial de las Naciones Unidas, donde se estableció un foro para la discusión y comparación metodológica de diversas entidades en el establecimiento de indicadores y de índices de riesgo de desastres, con la finalidad de coadyuvar en la reducción del riesgo de desastres y en la planificación del desarrollo. Para ello se estableció un grupo de trabajo WG3 que tuvo como objetivos fundamentales apoyar la cooperación en el análisis de riesgos globales y regionales, facilitando el intercambio de información; revisar la cobertura, la calidad y la precisión de la evaluación de desastres en los ámbitos internacional, nacional y local y apoyar el desarrollo de herramientas locales para la evaluación de vulnerabilidad y riesgo. A nivel internacional, se busca identificar la relación entre las vías nacionales de desarrollo y el riesgo de desastres a nivel nacional, identificando los puntos críticos, mapeando los sitios de mayor exposición y riesgo a escalas estatales y locales. Por otra parte, el Programa de las Américas tiene como objetivo evaluar los niveles de vulnerabilidad y desempeño en la gestión del riesgo de desastre en sus diversos países. Se pretende que cada programa contenga un marco conceptual y una metodología para garantizar la comparación entre países.

Los programas de indicadores son el resultado de trabajo interdisciplinario e intersectorial. Existen diversos generadores de indicadores. A nivel internacional, el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente / Base Global de Información de Recursos en Ginebra (PNUMA/GRID) y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD); a nivel regional se tiene el de la Universidad de Colombia y el Banco Mundial con diversos colaboradores

o el Programa de la Américas, con sede en Colombia y en colaboración con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Estos programas tienen como objetivo fundamental establecer indicadores en el análisis de riesgos y favorecer el desarrollo metodológico (Pelling 2004). A pesar de que una gran cantidad de indicadores para la reducción del riesgo de desastres suelen ser de carácter objetivo, también se encuentran los de carácter subjetivo, tales como la percepción del riesgo y el manejo de éste en niveles aceptables. Por ejemplo, para un riesgo aceptable se puede considerar desde el nivel de calidad de vida de los pobladores de un lugar, las normas que facilitan la buena gobernanza y la cohesión social de la localidad, los cuales son fundamentales para mejorar la gestión de riesgos a niveles locales. En la investigación de Petrosillo *et al.* (2012) identificaron que, para establecer un índice de calidad de vida en una isla volcánica en la región de Sicilia, en Italia, era importante considerar tanto los indicadores sociales como los naturales; proponen una combinación de estos, creando así una categoría de indicadores socioambientales.

Para evaluar el riesgo es importante tener en cuenta las características de la población que son susceptibles a ser dañadas (Maantay-Moroko 2009). Asimismo, considerar la experiencia de la población con relación a los eventos de desastres más recientes. Esta experiencia influye en la percepción de riesgo de la comunidad y como consecuencia, en su vulnerabilidad ante las amenazas de origen natural (De Vries 2007). Otros elementos que pueden ser considerados en la evaluación del riesgo son los materiales de construcción de las edificaciones y las características sociales de la población, así como la distribución espacial de las zonas expuestas a amenazas naturales (Kazmierczak y Cavan 2011).

De acuerdo con las técnicas cuantitativas, el riesgo puede ser considerado como una cantidad que puede ser estimada y expresada por relaciones matemáticas de datos de eventos reales. Las técnicas cualitativas se basan principalmente en los procesos de estimación y en la experiencia de los administradores de desastres locales. Las técnicas híbridas son complejas porque incorporan métodos cuantitativos y cualitativos que nos permiten estimar diferentes escenarios de riesgo. Sin embargo, a partir del análisis estadístico, los métodos cuantitativos presentan mayor certidumbre (65,63%) que los métodos cualitativos (27,68%) (Marhavilas *et al.,* 2011). La estimación del riesgo se hace generalmente a partir de datos históricos disponibles para aproximarse a la frecuencia esperada y la gravedad de los acontecimientos (Antonioni *et al.,* 2007). Determinar el riesgo hace posible desarrollar estrategias para las medidas preventivas y para disminuir el impacto económico y social debido a este fenómeno (Bouwer *et al.,* 2010; Ghizzoni *et al.,* 2012).

Recientemente se han establecido los llamados índices de vulnerabilidad por ámbito, es decir, se desintegra la vulnerabilidad en sus partes para un análisis más detallado. En este sentido, el Centro Internacional de Agricultura

Tropical (CIAT 2010) publicó un documento para Honduras, que incluye una metodología para el cálculo de los índices de Vulnerabilidad Ambiental, de Vulnerabilidad de Población, de Vulnerabilidad Social y el de Vulnerabilidad de Infraestructura. Cada uno de los índices se fue creando a partir del anterior y en combinación con nuevos datos base con relación al tema de análisis en cuestión. En un siguiente paso, y a partir de la combinación de los cuatro primeros índices, se creó el índice de Ponderación/Priorización. Finalmente, a partir del análisis de cada uno de los índices de vulnerabilidad y del de Ponderación/Priorización, se establecieron los municipios que presentan mayor vulnerabilidad frente a desastres asociados a fenómenos naturales.

Metodología

Las condiciones de vulnerabilidad de la población representan parte fundamental en la ecuación del riesgo y debido a la complejidad que presenta es que su estudio resulta también de gran complejidad. Así, uno de los principales retos en la valoración del riesgo resulta el logro de la estimación de una vulnerabilidad social para una población determinada (Adger 2006; Magaña 2012).

Para este trabajo se realizó una selección de indicadores básicos de vulnerabilidad que permitieran analizar las condiciones de la población ante peligro volcánico en las inmediaciones del Volcán de Fuego de Colima. En este sentido, la vulnerabilidad social se estimó considerando la vulnerabilidad estructural de las viviendas, la vulnerabilidad socioeconómica de sus habitantes, la vulnerabilidad institucional (eficiencia de las autoridades correspondientes en el manejo y gestión del riesgo) y la vulnerabilidad asociada a la percepción del riesgo que la población presenta ante el peligro volcánico.

Para ello se llevaron a cabo entrevistas en campo en las localidades de Quesería en Colima y Tonila en Jalisco. Por otra parte, se realizó un recorrido por las zonas de depositación de materiales piroclásticos del 2015.

Muestra mínima

Aplicando la fórmula (1) para el establecimiento de la muestra mínima (Mendenhall, et al., 2003), y el universo de viviendas en la zona de estudio que se determinó en 2,000 viviendas para Quesería y 700 para Tonila, se obtuvo una muestra mínima de 125 y 111 respectivamente. A continuación, se describen los elementos del cálculo de la muestra mínima:

$$n = Z^2(p+q)\ N\ /(N-1)\ E^2+Z^2(pq) \qquad (1)$$

Donde:

Z= nivel de confianza

p= variabilidad positiva

q= variabilidad negativa
N= tamaño de la población
E= margen de error
n= tamaño de la muestra

Selección de variables

Se realizó una ponderación del tipo de variables que se consideraron significativas para establecer los diferentes niveles de vulnerabilidad. Para ello se consideraron la vulnerabilidad estructural de las viviendas, la socioeconómica de sus habitantes, la institucional –organizacional y la percepción de riesgo (Cuadro 1).

Cuadro 1
Elección de variables y asignación de niveles de vulnerabilidad social de acuerdo con número de variables presentes

Tipo de vulnerabilidad	Variables	Número de variables que determinan el nivel de vulnerabilidad
Estructural	Paredes de material distinto de tabique rojo (generalmente presentan paredes de block)	Bajo: 1
	Techo de lámina	Moderado: 2
	Solo dos habitaciones de construcción como máximo	Alto: 3
Socioeconómica	Patrones culturales religiosos	Bajo: 1
	Ocupación agrícola sin tenencia de la tierra	Moderado: 2
	Comercial sin participación en sociedad o propiedad del negocio	Alto: 3
	La alimentación como principal gasto familiar	
	Caída significativa de ceniza volcánica en la vivienda	
Organizacional-institucional	Falta de un Plan de Contingencias	Bajo: 1 a 3
	Falta de organización vecinal	Moderado: 4 a 6
	Falta de Plan de Atención a animales domésticos y comunitarios	Alto: 7 a 9
	Desconocimiento del mapa de peligros	
	Incapacidad de ubicar su localidad en el mapa de peligros al mostrárselo	
	Desconocimiento de los pasos a seguir en una contingencia volcánica	
	Falta de conocimiento de las rutas de evacuación	
	Falta de conocimiento de los refugios institucionales	
Desfavorable percepción de riesgo	Negación de que la vivienda se encuentre expuesta a peligro volcánico	Bajo: 1 a 2
	Desconocimiento acerca del nivel de riesgo volcánico en que se ubica la vivienda	Moderado: 3
	Consideración irrelevante o negativa acerca de contar con un Plan de Atención para animales domésticos o comunitarios	Alto: 4 a 5
	Consideración que los desastres no se pueden evitar	
	Desconfianza en los miembros de su comunidad	
Global		Bajo: 1 a 6
		Moderado: 7 a 13
		Alto: 14 a 20

Fuente: elaboración propia a partir de la ponderación de variables.

Establecimiento de categorías

Para el establecimiento de categorías se usó el método de árbol de decisiones que está enfocado en facilitar la toma de decisiones a través de la generación de reglas de decisión, basada en la exploración del conocimiento contenido en la información existente. En este sentido, el objetivo básico es adquirir conocimiento por medio de la extracción de información implícita, desconocida y potencialmente útil, desde las bases de datos. Es así como el análisis del árbol de decisiones puede ayudar a aquellos que están inmersos en la producción de decisiones, enfocándose en los datos esenciales que son requeridos para responder preguntas específicas (Cuadro 2). Se puede determinar que el objetivo de construir un árbol de decisiones, más allá de la disgregación de datos para un manejo más eficiente, es revelar una estructura de dominio entre los datos que nos otorgue un poder predictivo (Quinlan, 1986; Blockeel y De Raedt, 1998).

Cuadro 2
Modelo típico de establecimiento de categorías a partir de la metodología del Árbol de Decisiones

Atributos Continuos			Atributos Categóricos		
ID	Edad	Ingreso	Español	Discapacidad	Escala
1	57	317	Sí	No	8
2	32	215	No	No	5
3	24	517	Sí	Sí	7
--	--	--	--	--	--
--	--	--	--	--	--
n	42	1057	Sí	No	2

Fuente: modificado de Vismara et al., 2008; Rogers y Dawson 2009.

Si los atributos son adecuados, siempre es posible construir un árbol de decisiones que clasifique correctamente cada registro dentro de la serie tratada, y usualmente hay muchos árboles de decisiones correctos. Sin embargo, si se tiene que elegir entre dos árboles de decisiones, de los cuales cada uno es correcto, es más apropiado elegir el más simple. Se espera, por consiguiente, que el árbol más simple clasifique correctamente más registros fuera de la serie tratada. En el caso de Quesería y Tonila se establecieron tres categorías de riesgo de acuerdo con la combinación de variables, para considerar los niveles moderado, alto y muy alto de riesgo (Cuadro 3).

Resultados

La vulnerabilidad que se encuentra presente en las comunidades de estudio fue establecida en 4 indicadores referidos al grupo de factores que condicionan dichas características, tales como la vulnerabilidad estructural de las viviendas, la socioeconómica de sus habitantes, la vulnerabilidad organizacional, ya sea

por parte de las instituciones o de la propia comunidad y la percepción del riesgo comunitaria. En cuanto a la primera, se observó que la mayoría (80%) de las viviendas del área de estudio presentan muros construidos con block gris (60%), o con adobe (20%), materiales que son de menor resistencia que el tabique rojo que solo se presenta en el 20% de las viviendas. Un dato que refleja la vulnerabilidad estructural alta es el porcentaje de viviendas con techo de lámina, que representa el 70%. Finalmente podemos decir que el número de cuartos construidos en las viviendas (entre 3 y 4) ocupa el 70% de los casos, lo que permite suponer que los hogares no presentan hacinamiento en su calidad de vida doméstica, esta condición favorece la reducción de la vulnerabilidad estructural (Figura 2).

Cuadro 3
Matriz de riesgo

RIESGO Justificación de la escala	Índice de riesgo	Nivel de riesgo
Zona de peligro por avalancha de escombros y vulnerabilidad baja (2 x 2 = 4)		
Zona de peligro por avalancha de escombros y vulnerabilidad media (2 x 3 = 6)	2 a 6	Moderado
Zona de peligro por avalancha de escombros y vulnerabilidad alta (2 x 4 = 8)		
Zona de peligro por lahar y vulnerabilidad baja (3 x 2 = 6)		
Zona de peligro por lahar y vulnerabilidad media (3 x 3 = 9)	7 a 11	Alto
Zona de peligro por lahar y vulnerabilidad alta (3 x 4 = 12)		
Zona de peligro por flujos piroclásticos y vulnerabilidad baja (4 x 2 = 8)		
Zona de peligro por flujos piroclásticos y vulnerabilidad media (4 x 3 = 12)	12 a 16	Muy alto
Zona de peligro por flujos piroclásticos y vulnerabilidad alta (4 x 4 = 16)		

Fuente: elaboración propia a partir de establecimiento de categorías.

Figura 2. Vulnerabilidad Estructural. Gráficas
Figura 2 a. Material de los muros de las viviendas
Figura 2 b. Material de los techos

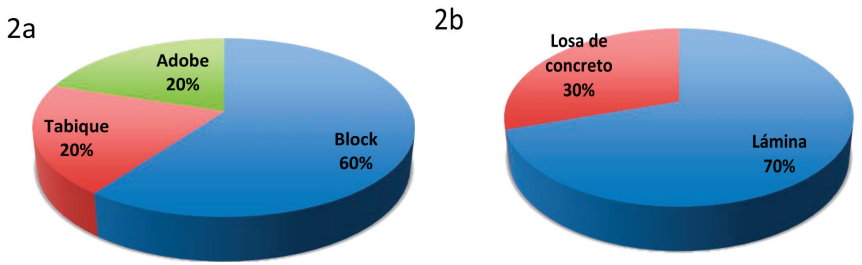
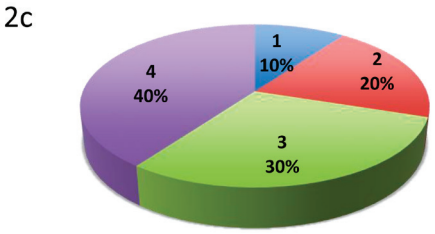


Figura 2 c. Número total de habitaciones construidas en la vivienda



Fuente: elaborado a partir de la toma de datos en campo.

En cuanto a las condiciones de vulnerabilidad socioeconómica, se consideraron datos en lo referido a la escolaridad, que en un 80% de los habitantes corresponde a la educación básica (primaria y/o secundaria). También se obtuvo información sobre la religión que practican sus habitantes, que en un 90% es católica, lo cual demuestra las condiciones tradicionales de la cultura de las localidades. En lo referente a la ocupación, un 40% se dedica a las actividades agrícolas, el 45% al comercio, el 10% trabaja como obrero y el 5% se dedica a otra ocupación. Un elemento preocupante es que, de los agricultores, solo el 2% es dueño de la tierra y en los comerciantes solo un 6% es dueño o socio del negocio, lo cual representa un nivel importante de vulnerabilidad económica, lo cual se refleja en que el total (100%) de la población entrevistada declaró que su principal gasto familiar, es decir, a que rubro destina la mayor parte de sus ingresos, es a la alimentación de la familia. Lo que nos habla de un poder adquisitivo bajo (Figura 3 a, b y c).

Figura 3. Vulnerabilidad Socioeconómica. Gráficas de resultados

Figura 3 a. Religión Figura 3 b. Ocupación

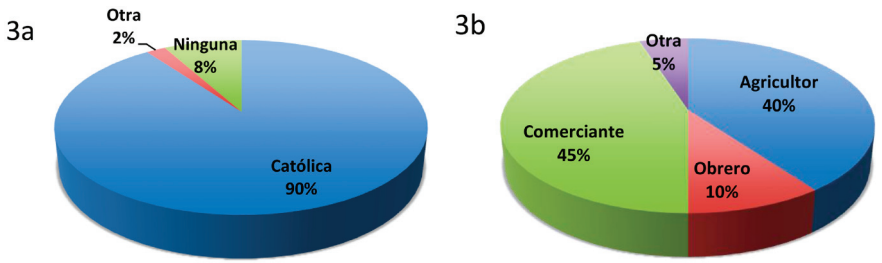


Figura 3 c. Principal gasto familiar

3c

Fuente: elaborado a partir de la toma de datos en campo.

La vulnerabilidad institucional-organizacional en este trabajo consideró tanto las medidas de prevención y mitigación que existieran por parte de las autoridades como por parte de los propios habitantes de las localidades. El primer elemento para contrastar algunas respuestas de este apartado, y del relacionado con la percepción de riesgo, es acerca de la relación que manifiestan tener con los peligros volcánicos. En este sentido, la población entrevistada manifestó en un 94% que ha sufrido de caída de ceniza volcánica significativa en su vivienda, el 6% restante también manifiesta la caída de ceniza, sin embargo, no considera que esta haya sido significativa. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de contar con un plan de contingencias gubernamental. Las respuestas sobre si conoce dicho plan son importantes, ya que solo el 9% responde afirmativamente, un 23% que no y la mayoría (68%) que no sabe. Adicionalmente el 100% de los entrevistados respondió que no cuentan con un plan de organización vecinal o comunitario. En este sentido, también se les cuestionó sobre la existencia de un plan para animales, el 26% respondió que sí, sin embargo, éste es familiar o personal, así que las comunidades están expuestas a la pérdida de sus animales y del resto de los animales de la comunidad. Lo anterior evidencia un alto nivel de vulnerabilidad organizacional, especialmente por la permanencia en la exposición al peligro volcánico (Figura 4a, b, c, d).

Figura 4. Vulnerabilidad Institucional-Organizacional. Gráficas de resultados

Figura 4 a. Si en su vivienda ha sufrido de caída significativa de ceniza volcánica

4a

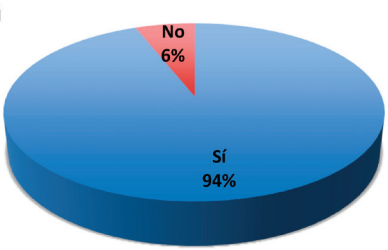
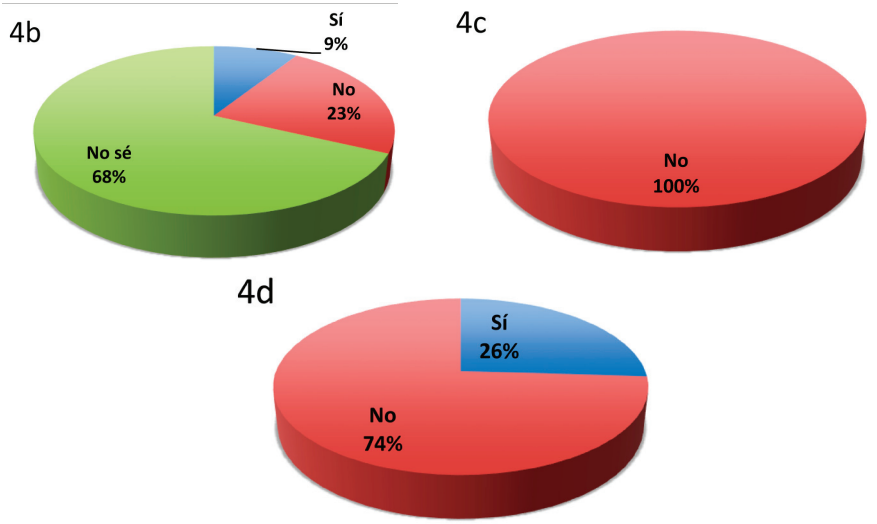
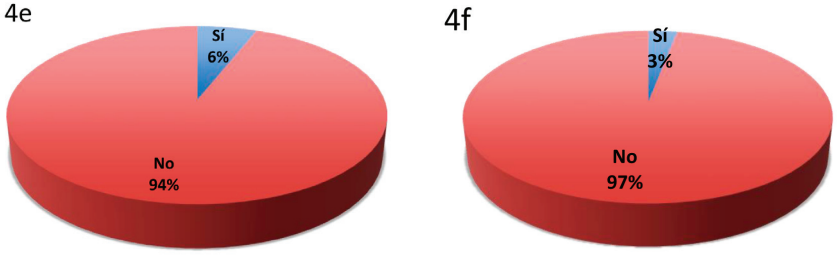


Figura 4 b. Si cuentan con un plan de contingencias gubernamental
Figura 4 c. Si cuentan con algún tipo de organización vecinal
Figura 4 d. Si cuentan con algún tipo de plan de atención hacia los animales



Ambas localidades en el área de estudio se ubican claramente en el mapa de peligros volcánicos del Volcán de Fuego de Colima, el cual se elaboró y publicó como elemento de prevención para la población en general, por lo que es de uso público y debería estar difundido de manera sistemática dentro de las actividades gubernamentales de mitigación de riesgo, sin embargo, solo el 6% manifestó conocerlo y al mostrárselo durante la entrevista para que ubicara la localidad donde se encuentra su vivienda, el 74% no logró realizarlo, lo cual demuestra que el mapa de peligro no es difundido suficientemente entre la población y no se socializa en las escuelas, lo cual sería fundamental que se realizara (Figura 4e, f).

Figura 4 e. Si conoce el mapa de peligros volcánicos
Figura 4 f. Si en caso de presentársele el mapa de peligros es capaz de ubicar su vivienda en él



FEn caso de un evento de contingencia volcánica, la mayoría de las respuestas (46%) fueron en el sentido de que huirían. Por otra parte, menos de la mitad de la población (42%) respondió que seguiría un plan de evacuación, sin embargo, al cuestionarles sobre las acciones que tendrían que llevar a cabo durante ese plan, respondieron en su mayoría que los encargados de protección civil irían a ayudarles y decirles que deberían hacer, lo cual indica que la población no maneja de manera previa ningún plan de contingencia con claras acciones a seguir. Relacionado con esto, el 94% identifica a las carreteras como ruta de evacuación, lo cual es, dependiendo del peligro volcánico, factible o no. Por ejemplo, en el caso de caída de ceniza, las carreteras podrían ser las más adecuadas, sin embargo, en caso de lahar habría que buscar rutas alternas, como brechas o veredas, ya que usar las carreteras complicaría la evacuación por la saturación de personas y porque los lahares podrían bloquear las mismas. En este caso, el plan de contingencia debería considerar todas las rutas de evacuación y ante qué casos debería usar una u otra, así como las acciones a seguir en cada caso. Casi una quinta parte de los habitantes no identifican ningún alberque gubernamental y desconoce en qué caso lo debería ocupar y en qué caso no (Figura 4g, h, i).

Figura 4 g. Cuál sería su primera reacción en caso de contingencia volcánica
Figura 4 h. Que rutas de evacuación usaría

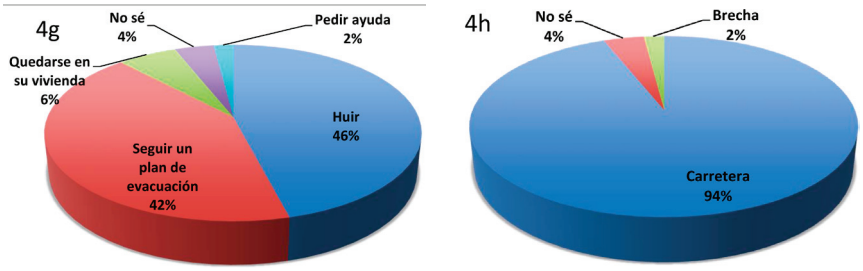
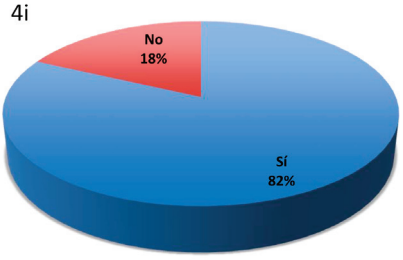


Figura 4 i. Si identifica algún albergue gubernamental



Fuente: elaborado a partir de la toma de datos en campo.

Un elemento fundamental en la vulnerabilidad es la percepción de riesgo que tienen tanto los habitantes en riesgo como los tomadores de decisiones, ya que determina muchas de las acciones que se siguen en las políticas y medidas de mitigación. En este sentido se encontró que el 62% de los entrevistados considera que su vivienda no se encuentra en riesgo volcánico (Figura 5a), lo cual es relevante ya que la totalidad del territorio de las comunidades se ubica en algún nivel de riesgo volcánico, de acuerdo con el mapa de peligros volcánicos. El 83% considera que el nivel de riesgo en que se encuentra es bajo (Figura 5b), lo cual se contradice con la ubicación de la localidad dentro del mapa de peligros del volcán, sin embargo, esta percepción está influenciada por dos elementos: por una parte, los habitantes desconocen dicho mapa de peligros en su gran mayoría; por el otro, los encargados del monitoreo del volcán y la gestión del riesgo se encuentran atentos a las comunidades más cercanas, especialmente las que se ubican dentro de los 12 kilómetros de radio alrededor del cráter, como La Becerrera o El Jabalí en el estado de Colima.

Respecto de la pertinencia de contar con un plan de contingencias para los animales domésticos y comunitarios, al menos dos tercios de la población coincide en que debe implementarse, en este sentido la percepción es bastante adecuada ya que una estrategia de este tipo resulta indispensable al hablar de la gestión del riesgo, no solo en la fase de atención, sino también en las fases preventiva y de recuperación. Como parte de la educación y los usos y costumbres de crueldad hacia los animales se observa que un 31% de la población le parece que es un tema sin relevancia y que los animales pueden cuidarse por sí mismos, y que en caso contrario no hay responsabilidad social hacia ellos (Figura 5c). Esta percepción puede relacionarse con la idea de que los desastres no se pueden evitar, que en un 82% fue la respuesta general (Figura 5d). Cabe señalar que una percepción de este tipo genera poca o nula participación social en la prevención y mitigación del riesgo, por lo que los desastres se convierten en eventos fuera de su rango de acción o influencia. Esto evidentemente aumenta la vulnerabilidad en forma significativa.

Un elemento importante por destacar es que el 80% de la población manifiesta confianza hacia el resto de los miembros de la comunidad, lo cual puede ser positivamente optimizado para reducir la vulnerabilidad organizacional a nivel vecinal o comunitario (Figura 5e). Encontramos en este punto una variable que representa una oportunidad para la gestión del riesgo.

Figura 5. Vulnerabilidad por inadecuada percepción de riesgo. Gráficas de resultados
Figura 5 a. Consideración de que la vivienda se encuentre en riesgo volcánico
Figura 5 b. Nivel de riesgo volcánico en que la población ubica su vivienda

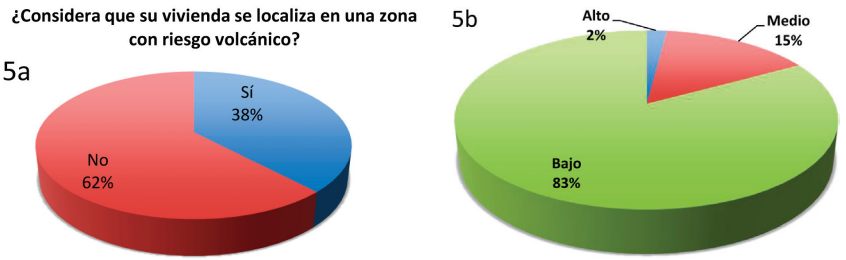
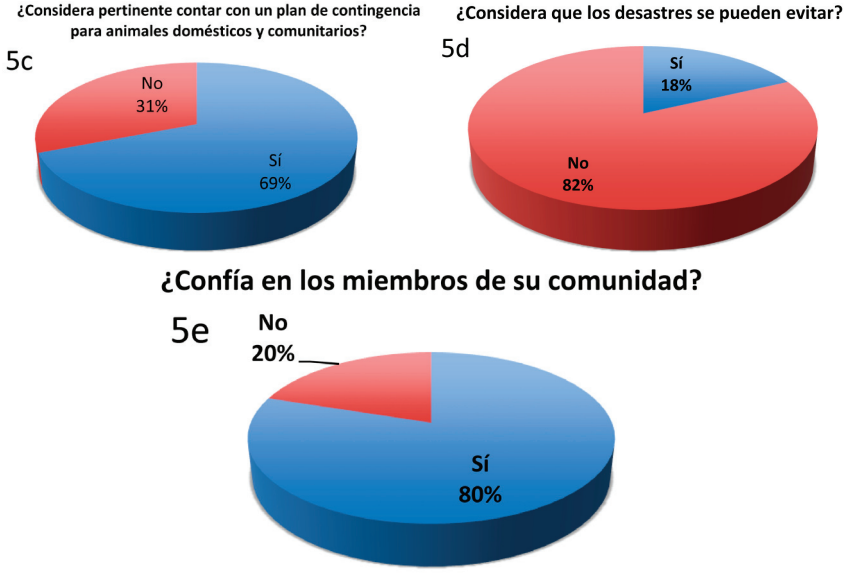


Figura 5 c. Consideración sobre la pertinencia de contar con un plan de contingencias para animales domésticos y comunitarios
Figura 5 d. Consideración acerca de la factibilidad de evitar los desastres
Figura 5 e. Manifestación de confianza en los integrantes de la comunidad



Fuente: elaborado a partir de la toma de datos en campo.

Distribución del peligro, la vulnerabilidad, y el riesgo

Los peligros volcánicos a los que se encuentran expuestas las localidades del estudio son los flujos piroclásticos, los lahares y las avalanchas de escombros y la caída significativa de ceniza, a pesar de ubicarse fuera del radio de los 12 kilómetros con relación al cráter del volcán, lo que en general reduce el nivel de atención y la gestión del riesgo volcánico en estas comunidades. Sin embargo, como se puede apreciar en la Figura 6, la totalidad del territorio en ambas localidades se encuentra expuesto a algún tipo de peligro. En la localidad de Quesería, Colima, la porción noreste se encuentra expuesta a los flujos piroclásticos, seguida por una franja con peligro por lahares. El resto del territorio se encuentra expuesto a avalanchas de escombros volcánicos (Figura 6a). Cabe destacar que los flujos que se presentaron en julio de 2015 llegaron hasta una distancia de aproximadamente 5 kilómetros de la localidad (Figura 1). En cuanto a la localidad de Tonila, Jalisco, encontramos una situación bastante similar, aunque en este caso el territorio expuesto ante flujos piroclásticos se ubica en la porción oeste de la localidad, seguido también de una zona expuesta ante lahares. Bordeando la zona central hacia el este de la localidad se encuentra otra franja con posibilidad de lahares o inundaciones, el resto del lugar presenta el peligro de avalanchas de escombros (Figura 6b).

Figura 6. Mapa de exposición a peligros volcánicos
Figura 6 a. Quesería, Colima

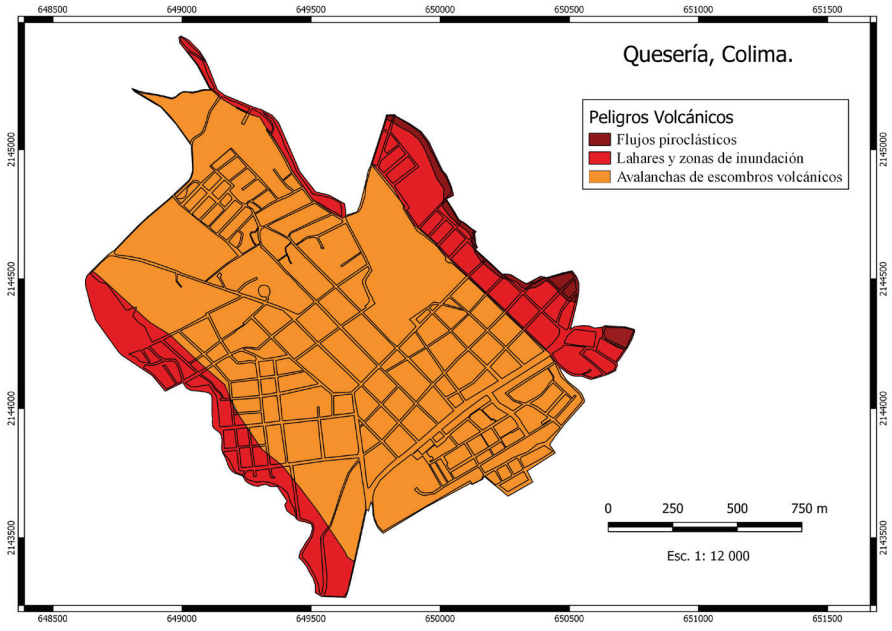
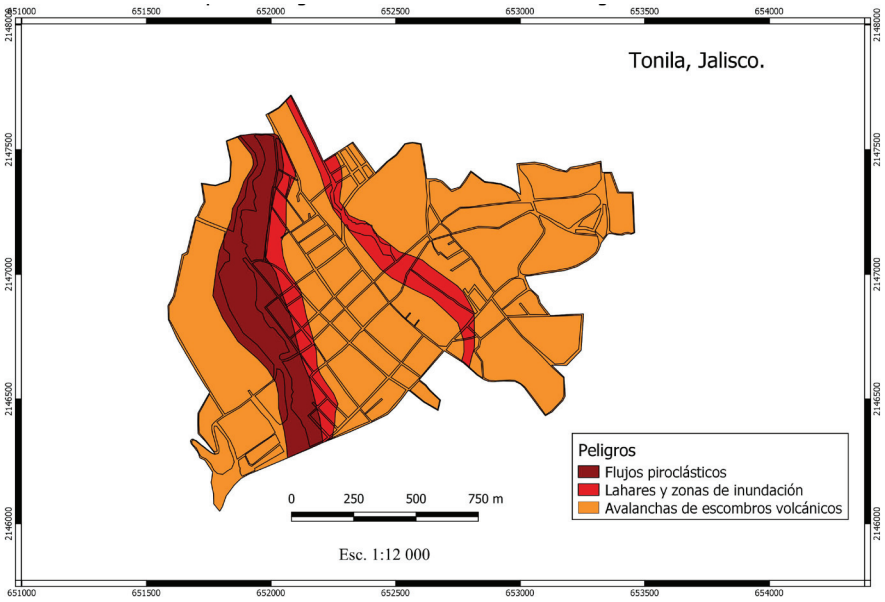


Figura 6 b. Tonila, Jalisco



Fuente: elaborado a partir del Mapa de Peligros del Volcán de Fuego de Colima (Navarro y Cortes 2003). Base cartográfica de INEGI 2018.

El mapeo de la vulnerabilidad social en la localidad se identificó en tres niveles: baja, en el centro de la localidad; media en la mayor parte del territorio y alta en algunas colonias ubicadas generalmente en las áreas más alejadas del centro (Figura 7a). En el caso de Tonila, Jalisco, igualmente la parte central de la localidad se ubica en una vulnerabilidad baja, mientras que una franja de manzanas que corren en dirección noroeste-sureste presentan una vulnerabilidad alta debido a las condiciones de precariedad estructural en sus viviendas (Figura 7b).

Al realizar la matriz de riesgo (Figura 2), considerando tanto la exposición al peligro volcánico, como la vulnerabilidad social en sus distintos indicadores, se obtuvo la distribución de tres niveles de riesgo: Moderado, Alto y Muy Alto. En el caso de Quesería, se observan dos porciones pequeñas con nivel muy alto de riesgo, en los extremos, al noreste y al suroeste que corresponden a áreas de alto peligro volcánico y alta o muy alta vulnerabilidad. Otras porciones del territorio con un nivel alto de riesgo, considerando un peligro alto y una vulnerabilidad moderada y finalmente la gran mayoría del territorio que presenta un riesgo moderado, ya que, a pesar de presentar una vulnerabilidad baja, el peligro en toda la comunidad es alto (Figura 8a). En la localidad de Tonila también encontramos un 10% del territorio con nivel de riesgo muy alto, un 15% con nivel de riesgo alto y el resto con nivel de riesgo moderado (Figura 8b).

Figura 7. Mapa de vulnerabilidad social

Figura 7 a. Quesería, Colima

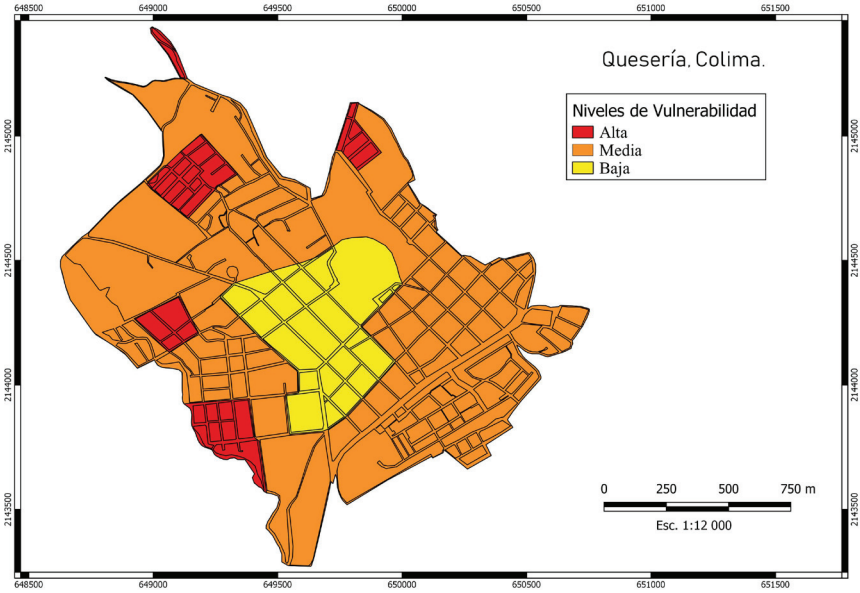
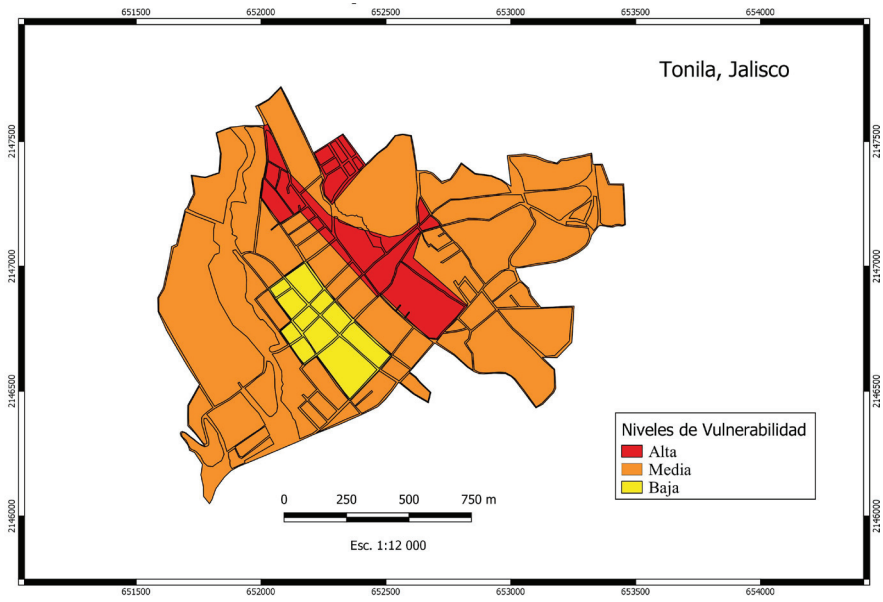


Figura 7 b. Tonila, Jalisco



Fuente: elaborado a partir de los datos tomados en campo sobre la vulnerabilidad de las localidades. Base cartográfica de INEGI 2018.

Figura 8. Mapa de riesgo asociado a peligro volcánico y vulnerabilidad social

Figura 8 a. Quesería, Colima

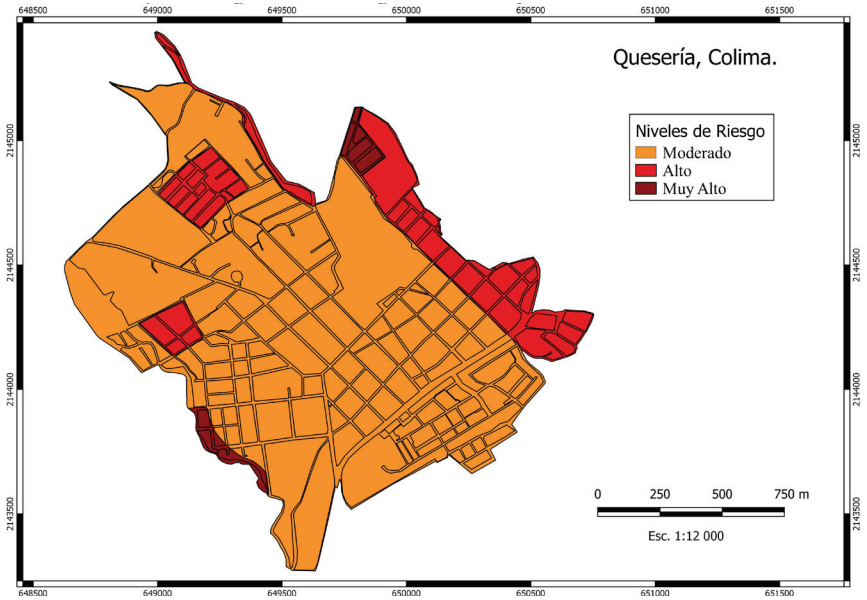
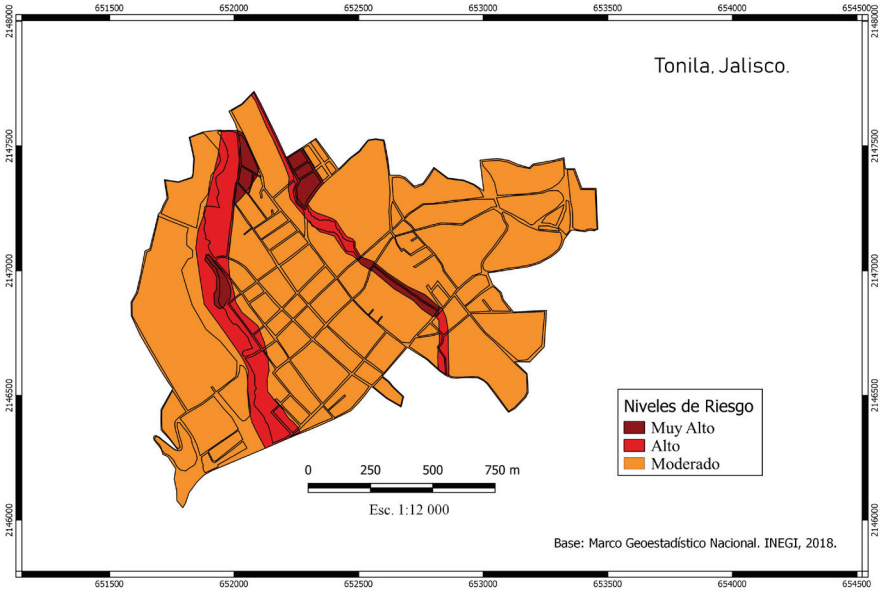


Figura 8 b. Tonila, Jalisco



Fuente: elaborado a partir de los datos tomados en campo sobre la vulnerabilidad de las localidades y las áreas de peligro volcánico de acuerdo con mapa de peligros del Volcán de Fuego de Colima. Base cartográfica de INEGI 2018.

Consideraciones finales

De lo que se puede observar en las localidades de estudio, lo más relevante son sus niveles de riesgo, ya que su peligro volcánico es alto. Aunque es muy alto en las áreas expuestas ante flujos piroclásticos y lahares, también las avalanchas de escombros representan un alto peligro para las poblaciones. Alrededor del 77% del territorio de las localidades se encuentra expuesto al peligro por avalanchas de escombros, y el 23% restante a peligro por flujos piroclásticos y lahares. En cuanto a la vulnerabilidad, solo un 10% presenta un nivel bajo, el otro 90% se ubica entre media y alta. Lo que nos representa una distribución territorial del 80% con riesgo moderado y el resto entre alto y muy alto.

Considerando lo anterior, la vulnerabilidad resulta fundamental para valorar el riesgo, así como para mitigarlo y prevenirlo. Por lo que la construcción de los indicadores de vulnerabilidad es de gran relevancia en la gestión del riesgo, ya que permiten a los tomadores de decisiones y a la población en general, identificar los aspectos más significativos en las condiciones de vida de los pobladores, así como de las condiciones estructurales de sus viviendas, y de su percepción de riesgo. Además de las condiciones de organización, tanto gubernamental, como vecinal o comunitarias, que pueden intervenir e influenciar de manera directa la gestión del riesgo volcánico, en este caso, asociado al Volcán de Fuego de Colima.

Por ejemplo, el cambio de techos de lámina, por techos colados de cemento permitiría una mayor resiliencia estructural de las viviendas y permitiría mayores posibilidades de conservar la vivienda durante algún evento volcánico que alcanzara a la localidad y fuera de menor magnitud. Definitivamente, la percepción que tanto la población como sus autoridades tengan del riesgo al que se encuentran expuestos es fundamental para lograr una mejor gestión, ya que les permitiría tomar medidas más adecuadas en la organización ante el peligro volcánico y especialmente ante la planeación territorial de su comunidad.

Finalmente, la vulnerabilidad institucional resulta fundamental en la gestión del riesgo, ya que, por un lado, son las autoridades las encargadas de gestionar el riesgo y por la otra son las que facilitan o dificultan la participación de la población que resulta indispensable para una verdadera gestión del riesgo, es decir, en tanto la gestión del riesgo excluya el factor participativo, será difícil constituirla como una verdadera gestión de riesgos. En este sentido, la construcción de indicadores permite identificar las pautas a seguir en materia de monitoreo de la vulnerabilidad y por consiguiente del riesgo.

Bibliografía

Adger, Neil., 2006. "Vulnerability" en Global Environmental Change 16(3): 268-281.

Blockeel, Hendrik and Luc De Raedt, 1998: "Top-Down Induction of Logical Decision Trees" en Artificial Intelligence 101(1-2): 285-297.

Bouwer, Laurens, Philip Bubeck, and Jeroen Aerts, 2010. "Changes in Future Flood Risk Due to Climate and Development in a Dutch Polder Area". Global Environmental Change 20(3): 463-471.

Cardona, Omar, 2003. Indicators for Risk Management: methodological fundamentals, Manizales: Instituto de Estudios Ambientales, IDEA UN.

Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2010: Índices de Vulnerabilidad, Organización Mundial de Agricultura.

Cuevas, Alicia y Seefoo, José Luis, 2005. "Reubicación y desarticulación de La Yerbabuena Entre el riesgo volcánico y la vulnerabilidad política" en Desacatos 19: 41-70, México DF: Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social México CIESAS.

De Vries, Daniel, 2011. "Temporal Vulnerability in Hazardscapes: Flood Memory-Networks and Referentiality along the North Carolina Neuse River (USA)" en Global Environmental Change 21(1): 154-164.

Ghizzoni, Tatiana, Roth Giorgio, and Roberto Rudari, 2012. "Multisite Flooding Hazard Assessment in the Upper Mississippi River" en Journal of Hydrology 412-413: 101-113.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI, 2018. Marco Geoestadístico Nacional, Mapa de Zonas Urbanas y Rurales Amanzanadas. Disponible en: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/marcogeo/889463776079/06_colima.zip (Fecha de consulta: 30 de agosto de 2019).

Kazmierczak, Aleksandra and Gina Cavan, 2011. "Surface Water Flooding Risk to Urban Communities: Analysis of Vulnerability, Hazard and Exposure" en Landscape and Urban Planning 103(2): 185-197.

Magaña Rueda, Víctor (responsable), 2012. Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Marhavilas, P., Koulouriotis, D. and Germeni, V, 2011. "Risk Analysis and Assessment Methodologies in the Work Sites: On a Review, Classification and Comparative Study of the Scientific Literature of the Period 2000-2009" en Journal of Loss Prevention in the Process Industries 24(5): 477-523.

Mendenhall, William., Robert, Beaver, and Barbara, Beaver, 1999. Introduction to Probability and Statistics Brooks, Duxbury Press.

Pelling, Mark, 2004. Visions of Risk: A Review of International Indicators of Disaster Risk and its Management, London: United Nations Development Programme, UNDP.

Petrosillo, Irene, Costanza Robert, Aretanoa, Roberta, Zaccarelli, Nicola y Zurlini Giovanni, 2013. "The use of subjective indicators to assess how natural and social capital support residents' quality of life in a small volcanic island" en Ecological Indicators 24: 609–620, Elsevier.

Puente, Sergio, 2010. "Una Megalópolis en Riesgo: La ciudad de México y el Desafío de la Prevención de un Riesgo Anunciado" en Los grandes problemas de México 373-397 Tomo IV Medio Ambiente, coordinado por Lezama José Luis y Graizbord Boris, México: Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales del Colegio de México.

Quinlan, John, 1986. "Induction of Decision Trees" en Machine Learning 1(1): 81-106.

Reyes-Dávila, Gabriel, Raúl Arámbula-Mendoza, Ramón Espinasa-Pereña, Matthew J. Pankhurst, Carlos Navarro-Ochoa, Ivan Savov, Dulce M. Vargas-Bracamontes, Abel Cortés-Cortés, Carlos Gutiérrez-Martínez, Carlos Valdés-González, Tonatiuh Domínguez-Reyes, Miguel González-Amezcua, Alejandro Martínez-Fierros, Carlos Ariel Ramírez-Vázquez, Lucio Cárdenas-González, Elizabeth Castañeda-Bastida, Diana M. Vázquez Espinoza de los Monteros, Amiel Nieto-Torres, Robin Campion, Loic Courtois, Peter D. Lee, 2016. "Volcán de Colima dome collapse of July, 2015 and associated pyroclastic density currents" en Journal of Volcanology and Geothermal Research 100-106.

Rogers, Sally and Geraldine, Dawson, 2009. Early Start Denver Model for Young Children with Autism: Promoting Language, Learning, and Engagement. NY: Guilford Publications.

Vismara, Laurie and Sally J. Rogers, 2008. "The Early Start Denver Model: A Case Study of an Innovative Practice" en Journal of Early Intervention 31: 91-108.

Zobin, V.M., Arámbula, R., Bretón, M., Reyes, G., Plascencia, I., Navarro, C., Téllez, A., Campos, A., González, M., León, Z., Martínez, A., Ramírez, C., 2015. "Dynamics of the January 2013–June 2014 explosive–effusive episode in the eruption of Volcán de Colima, México: insights from seismic and video monitoring" en Bull. Volcanol 77: 1–13.

Sección 2
Riesgos geólogo geomorfológicos: el pulso de la corteza terrestre

2.1. Monitoreo de la actividad volcánica y comunicación del riesgo asociado. Experiencias en el Volcán de Colima

Nick Varley

Juan Carlos Gavilanes-Ruiz

Facultad de Ciencias

(Programa de Licenciatura en Gestión y Reducción del Riesgo de Desastres)

Universidad de Colima, México

Introducción

En este capítulo se describen de manera básica los aspectos principales del monitoreo volcánico y algunos principios de la reducción del riesgo asociado a los volcanes. Nuestra finalidad es que el lector tenga una idea sobre dichos temas, teniendo como marco la gestión integral del riesgo de desastres. La gran mayoría de los autores citados (sin incluirnos) son científicos que encabezan la investigación en su área del conocimiento. Este capítulo se divide en dos partes principales: del apartado 1 al 6 se tratan los aspectos técnicos del monitoreo volcánico, es decir, los aspectos relacionados directamente con las ciencias de la tierra. Los apartados 7 al 11 se refieren a los aspectos predominantemente sociales que definen el riesgo volcánico y la respuesta social durante una crisis volcánica.

1. Principios de monitoreo

El monitoreo de una posible fuente de amenazas geológicas tiene el propósito de identificar anomalías en series de tiempo que podrían representar precursores. Un precursor es una señal que se presenta antes del inicio de un evento geológico, como un deslizamiento, un sismo o una erupción volcánica. Si el evento tiene asociado amenazas que podrían afectar la sociedad o el ambiente, cualquier conocimiento previo de sus características, como

magnitud y tiempo de inicio, es crítico para realizar acciones de mitigación para reducir el riesgo y la posibilidad de un desastre.

En el caso de los volcanes, la interpretación de los datos es difícil debido la complejidad del sistema volcánico. Son notoriamente diferentes en su comportamiento, y por lo tanto es difícil definir reglas generales por los cambios en los parámetros medido en un sistema de monitoreo, aunque se ha intentado con los datos sísmicos (McNutt, 1996).

El comportamiento de un volcán está controlado por varios factores y una relación compleja existe entre ellos mismos. La mayoría del magma generado en la corteza no llega a la superficie, siendo su densidad menor a la roca que lo envuelve, lo que propicia su migración hacia arriba, pero lo más probable es que se enfríe y se forme un cuerpo de roca intrusiva. En las profundidades del sistema, los gases se mantienen disueltos en el magma, pero durante el ascenso hay descompresión que resulta en la formación de burbujas, y entre más se acerca a la superficie, el volumen de gas aumenta. Una reducción en densidad del magma aumenta su posibilidad de que llegue a formar un volcán. Si el ascenso es rápido, con mucho gas, el resultado es una erupción explosiva. Una característica sumamente importante es la viscosidad del magma, que entre más viscoso es, más difícil resulta que el gas salga del magma, produciendo, por lo general, explosiones más grandes. La composición del magma afecta la viscosidad, pero también hay perturbaciones por la concentración y naturaleza de los gases, así como por los cristales, que representan otro componente del magma. La vulcanología tiene que considerar todos los procesos y producir modelos para posteriormente comparar con los datos de una red de vigilancia.

Los pronósticos de erupciones, que resultan de la identificación de precursores, se basan en los modelos numéricos generales, o más comúnmente en experiencias previas del mismo volcán. Aunque hay sistemas estadísticos para el análisis de los datos (Marzocchi *et al.* 2008; Bartolini *et al.* 2016), normalmente se realiza en reuniones de los expertos locales con la intención de llegar a un consenso sobre el escenario eruptivo más probable.

Con sismos o eventos meteorológicos que resultan en inundaciones, no es simple pronosticar la zona de mayor afectación antes del evento. La ventaja de los volcanes (con la excepción de los campos de volcanismo distribuido o de volcanismo monogenético) es que la fuente de la amenaza está bien definida en espacio, siendo la cima del volcán o un punto cercano. Lo complicado es que una erupción volcánica genera una variedad de amenazas, cada una con su alcance e impacto. La vigilancia de un volcán tiene el objetivo de definir un escenario eruptivo considerando primero el tipo de erupción (explosivo o efusivo); después, la magnitud y, como consecuencia, las amenazas que pueden resultar en su zona de impacto. Para mitigar el riesgo la información tiene que llegar a las autoridades a tiempo y en una forma que permita la eficiente toma de decisiones, así como la realización de evacuaciones.

El diseño e instalación de una red de monitoreo volcánico depende principalmente de la economía de la zona y la prioridad política que tiene la reducción del riesgo. Hay volcanes con erupciones frecuentes, pero sin una población vulnerable, el riesgo del volcán no atraería la inversión necesaria por una red sofisticada de monitoreo. La inversión en los sistemas de monitoreo en países como Indonesia es baja debido a su reducido nivel económico, pese a que tiene más de 100 volcanes activos. En el otro extremo está Japón: siendo un país con mayores recursos, cuenta con monitoreo en 47 de los 110 volcanes activos en su territorio (Fuji y Yamasato, 2015). México se encuentra en una situación intermedia: tiene 26 volcanes que podemos asignar como activos, es decir que existe la posibilidad de una erupción en el futuro (Varley 2017), pero nada más dos tienen sistemas de monitoreo con un nivel entre moderado y sofisticado (Volcán de Colima y Popocatépetl).

2. Tipos principales de monitoreo

Hay varios tipos de señales que podemos detectar, cada una relacionada con el movimiento de magma o gases volcánicos. Podemos dividir las señales en los siguientes grupos. Para maximizar la posibilidad del pronóstico de una erupción, las redes de monitoreo modernas utilizan una variedad de herramientas. Se analiza el conjunto de datos para definir el comportamiento de un volcán, y con la aplicación de modelos se generan pronósticos de las amenazas.

a. Sismicidad

El movimiento de magma o los fluidos asociados genera movimientos de la tierra y la energía está transmitida por medio de ondas sísmicas. Con una red de sismómetros es posible detectar la ubicación y las características de la fuente, información crítica para la evaluación de los procesos que una erupción puede generar. Este tipo de monitoreo es el más desarrollado con la disponibilidad de muchos diferentes instrumentos que son muy robustos. Se han desarrollado muchas técnicas para analizar los datos, y para muchos volcanes, siendo así el tipo de vigilancia principal. Se puede decir que cualquier volcán que tiene mucho tiempo sin producir una erupción va a generar precursores sísmicos antes de un nuevo evento. Sin embargo, no es tan seguro que esto funcione para los volcanes que están en erupción frecuentemente o tienen una composición más máfica (Pesicek *et al.* 2015).

Cuando aumenta la cantidad de eventos sísmicos generados en una zona podemos llegar a tener un enjambre de eventos. Muchas erupciones están precedidas por enjambres de diferentes tipos de eventos y la interpretación de ciertos patrones puede generar información precisa sobre el ascenso de magma y la posibilidad de una erupción (White y McCausland 2019). El número de

estaciones es importante y muchas redes sísmicas tienen más de seis estaciones de banda ancha, lo cual permite la detección de señales de una frecuencia muy baja. La distribución de estaciones es también fundamental para optimizar las posibilidades de análisis y para una mejor sensibilidad instrumental es importante ubicar algunas estaciones cerca del cráter del volcán.

b. Geodesia

Cuando el magma asciende genera deformación de la superficie de la tierra y, con diferentes tipos de equipos, se puede cuantificar los movimientos. Hay varios ejemplos de erupciones en las cuales la primera señal antes del evento fue una inflación de la superficie (Phillipson *et al.* 2013). Una red moderna para detectar deformación consiste en una distribución de instrumentos de GPS (sistemas de posicionamiento global) que detectan señales de satélites que los permite ubicarse en tres dimensiones. Al igual que con la sismicidad, la distribución de instrumentos de monitoreo de la deformación es importante para optimizar las posibilidades de la detección de precursores y el modelado de la fuente (Dzurisin, 2003). Recientemente, las posibilidades han aumentado ampliamente con el apoyo de la percepción remota. La técnica de InSAR (interferometría de radar de apertura sintética) funciona con la comparación entre los datos de radar de dos pasos arriba de un volcán. Aunque el análisis e interpretación no es trivial, los avances recientes pueden abrir las posibilidades para observatorios en países con menos recursos (Garthwaite *et al.* 2019) (Fotografía 1).

c. Geoquímica de fluidos

Durante el ascenso de magma, la descompresión ocasiona la liberación de los volátiles que contiene. Es este mismo proceso que puede resultar en grandes explosiones, por lo tanto, la cuantificación de la desgasificación del magma es un componente crítico del monitoreo. Según Sparks (2003), la comprensión de la desgasificación del magma es un tema central para el pronóstico de una erupción. Es una medición directa de los procesos magmáticos cuando la mayoría de las técnicas son indirectas (como la sismicidad). Para obtener la mejor información de mediciones de gases se requiere muestras tomadas directamente de las fumarolas. El problema es el difícil acceso y el peligro en la zona del cráter de un volcán que puede entrar en erupción.

Afortunadamente existen equipos que miden la concentración de gas desde lejos, el más común siendo el espectrómetro de radiación ultravioleta que puede cuantificar la emisión del gas bióxido de azufre. Si existe un camino que pasa debajo de la pluma de gas volcánico, es conveniente pasar en un vehículo con el espectrómetro dirigido hacia arriba. El pico que se registra en la computadora representa la cantidad de gas detectada en este punto. A veces también se puede utilizar una avioneta con la misma forma

de medición. Si no es factible pasar debajo de la pluma, se puede montar el aparato en un trípode y hacer mediciones desde puntos fijos. En cada caso se calcula el flujo de gas, y por lo cual requiere la velocidad del viento. Ese es el dato que introduce típicamente el mayor error en el cálculo del flujo de gas. En algunas erupciones, las variaciones en la emisión de los gases pueden proporcionar información importante para comprender el ascenso de magma u otros cambios en el sistema (por ejemplo, en el volcán Poás, Costa Rica, de Moor *et al*., 2016).

Fotografía 1. Tomando datos de GPS en la orilla del cráter del Volcán de Colima

Fuente: fotografía tomada por los autores del capítulo.

Normalmente el gas volcánico con mayor abundancia es el vapor de agua, después el bióxido de carbono y en tercer lugar el SO_2. Es más fácil medir el último porque no existe en la atmósfera. Sin embargo, con valores de otras especies de gases se puede obtener más información sobre el sistema, por ejemplo, estimar la profundidad en donde se encuentra el magma. Muchas tecnologías han avanzado bastante para ayudar en el monitoreo y pronóstico de erupciones, y la cuantificación del flujo de CO_2 no es la excepción (Queißer *et al.* 2019).

Los espectrómetros miden una concentración de gas en un volumen de la atmósfera, una adición reciente a los instrumentos disponibles es la cámara de ultravioleta que permite además la visualización de la emisión de gas de la cima del volcán. Es útil para analizar en detalle la emisión de gas y las variaciones

en el sistema superficial de desgasificación del volcán y aumenta la resolución, tanto temporal como espacial, en los datos (McGonigle et al., 2017).

Otra técnica de monitoreo de gases es la detección del flujo de gas a través de la tierra. Una proporción de los gases inertes que sale del magma se escapa por medio de migración a través del edificio volcánico en lugar de salir en las fumarolas del cráter. La generación de una serie de tiempo de la emisión de CO_2 difuso puede proporcionar información crítica para la evaluación de un sistema volcánico (Cardellini et al., 2017).

Por último, el monitoreo de manantiales representa otro método para expandir la información disponible para evaluar la actividad de un volcán. Debajo del edificio volcánico existe un sistema de acuíferos e interacciones que ocurren con los fluidos magmáticos ascendentes. Hay casos de anomalías en las series de tiempo que han indicado intrusiones de magma (por ejemplo, en el volcán La Soufrière, Guadeloupe, (Villemant et al., 2014).

d. Ceniza y otros productos sólidos

El producto más común de una erupción es la ceniza o tefra que sale en la mayoría de las erupciones explosivas desde las más pequeñas hasta las grandes plinianas (con una columna eruptiva que alcance entre aproximadamente 20 y 45 km arriba el nivel del cráter). Cuando hay un colapso de la columna eruptiva o de un domo presurizado se generan flujos o corrientes de densidad piroclástica, las cuales son la amenaza de mayor peligro que produce un volcán, transportando partículas de diversos diámetros, desde ceniza hasta bloques que pueden ser de varios metros.

Conocer las características de la ceniza de caída, partículas de corrientes de densidad piroclástica o muestras de flujos de lava, pueden ayudar mucho en el desarrollo de un modelo de la evolución de una erupción. Se puede analizar la geoquímica en la forma de los elementos mayores, menores o trazas, o los isótopos. Como es el caso de todos los datos de monitoreo, es necesario comparar con una serie de tiempo. No son los valores puntuales los que necesariamente tienen utilidad, sino las variaciones en la geoquímica a través de años o hasta periodos más largos. Variaciones en la mineralogía también reflejan cambios en las fuentes del magma en las profundidades. Por ejemplo, en el caso del volcán Merapi en Indonesia, un estudio de los cambios en composición de los productos fue importante para determinar los procesos que resultaron en una erupción grande en 2010 (Costa *et al.* 2013). Con un análisis de productos de distintas erupciones, detectaron grandes variaciones en el tamaño de los cristales, su morfología y composición. Asimismo, la morfología o texturas de la ceniza proporcionan información sobre el mecanismo de la fragmentación del magma que genera estas partículas (Liu *et al.* 2014).

e. Acústico

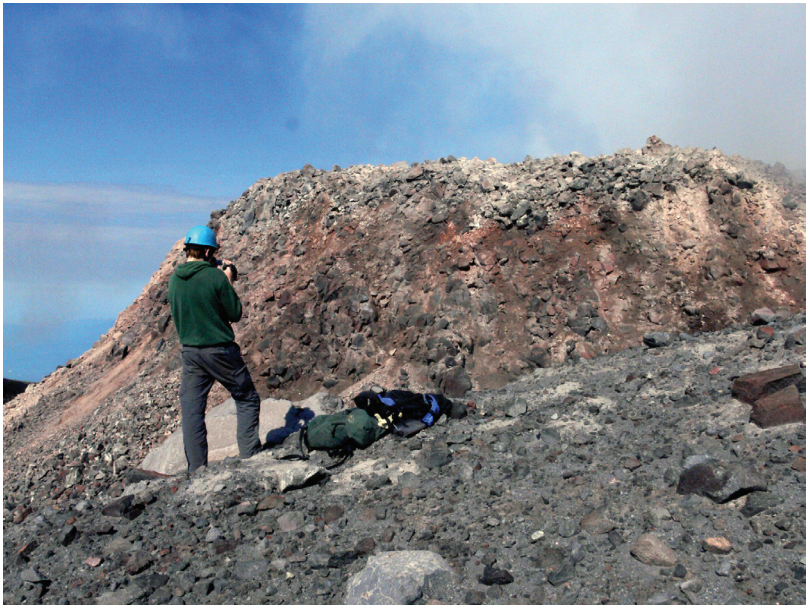
Los volcanes producen mucho sonido durante las erupciones, y hay un tipo más importante para el monitoreo que se llama infrasonido, una emisión

de baja frecuencia y con la gran ventaja que se puede detectar a larga distancia. Johnson y Ripepe (2011) resumen las características de este tipo de monitoreo; como la sismicidad, se puede detectar con redes de instrumentos en cualquier condición meteorológica. Las series de tiempo de datos acústicos ayudan a la comprensión de la evolución de la dinámica de las erupciones.

f. Térmico

Lógicamente podemos aprovechar las temperaturas elevadas de magma para conseguir más datos para ayudar en el pronóstico y evaluación de la actividad. Durante los años recientes han progresado las cámaras térmicas, que ahora son más potentes y más portátiles. Spampinato *et al.* (2011) describen las diversas aplicaciones para una cámara térmica en la vigilancia de actividad volcánica: permiten la visualización de ciclos de convección en lagos cratéricos, la detección del aumento en temperatura de la tierra previo a una extrusión de magma y la cuantificación de la temperatura de la ceniza en una columna eruptiva. Algunas redes de monitoreo cuentan con cámaras fijas o están siendo utilizadas para tomar imágenes por medio de vuelos o puntos fijos (Fotografía 2).

Fotografía 2. Mivdiendo la emisión térmica de un domo del Volcán de Colima



Fuente: fotografía tomada por los autores del capítulo.

g. Campos potenciales

Menos utilizado, pero con el potencial de proporcionar otros datos útiles es el monitoreo utilizando los campos potenciales. Una intrusión de magma influye en los campos magnéticos, gravitacionales, o electromagnéticos y por lo tanto una serie de tiempo generada por un instrumento que detecta uno de estos campos representa otro dato útil para la evaluación de la actividad de un volcán. Ejemplos de este tipo de aplicación incluyen a los volcanes Etna, Italia (Napoli et al. 2008), Taal (Filipinas) y Miyake-jima (Japón) (Zlotnicki et al. 2009).

h. Percepción remota

No es una técnica común, pero los satélites representan una plataforma cada vez más importante para la detección de señales para el monitoreo de la emisión térmica, emisión de SO_2 y de ceniza. Muchos volcanes se encuentran en zonas muy remotas, en las cuales sería enormemente costoso mantener una red de instrumentos cercanos. Aunque posiblemente no hay población vulnerable en la proximidad de algunos volcanes, la gran densidad del tráfico aéreo global requiere un monitoreo de los volcanes que tienen el potencial de generar columnas de ceniza que representan un gran peligro para la navegación aérea. Existen sistemas que analizan los datos constantemente para identificar anomalías que pueden ser precursores o relacionados con las amenazas de una erupción. Por ejemplo, el sistema MIROVA detecta puntos calientes y ha generado series de tiempo de por lo menos 200 volcanes (Coppola *et al*. 2020).

3. Interpretación de datos de monitoreo

Dada la complejidad de los procesos que ocurren dentro de un sistema magmático, los volcanólogos requieren datos de diversos tipos para poder hacer pronósticos precisos en tiempo y forma. Las características físicas de magma tienen una gran influencia en la erupción que puede desarrollarse. La viscosidad del magma está determinada por la composición y temperatura, pero también por la concentración de gases disueltos y la presencia de cristales. La facilidad con que el gas puede salir del magma durante su descompresión es el resultado de su ascenso en el conducto y determina las características de la erupción en la superficie. Cuando el magma es más viscoso el gas se mantiene en el magma por más tiempo, siendo la erupción más explosiva y como consecuencia hay mayor riesgo. Aunque es imposible medir las características físicas como viscosidad directamente, mediante un sistema de monitoreo, experimentos en el laboratorio han proporcionado muchos datos para la generación de modelos del ascenso y desgasificación del magma.

Se presenta la mayoría de los datos de una red de vigilancia volcánica en la forma de una serie de tiempo, aunque la frecuencia de muestreo es muy variable (de 200 Hz en el caso de sismicidad hasta mensual por algo como muestreo de un manantial). Se comparan diferentes series en una forma cualitativa o aplicando la estadística para llegar a resultados validados. Muchos volcanes muestran comportamiento cíclico y la identificación de los patrones ayuda mucho para el pronóstico. Por ejemplo, Flower y Carn (2015) estudiaron la emisión de SO_2 y térmica del volcán Soufrière Hills, Montserrat, con series de tiempo de datos satelitales. Encontraron ciclos de diferentes periodos con la aplicación de métodos estadísticos.

Los modelos en vulcanología han avanzado mucho en años recientes (Kavanagh *et al*. 2018). Los modelos analógicos utilizan materiales diferentes para simular muchos procesos asociados al ascenso y erupción de magma. No es fácil realizar experimentos en el laboratorio con magma que tiene temperaturas en el rango 700 – 1200° C y la aplicación de otros materiales a escalas reducidas nos permite estudiar mucho de los procesos volcánicos. Los modelos numéricos se basan en teoría física y la aplicación de ecuaciones para describir un cierto proceso. Los modelos permiten la interpretación de los datos de una red de monitoreo.

4. Monitoreo del Volcán de Colima

El Volcán de Colima se caracteriza por erupciones frecuentes con una gran variación de características. Se puede decir que es uno de los volcanes con mayor actividad del mundo, basado en su producción de magma (2-3 km^3 cada 1000 años (Luhr y Carmichael, 1990)) y la frecuencia de erupciones plinianas o sub-plinianas (cuatro en los últimos cuatro siglos). La existencia de varias poblaciones cercanas obliga la inversión en una red de instrumentos para pronosticar los escenarios de riesgo. Aunque ha sufrido mucho en años recientes por una falta de presupuesto, por lo menos la red de sismógrafos es extensa y suficiente para realizar análisis avanzados de las ondas. Se presenta un resumen de los sistemas que forman la red de monitoreo, Varley (2019) presentó un análisis más detallado (Cuadro 1 y Figura 1).

El monitoreo empezó durante la década de 1980-1990 con los primeros sismómetros. La primera erupción monitoreada fue un evento efusivo en 1991 con el crecimiento de un domo, colapso del mismo y flujo de lava. Durante el periodo de actividad entre 1998 y 2011 hubo cinco fases de crecimiento de domos y la mayoría de estos años explosiones vulcanianas de baja magnitud. También hubo cuatro periodos de explosiones de mayor magnitud, el más importante fue en 2005, cuando ocurrieron 30 eventos que produjeron corrientes de densidad piroclástica que llegaron hasta 5.4 km del cráter (Varley *et al.* 2010). El periodo de actividad más reciente duró desde 2013 hasta los inicios de 2017 e incluyó varias fases efusivas con crecimiento de

domos y flujos de lava y periodos de mayor explosividad. El pico fue en julio de 2015, cuando una erupción sorprendió a las autoridades; un ascenso de magma ocurrió con una velocidad mayor que lo experimentado en los años más recientes. En lugar de una explosión típica, el nuevo material colapsó rápidamente y formó una corriente de densidad piroclástica de un gran volumen que siguió la barranca de Montegrande en la dirección sur. Hubo dos pulsos principales con una separación de 15 horas y los flujos llegaron hasta una distancia de más de 10 km del cráter.

Cuadro 1
Componentes de la red de monitoreo del Volcán de Colima

Técnica	Estaciones	Frecuencia de muestreo	Notas
Sismicidad	13	100 Hz	
Flujo de gas	N/A	Diario - semanal	Ubicación determinada por la dirección del viento
Geodesia - EDM	1	2 minutos	
Geoquímica – manantiales	4	Mensual	
Térmico	1	Hasta 1 imagen/seg.	Mediciones móviles de vuelos y de lugares fijos
Acústico	4	100 Hz	
Radón	2	15 minutos	
Combinado - lahares	2	Variable	Cámaras, geófonos, pluviómetros

Nota: la Universidad de Colima tiene la responsabilidad de la instalación y análisis de los datos. En el caso de las estaciones para monitoreo de lahares, la instalación ha sido por parte del Centro de Geociencias de la UNAM.

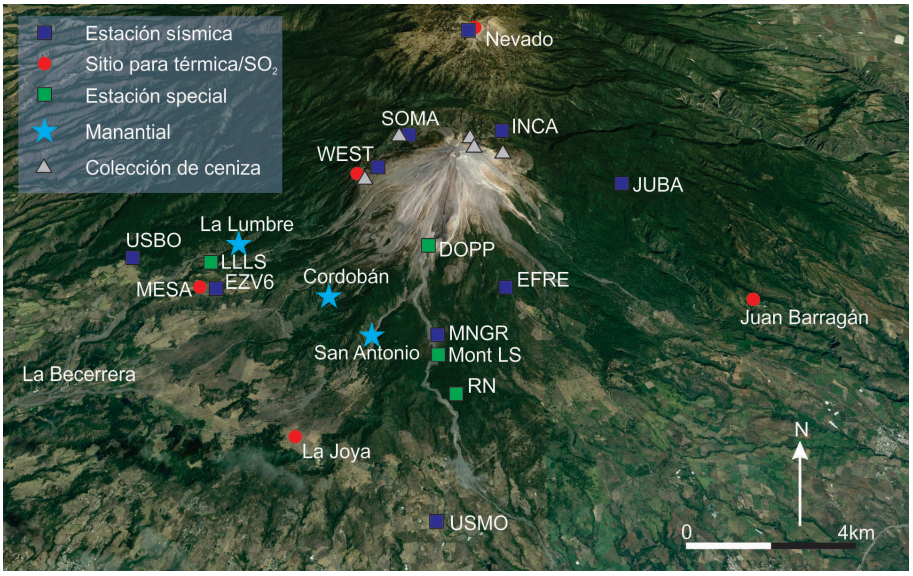
Fuente: elaboración propia.

En 2020, el sistema de monitoreo consiste en los equipos definidos en el cuadro 1. Debido a la situación económica actual, la red no está funcionado totalmente.

Durante los periodos recientes de actividad la red ha funcionado adecuadamente. La detección de precursores y los datos generados han facilitado la evaluación de los riesgos, basados en la definición del escenario con mayor probabilidad. En 2005 cada explosión vulcaniana de mayor magnitud fue pronosticada mediante la detección de enjambres de eventos sísmicos (Varley *et al.*, 2010).

La erupción de 2015 no fue anticipada y las acciones de mitigación de las autoridades no fueron iniciadas a tiempo. Las características de la erupción fueron diferentes de los eventos experimentados en años previos (Reyes *et al.* 2016) y aún falta una clara definición del mecanismo (Varley 2019). En 2016 ocurrió otro crecimiento de domo, pero no tuvo la rapidez del evento de 2015. Entonces, con la experiencia del evento de 2015, los científicos y autoridades actuaron con mejor coordinación y tiempo. Finalmente, la erupción no fue tan peligrosa como el año anterior.

Figura 1 – Mapa del sistema de monitoreo del Volcán de Colima



Fuente: elaboración propia.

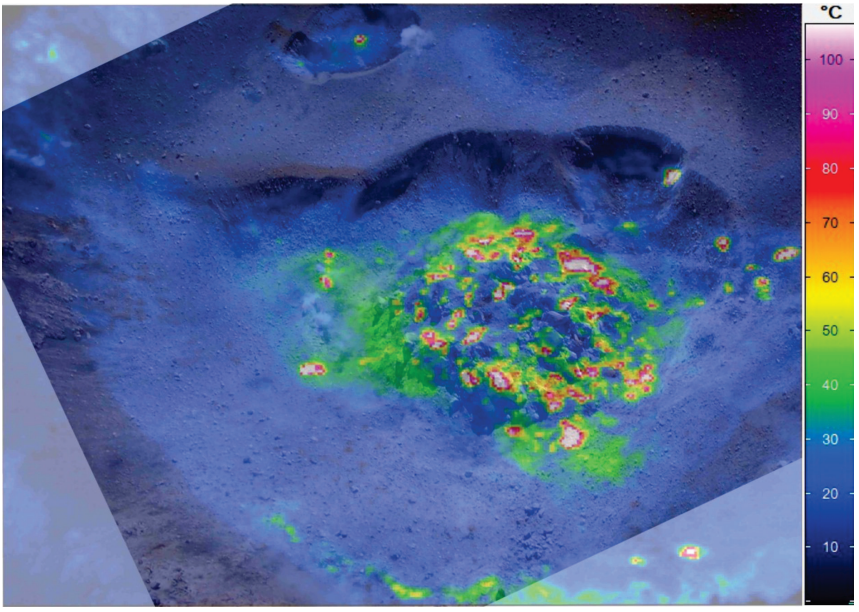
Durante los últimos años se ha logrado la integración de sensores acústicos en la red de Colima. Los datos han demostrado que el Volcán de Colima es un eficiente productor de infrasonido (Arámbula *et al.* 2020). En el futuro estos datos van a permitir una mejor caracterización de las explosiones y un seguimiento más completo de la evolución de la actividad. Ya existe una extensa base de datos de la energía sísmica producida por las explosiones del volcán. El análisis de los datos sísmicos está apoyado por un sistema automatizado que identifica el tipo de señal. Este tipo de herramienta es crítico en el caso de una crisis volcánica cuando no hay tiempo o recursos humanos para analizar la gran cantidad de datos en tiempo y forma.

Los caminos alrededor del Volcán de Colima no son ideales para la medición del flujo de SO_2 con un espectrómetro en la forma móvil. En años recientes se han realizado las mediciones en lugares fijos, generalmente midiendo un mayor flujo durante periodos de efusión con una correlación con la tasa de extrusión del magma. Los datos del flujo durante los periodos de explosiones vulcanianas frecuentes han permitido cuantificar del proceso de sellamiento del sistema.

Cada mes se visitan y muestrean cuatro manantiales que se ubican cerca del volcán. El análisis de la geoquímica de las aguas ha resultado en la identificación de un aumento en la concentración del boro entre 2 y 6 meses antes del inicio de un nuevo periodo de extrusión de magma. Durante el

ascenso de una columna de magma hacia la superficie, que es relativamente lento, la interacción con los acuíferos ocurre mucho antes de su llegada al cráter. El boro es un volátil presente en los gases magmáticos y la interacción resulta en una anomalía detectable en las aguas.

Figura 2. Imagen de la primera etapa de crecimiento del domo de febrero 2007, en el cráter del Volcán de Colima.



Fuente: elaboración propia.

El monitoreo térmico inició con el uso de una cámara móvil durante el registro de datos de sobrevuelos al cráter (Figura 2), ascensos a la orilla del mismo y desde puntos fijos alrededor del volcán. Una serie de tiempo generada de datos tomados desde la cima del Nevado de Colima (ubicado a pocos km al norte) mostró que las temperaturas de las fumarolas aumentaron mucho durante el periodo de actividad en 2005 (Stevenson y Varley 2008). Durante los años posteriores las temperaturas gradualmente disminuyeron, pero después aumentaron antes de algunos episodios de efusión. También se han observado cambios en la temperatura antes de algunas explosiones vulcanianas. Las variaciones en temperatura en el corto plazo reflejan cambios en el flujo de gases en las fracturas. El flujo dentro y alrededor de los domos está controlado por procesos de sellamiento, presurización y explosión. Kendrick *et al.* (2016) observaron evidencia en los bloques del domo de este proceso. Recientemente se ha instalado una cámara térmica fija con telemetría.

Estudios de la ceniza generada durante explosiones del Volcán de Colima han producido resultados interesantes. Sin los equipos necesarios en Colima para su análisis, es necesario enviar las muestras a laboratorios externos que resulta en más tiempo para obtener los resultados. Eso es un problema para el monitoreo, sin embargo, los resultados ayudan en la formulación de modelos de los procesos de ascenso, degasificación y cristalización de magma. Cassidy *et al.* (2015) mostraron que hay variaciones en las características de la ceniza que fueron interpretadas como evidencia de dos diversas fuentes de magma durante el periodo eruptivo.

5. 20 años de precursores identificados

El Volcán de Colima ha tenido dos periodos de actividad intensa en los últimos años: 1998 – 2011 y 2013 – 2017. Durante este periodo la red de vigilancia tuvo varios éxitos con la identificación de precursores acompañada una interpretación adecuada para inducir una respuesta de protección civil para reducir el riesgo en las comunidades (Cuadro 2).

Cuadro 2
Precursores identificados por la red del monitoreo del Volcán de Colima

Datos	Precursor	Actividad	Periodo
Sismicidad	Enjambres de eventos	Explosiones	2004,2005, 2013
Gases	Aumento del flujo de SO_2	Crecimiento del domo	1998, 2001, 2013
Manantiales	Aumento en boro	Crecimiento del domo	1998, 2001, 2004, 2013
Térmico	Aumento de la temperatura del cráter	Crecimiento del domo	2004
	Aumento de la temperatura de fumarolas	Explosiones	2004, 2005
Geoquímica de fumarolas	Relación de los isótopos de agua más magmática	Crecimiento del domo	1998

Fuente: elaboración propia.

6. Evaluación de las amenazas volcánicas

Una forma de representar una amenaza es el mapa de la zona que puede resultar afectada. Lo ideal son mapas en tres dimensiones o con ayuda de fotografías mostrando la zona en perspectiva (Haynes *et al.* 2007). Thompson *et al.* (2015) investigaron cuáles factores son los más importantes para que los mapas cumplan con su objetivo, y encontraron que el esquema de colores es muy importante y que se reconoció el valor de las curvas de probabilidad;

éstas muestran la probabilidad de un impacto, como una cantidad de ceniza, en una ubicación especifica durante un escenario eruptivo.

Los mapas de amenazas también ayudan en la planificación de emergencias para las autoridades de protección civil. En este caso, mapas muy específicos de una zona con un escenario en particular pueden dar la mejor información. Los científicos definirían el escenario basado en los datos de la red de monitoreo. Por ejemplo, un colapso de domo en crecimiento dirigido al oeste con un cierto volumen. Un mapa generado con una modelación de este escenario podría ayudar en la decisión de cuales poblaciones deben ser evacuadas por la posibilidad de amenaza de corrientes de densidad piroclástica. Un mapa probabilístico facilitaría cualquier decisión que tiene que tomar en cuenta la relación costo–beneficio.

En el caso del Volcán de Colima, como parte de la iniciativa para crear el Atlas de Riesgos Estatal, se generaron una serie de mapas para mostrar las zonas de impacto por todas las amenazas relacionadas a cuatro diferentes escenarios eruptivos. Los escenarios definidos fueron de lo más probable, que es actividad explosiva tipo vulcaniana o colapsos de domos, hasta un colapso parcial del edificio, que puede generar un enorme nivel de destrucción en la zona. Para generar la zonificación se aplicaron diferentes modelos por cada amenaza y se utilizaron metodologías estadísticas para estimar la probabilidad de afectación. Para la ceniza, hay diferentes mapas para el periodo de las lluvias y las secas porque el viento muestra una fuerte estacionalidad. El ejemplo en la Figura 3 muestra las zonas de afectación que corresponden a un escenario de una erupci**ón del nivel VEI 4 (índice de explosividad volcánico)** que es un evento Pliniano parecido de la erupción en 1913.

7. Generalidades de la comunicación del riesgo y sistemas de alerta temprana en la gestión del riesgo volcánico

Los conocimientos derivados y resultantes del monitoreo volcánico deben ser aplicados de manera clara y oportuna para que la población amenazada por el volcán y las autoridades adopten medidas para reducir la exposición al peligro de cada uno de los fenómenos volcánicos que puedan presentarse. De esta manera se pasa del terreno de las ciencias de la tierra al de las ciencias sociales, las ciencias del comportamiento humano, y las ciencias políticas y de la administración pública.

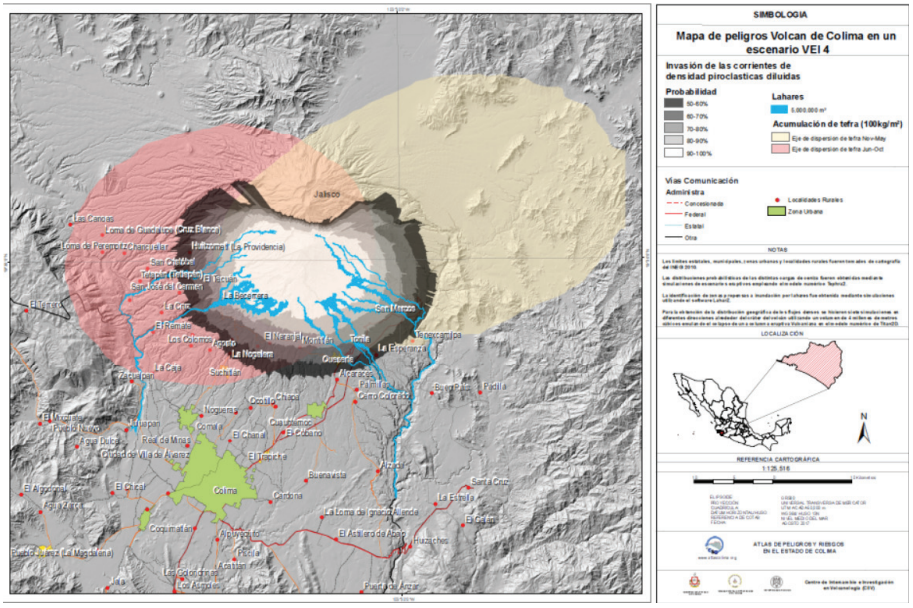
Es posible elaborar un plan integral de respuesta social a las emergencias volcánicas que resulte funcional si antes logramos la comprensión fundamental de al menos:

a) La teoría básica de la percepción del riesgo.

b) El rol de las comunidades en los procesos de riesgo-desastre.

c) Los principios básicos de comunicación del riesgo y de los sistemas de alerta temprana.

Figura 3 – Mapa de Peligros del Volcán de Colima considerando una erupción del nivel VEI 4



Nota: los tonos de gris corresponden a diferentes probabilidades por una inundación por una corriente de densidad piroclástica; los tonos rosa y beige representan áreas con una alta probabilidad de afectación por la caída de tefra; y las zonas azules tienen una alta probabilidad de inundación por lahares o flujos de lodo.

8. La percepción del riesgo

La percepción es multidimensional y depende del orden, clasificación y elaboración de sistemas de categorías con los que se compararon los estímulos que recibe el individuo, ya que constituyen los puntos de referencia conceptuales a través de los cuales se identifican experiencias sensoriales, transformándolas en eventos reconocibles y comprensibles dentro de la concepción colectiva de la realidad (Vargas 1994). La información se recibe del mundo real y se percibe en función de un proceso sociocultural en el que intervienen los valores del individuo, su personalidad, sus experiencias pasadas y su grado de exposición al riesgo, así como la situación social, económica y cultural. El concepto de percepción de riesgo se desarrolló durante la segunda mitad del siglo XX. Burton y White (1968) agregaron una nueva hipótesis en la que la percepción del riesgo incluye variables como la sabiduría cultural acumulada y factores económicos relacionados con la manera en que el público enfrenta el riesgo. Esto se aplicaría, por

ejemplo, al hecho de que la población a menudo permanece en zonas de alto riesgo debido tanto a la falta de alternativas como a su visión restringida al corto plazo generalmente determinada por duras condiciones económicas. Además, la visualización y la estimación del riesgo no solo están en función de la magnitud y de la frecuencia del peligro, sino también de la experiencia personal previa e incluso de factores relacionados con la personalidad de un individuo, entre otros.

El riesgo es una construcción social (Douglas 1986; Wijkman y Timberlake, 1984; Blaikie *et al.* 1996; y Quarantelli 2005), con mayor razón su percepción es un producto social y de por sí una construcción cultural, en donde dependiendo de la combinación particular, en espacio y tiempo de ciertos factores, se aceptan o no determinados riesgos (Thomas y Baró 2017).

Mediante los estudios de percepción del riesgo es posible conocer los conceptos que tiene la gente sobre el riesgo y las amenazas, así como entender mejor cómo y por qué la gente toma decisiones relativas al riesgo. También ayuda a conocer mejor la organización de las comunidades y así potenciar sus recursos aprovechando las organizaciones civiles que ya están funcionando en el lugar. Dicha potencialización ha sido considerada por Dynes (1993) como fundamental para el éxito de la gestión de las emergencias.

Para muchos la percepción del riesgo es útil en el pronóstico de la respuesta a una emergencia futura, lo cual es un argumento fundamental para implementar estudios de ese tipo antes de iniciar un programa de comunicación del riesgo o decidir qué tipo de Sistema de Alerta Temprana implementar.

Una parte importante de la teoría de la percepción del riesgo (Slovic 1982) establece que los considerados expertos, al igual que el público, suelen fallar en sus juicios, lo cual se considera normal, pero que en el caso de los expertos es considerado crítico porque son ellos quienes generalmente ejercen la toma de decisiones en situaciones de riesgo. El mismo autor también considera que se debería incluir la participación del público en los planes de mitigación de riesgo y que los esfuerzos de comunicación del riesgo están destinados a fallar a menos que estén estructurados como un proceso de intercambio de información bidireccional. Cada lado, tanto expertos como el público, tiene algo válido para contribuir, y debe respetar las ideas y la inteligencia del otro (Slovic 1987).

Los primeros estudios de percepción del riesgo volcánico en México fueron hechos en el Volcán de Colima en la década de 1980 por estudiantes y docentes de la Universidad Autónoma del Estado de México, encabezados por el profesor Jaime H. Graniel Graniel. Estos estudios demostraron que la población de las zonas más próximas al volcán carecía de información sobre las amenazas volcánicas y que la mayoría de dichos habitantes no les temía. Por su parte, entre 1997 y 2006, académicos de las universidades de Colima, Autónoma de San Luis Potosí, Nacional Autónoma de México y College London, así como de El Colegio de Michoacán, junto con la participación de

los sistemas estatales de protección civil de Colima y de Jalisco, realizaron estudios de percepción del riesgo en las comunidades más cercanas al Volcán de Colima. Después de una campaña de información de 2 años desarrollada en el contexto de estos estudios, la percepción del riesgo de las comunidades más vulnerables mejoró notablemente, logrando que la mayoría de la población reconociera las características y zonificación de las amenazas más letales. Sin embargo, también se identificó en algunas comunidades un aumento gradual en los niveles de desconfianza en las autoridades y en los científicos como consecuencia de desaciertos en las medidas gubernamentales de gestión del riesgo, especialmente por la reubicación de una comunidad en el estado de Colima. Se descubrió que los errores mencionados en la gestión del riesgo transformaron la aceptabilidad del riesgo de la población de al menos una comunidad (la más próxima al volcán), constituyendo un factor más influyente sobre la percepción del riesgo que la misma actividad volcánica explosiva (Gavilanes-Ruiz *et al*. 2009) e incrementando la resistencia a evacuar.

Un estudio de vulnerabilidad asociada al peligro del Volcán de Colima en su flanco sureste, en una localidad del estado de Colima y en otra de Jalisco, fue hecho por una académica del Colegio de Geografía de la UNAM durante 2016 y 2017. Se encontró que el 75% de la población entrevistada fue incapaz de situar su vivienda en el mapa de peligros (amenazas) del volcán, así como el hecho de que hay diferentes códigos de alerta implementados por las autoridades de protección civil en cada uno de los estados mencionados, así como una mayor carencia de medidas preventivas en el estado de Colima, todo en el marco de la vulnerabilidad institucional (Rodríguez Van Gort 2018). La autora clasificó como alta la vulnerabilidad de la población de esa zona, debido al bajo acceso a recursos médicos, hídricos y alimentarios.

9. El rol de las comunidades en los procesos de riesgo-desastre

Para poder comprender la importancia del rol social en los planes de emergencia y su respuesta, nos es útil conocer el modelo alternativo (o de participación de comunitaria) de Hewitt (1983) y su antítesis el "modelo dominante" de la gestión de emergencias. Este "modelo dominante" asume equivocadamente que en las emergencias las comunidades tienden a entrar en caos y que son incapaces de autoorganizarse, por lo que requieren del comando y control gubernamentales para ser salvadas. Por su parte, el sociólogo de desastres Russell Dynes, además de demostrar que las comunidades sí se pueden autoorganizar para responder a las emergencias, es otro de los representantes de la visión o modelo alternativo de los desastres. Este modelo ha demostrado que es totalmente necesaria la participación activa de las comunidades en los planes de emergencia, incluso desde su diseño, los cuales deben apegarse lo máximo posible a los patrones de rutina diaria, opiniones y cultura de las comunidades (Dynes 1997).

A finales de la década de 1990 la protección civil en los estados de Colima y de Jalisco dio algunos pasos importantes al respecto, ya que se formó el Grupo de Información a la Población sobre Riesgo Volcánico (GIOV), cuyo rol más importante fue el de tener presencia frecuente en las comunidades más cercanas al Volcán de Colima, conociendo sus principales actores sociales y formas de organización interna. Dicho grupo, al escuchar las inquietudes de varios ciudadanos de la zona, transmitían dicha información a las autoridades y a los científicos para mejorar la respuesta social. Menos de 5 días antes de la primera evacuación real por actividad volcánica (realizada el 18 de noviembre de 1998), el GIOV sugirió al pleno del Comité Científico Asesor del Volcán de Colima (que incluyó a las autoridades de protección civil de Colima y de Jalisco) se invitó a una sesión al comité científico y a varios campesinos de la comunidad más amenazada para que se enteraran y escucharan a los científicos del creciente estado de actividad del volcán y el mecanismo de toma de decisiones. Al menos seis campesinos asistieron a la reunión y al finalizar comunicaron al resto de la comunidad, La Yerbabuena que la situación era seria y que era mejor evacuar, decisión que secundaron prácticamente todos sus vecinos (Gavilanes-Ruiz *et al.* 2009).

Lamentablemente el GIOV se disolvió en 2002 y las actividades de reducción de riesgo basadas en la comunidad ya no tuvieron continuidad. Es importante destacar que el modelo político mexicano no incluye la participación real y activa de la población o de sus representantes directos y legítimos en los planes gubernamentales. En consecuencia, la protección civil mexicana no ha hecho una inclusión de las comunidades en la toma de decisiones o en el diseño de los planes de mitigación del riesgo, atención de emergencias o reconstrucción.

10. La comunicación del riesgo

La comunicación del riesgo constituye uno de los pilares clave de un programa de gestión o reducción del riesgo. El funcionamiento de un programa de comunicación del riesgo implementado mucho tiempo antes de la emergencia en el que participen las comunidades y sus principales actores sociales, científicos, técnicos y los gestores del riesgo, definirá el éxito de las medidas adaptativas ante las amenazas (p. ej., los sistemas de alerta temprana). La carencia de este programa, o un programa deficiente contribuirán al aumento de la vulnerabilidad. La comunicación del riesgo no consiste solamente en difundir información relativa al riesgo a la población, ni implementar un sistema de sirenas que avisen a la gente sobre alguna amenaza. Aunque ambas medidas son importantes, la comunicación del riesgo es mucho más extensa, compleja y estratégica. Es un proceso sociopolítico de intercambio de información, valores, acuerdos, opiniones y

cooperaciones a nivel intracomunitario y entre gobernantes, gobernados y demás actores sociales involucrados.

Desafortunadamente, muchos intentos bien intencionados de comunicación del riesgo se basan en la suposición de que la población de las áreas en riesgo no implementa las acciones protectoras que las autoridades les indican porque se da por hecho que la gente tiene una percepción equivocada de las amenazas y del peligro, es decir, que la gente "no cree que sea tan peligrosa" la situación. Entonces los gestores del riesgo asumen que solamente con difundir información científica sobre las amenazas "traducida a un nivel entendible" (lo cual dista mucho de ser un programa de comunicación del riesgo) será suficiente para que la gente adopte las acciones protectoras recomendadas (Lindell *et al.* 2006). Tal aproximación también niega la estructura social (comunidad) y el ambiente cultural en el que los procesos de comunicación están inmersos (Gudykunst 1998).

La comunicación del riesgo debería ser un proceso en el que los actores sociales compartan información sobre las amenazas que afectan a la comunidad. El uso del término "compartir" es importante porque los analistas del riesgo y los gestores de emergencias deben entender lo que piensan de una amenaza los diferentes segmentos de la población en riesgo, si es que quieren ser efectivos en comunicarse con su audiencia (Lindell *et al.* 2006). Los segmentos de la población los constituyen las empresas y los hogares vulnerables a una amenaza específica, así como el personal de la comunidad y de la industria responsable de gestionar una amenaza reduciendo el riesgo a un nivel aceptable para la comunidad.

Un programa de comunicación del riesgo debe componerse de una parte a largo plazo en la que se provea información sobre las amenazas potenciales y se apliquen medidas de organización mucho tiempo (años, meses o semanas) antes de que se presenten dichas amenazas o sean inminentes en días u horas, estableciendo acciones entre los actores sociales involucrados. Esta etapa es denominada por Lindell *et al.* (2006) en su libro publicado en el sitio web de la FEMA (Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los E.U.A.): *fase de amenaza continua o estable,* y algunas de las acciones que estos autores recomiendan son:

- Promover una relación de cooperación mutua con los medios masivos de comunicación.
- Consultar a los medios de comunicación con antelación qué tipo de información suelen requerir ante cierto escenario de riesgo y elaboran folletos y otro material informativo básico para cuando se dé el caso.
- Trabajar con asociaciones de vecinos y organizaciones civiles para hacerlos partícipes en la comunicación del riesgo.
- Contar con un "grupo de comunicación" constituido antes de las crisis.

- El "grupo de comunicación de crisis" o las autoridades deben contar con uno o varios voceros que gocen de credibilidad entre los diversos grupos de la comunidad, así como de suficiente capacidad técnica para servir de interlocutores entre los técnicos expertos y la población en riesgo.
- Las autoridades deben mejorar la información que dan mediante la observación de posibles inconsistencias mostradas en los medios de comunicación, considerando además las preguntas y comentarios del público durante conferencias informales (ej., asociaciones de vecinos y organizaciones civiles).
- Las autoridades deben tener un plan para aprovechar redes de comunicación informal (vecinos, parientes, compañeros de trabajo, de escuela, etc.) en la comunicación del riesgo.

Los mismos autores establecen el siguiente nivel de planificación de la comunicación del riesgo cuando la amenaza ya es inminente o está presente incluso de manera intermitente (durante periodos de intensificación de la actividad de un volcán, por ejemplo). Esta fase, denominada por Lindell y Perry (2004) como *fase de continuidad de la amenaza*, incluye las siguientes tareas:

Análisis estratégico

- Realizar un análisis de la amenaza/vulnerabilidad de la comunidad.
- Analizar el contexto comunitario.
- Identificar las percepciones principales de la comunidad sobre las amenazas y sus ajustes a ellas.
- Establecer objetivos apropiados para el programa de comunicación del riesgo.

Análisis operacional

- Identificar y evaluar posibles ajustes a las amenazas para la comunidad y sus viviendas y empresas.
- Identificar las maneras de proveer incentivos, sanciones e innovaciones tecnológicas.
- Identificar las fuentes de comunicación del riesgo disponibles en la comunidad.
- Identificar los canales de comunicación del riesgo disponibles en la comunidad.
- Identificar segmentos de audiencia específicos.

Movilización de recursos

- Obtener el apoyo de representantes y funcionarios electos.
- Enlistar la participación de otras agencias de gobierno.
- Enlistar la participación de ONG (no lucrativas) y organizaciones del sector privado.
- Trabajar con los medios masivos de comunicación.

- Trabajar con asociaciones de vecinos y organizaciones de servicios.

Programa de desarrollo para todas las fases

- Formación y entrenamiento de un equipo de comunicación de crisis.
- Establecer procedimientos para mantener un flujo de comunicación efectivo en una escalada de crisis y en una respuesta de emergencia.
- Desarrollar un programa inclusivo de comunicación del riesgo.
- Hacer un plan para aprovechar redes de comunicación informal.
- Establecer procedimientos para obtener una retroalimentación de los medios de comunicación y del público.

Implementación del programa para la fase de la continuidad de la amenaza

- Construir la credibilidad de la fuente mediante el mejoramiento de la percepción de la experiencia y confiabilidad.
- Utilizar canales variados para difundir la información sobre las amenazas.
- Describir los ajustes a la amenaza por parte de la comunidad o de las instalaciones que estén siendo planeados o implementados.
- Describir los posibles ajustes de las viviendas a la amenaza.
- Evaluar la efectividad del programa.

En el Volcán de Colima el Grupo de Información a la Población sobre Riesgo Volcánico junto con las autoridades de protección civil instituyeron a finales de la década de 1990 un programa de información que ciertamente implementó algunas medidas novedosas que se encuentran en las listas que acabamos de leer. Dicho grupo además fue pionero nacional como interfaz entre autoridades, científicos y las comunidades, mejoró la comunicación recíproca entre actores sociales, al menos por un breve periodo.

De las medidas o tareas especificadas en las *fases de amenaza continua o estable y de continuidad de la amenaza*, menos de la quinta parte (en el mejor de los casos) se han aplicado en México y varias de ellas incluso han sido aplicadas de manera contraria por la protección civil durante periodos de emergencia (el uso de varios canales de comunicación o aprovechar aliados de las propias comunidades en la comunicación del riesgo, por mencionar algunos).

Nos queda claro que un programa de comunicación del riesgo no es solamente dar conferencias de prensa, emitir boletines, dar pláticas a la gente o difundir avisos por medios masivos de comunicación. Es un proceso mucho más complejo que requiere de la interacción con las comunidades. Tampoco es algo que se improvisa ante una crisis en ciernes. La realidad es que en México no ha habido por décadas, ni parece haber interés en desarrollar, programas de comunicación del riesgo institucionalizados y formales dentro de la política nacional de protección civil.

11. Los sistemas de alerta temprana

Un sistema de alerta temprana (SAT) puede entenderse como un conjunto organizado de elementos (organizacionales, tecnológicos) y actores (científicos, funcionarios, etc.) que interactúan desde diferentes niveles y funciones con un propósito común, que es salvar la vida de las personas que están sujetas a un fenómeno potencialmente destructivo, que requiere anticipar su aparición y evolución (Macías 2018).

La Estrategia Internacional de Reducción de Riesgo de Desastres ha adoptado una propuesta para promover los Sistemas de Alerta Temprana Basados en la Población, a partir de cuatro elementos que deben trascender en la comprensión, aceptación y participación por parte de la población en riesgo: a) conocimiento del riesgo; b) servicios de monitoreo y alerta; c) difusión y comunicación; y d) capacidad de respuesta (UNISDR, 2006).

La teoría de los sistemas de alerta (Mileti y Sorensen 1989) establece que un sistema de advertencia o alerta no puede funcionar si la información básica acerca del riesgo y el impacto de peligro no es recibida no solamente por los gestores de emergencias, sino también por la población en riesgo, que debe estar completamente convencida de la veracidad de las advertencias y ser capaz de convertir los mensajes en acciones de autoprotección. Los SAT nos son eventos, sino procesos complejos.

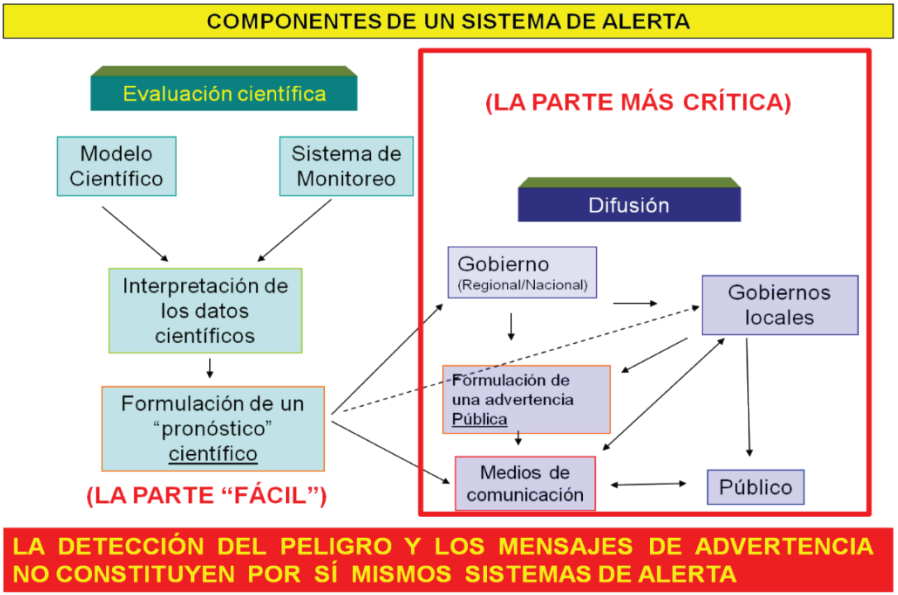
Un SAT no se constituye solamente de un sistema de aviso de peligro (sistema de monitoreo de amenazas o detectores de peligro, es decir, un arreglo tecnológico) que pude terminar en, digamos, un sistema de sirenas, sino de un mucho más complejo subsistema de difusión y comprensión del mensaje de advertencia (Figura 4).

En el Volcán de Colima opera el grupo científico con más experiencia en monitoreo volcánico de México, contando con varios pronósticos exitosos de erupciones. No obstante, el monitoreo ha tenido serios problemas de financiamiento, especialmente para mantenimiento y operación de equipos, además de falta de personal calificado para mantener un monitoreo las 24 horas de cada día (Rodríguez 2019). En general dicho grupo ha mantenido excelente relación con las autoridades de protección Civil, tanto de Colima como de Jalisco, lo cual es relevante si consideramos que en otras partes del mundo esa relación suele ser problemática.

En Colima debería funcionar un amplio y permanente programa de comunicación del riesgo para incrementar la eficiencia del SAT volcánica actual, el cual por sí solo no asegura una eficiente reacción autoprotectora dentro de las comunidades (Rodríguez 2019). En ese sistema, la organización social comunitaria y sus saberes aún están subdimensionados por las autoridades y las conceptualizaciones del público deben ser consideradas (Gavilanes-Ruiz 2013). También se han dado varias alarmas falsas

relacionadas con la actividad volcánica con sus resultantes evacuaciones, lo cual ha incrementado los niveles de desconfianza de los evacuados en autoridades y científicos, ya que las autoridades no han dado las explicaciones respectivas al público (Gavilanes *et al*. 2009).

Figura 4. Esquema de los elementos de un verdadero sistema de alerta temprana



Nota: la parte relativamente más simple y costosa en equipo de alta tecnología es la de la izquierda, y la más compleja, frecuentemente decisiva y relativamente "barata" es la de la derecha. Cortesía del Dr. Joseph Trainor, director del Programa de Ciencia y Gestión de Desastres de la Universidad de Delaware.

En México es indispensable que los SAT formen parte de programas de comunicación del riesgo. Esto es crítico si consideramos que estos programas son prácticamente inexistente. En nuestro país hay un gran problema: cuando se diseña un SAT existe poca o nula consideración de los factores sociales de las comunidades en riesgo y de las conceptualizaciones (percepción) que sobre dicho sistema tienen sus habitantes (Macías 2018; Gavilanes-Ruiz *et al*. 2009; Macías y Aguirre 2006,). Otro problema es que se ha omitido sistemáticamente consultar con la población o considerar los procesos de comunicación internos de las comunidades antes de poner en marcha un sistema de aviso de emergencia (comúnmente denominado SAT, aunque solo sea un sistema de aviso de peligro, por lo general altamente tecnificado y costoso) para ver si es compatible con las necesidades de la población y con los niveles de credibilidad antes de comprar equipos de alta tecnología sumamente costosos (Gavilanes-Ruiz 2013; Macías 2018).

Estos sistemas han sido diseñados sin considerar los más importantes factores sociales que definen su eficacia, como la participación o consideración de las comunidades en su diseño y operación. Por lo tanto, si nos apegamos a la teoría de los SAT y particularmente a las características que recomienda la EIRD (SAT basados en la población), estos sistemas no cumplirían con los requisitos necesarios para ser considerado como tales, ya que difícilmente promoverían la toma de acciones adaptativas por parte de la población (Gavilanes-Ruiz 2013).

Es indispensable que todos los actores sociales involucrados en la gestión del riesgo tengan una comprensión básica de la cultura, percepción y representación social de los habitantes de las comunidades de las zonas de alto riesgo para que puedan diseñar planes verdaderamente útiles para la prevención, siendo vital que la población participe activamente para mejorar la gestión del riesgo (Cuevas-Muñiz y Gavilanes-Ruiz 2018; Rodríguez 2019).

Bibliografía

Arámbula-Mendoza, R., Varley, N., García-Flores, R., Vargas-Bracamontes, D.M., Navarro-Ochoa, C., Márquez-Ramírez, V.H., Capra, L., González-Amezcua, M., Martínez-Fierros, A. and Ramírez-Vázquez, C.A., 2020. "Destruction of a lava dome observed with photogrammetry, acoustic and seismic sensors at Volcan de Colima, Mexico". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 395: 106834.

Blaikie T., Cannon P., Davis I., Wiesner B., 1996. "Vulnerabilidad: el entorno social, político y económico de los desastres". *LA RED*. Perú.

Bartolini, S., Sobradelo, R. and Martí, J., 2016. "ST-HASSET for volcanic hazard assessment: A Python tool for evaluating the evolution of unrest indicators". *Computers & Geosciences*, 93: 77-87.

Burton, I. and White, G.F., 1968. "The human ecology of extreme geophysical events". *Natural Hazards Research*, Working paper Num. 1, Department of Geography, University of Toronto.

Cardellini, C., Chiodini, G., Frondini, F., Avino, R., Bagnato, E., Caliro, S., Lelli, M. and Rosiello, A., 2017. "Monitoring diffuse volcanic degassing during volcanic unrests: the case of Campi Flegrei (Italy"). *Scientific Reports,* 7(1): 6757.

Cassidy, M., Cole, P.D., Hicks, K.E., Varley, N.R., Peters, N. and Lerner, A.H., 2015. "Rapid and slow: Varying magma ascent rates as a mechanism for Vulcanian explosions". *Earth Plan*. Sci. Lett., 420(0): 73-84.

Coppola, D., Laiolo, M., Cigolini, C., Massimetti, F., Delle Donne, D., Ripepe, M., Arias, H., Barsotti, S., Parra, C.B., Centeno, R.G., Cevuard, S., Chigna, G., Chun, C., Garaebiti, E., Gonzales, D., Griswold, J., Juarez, J., Lara, L.E., López, C.M., Macedo, O., Mahinda, C., Ogburn, S., Prambada, O., Ramon, P., Ramos, D., Peltier, A., Saunders, S., de Zeeuw-van Dalfsen, E., Varley, N. and William, R., 2020. "Thermal Remote Sensing for Global Volcano Monitoring": Experiences from the MIROVA System. Frontiers en *Earth Science*, 7(362).

Costa, F., Andreastuti, S., Bouvet de Maisonneuve, C. and Pallister, J.S., 2013. "Petrological insights into the storage conditions, and magmatic processes that yielded the centennial 2010 Merapi explosive eruption". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261(0): 209-235.

Cuevas-Muñiz, A. and Gavilanes-Ruiz, J.C., 2018. "Social Representation of Human Resettlement Associated with Risk from Volcán de Colima, Mexico". En: C.J. Fearnley, D.K. Bird, K. Haynes, W.J. McGuire and G. Jolly (Editors), *Observing the Volcano World: Volcano Crisis Communication. Springer International Publishing,* Cham, pp. 321-334.

De Moor, J.M., Aiuppa, A., Pacheco, J., Avard, G., Kern, C., Liuzzo, M., Martínez, M., Giudice, G. and Fischer, T.P., 2016. "Short-period volcanic gas precursors to phreatic eruptions: Insights from Poás Volcano, Costa Rica". *Earth and Planetary Science Letters*, 442: 218-227.

Douglas, M., 1986. *Risk Acceptability According to the Social Sciences*, Russell Sage Foundation, Nueva York.

Douglas, M., 1996. *La aceptabilidad del riesgo según las ciencias sociales*. Paidós, Barcelona. 176 pp.

Dynes, Russell R., 1997. "La planificación de emergencias en comunidades: falsos supuestos y analogías inapropiadas". *Cuadernos de Extensión*, No. 2. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla CUPREDER. (Traducción de Jesús Manuel Macías Medrano al español del artículo publicado en: *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 1994, agosto, No.2)

Dzurisin, D., 2003. "A comprehensive approach to monitoring volcano deformation as a window on the eruption cycle". *Reviews of Geophysics*, 41(1).

Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, 2008. "Las Alertas Tempranas". En: *La Gestión del Riesgo de Desastres, Hoy*. Contextos globales, herramientas locales. ONU, 151-58, 209 pp.

Flower, V.J.B. and Carn, S.A., 2015." Characterising volcanic cycles at Soufrière Hills Volcano, Montserrat: Time series analysis of multi-parameter satellite data". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304: 82-93.

Fuji, T. y Yamasato, H., 2015. "Chapter 18 - Integrated Monitoring of Japanese Volcanoes". En: J.F. Shroder and P. Papale (Editors), *Volcanic Hazards, Risks and Disasters*. Elsevier, Boston, pp. 445-459.

Garthwaite, M.C., Miller, V.L., Saunders, S., Parks, M.M., Hu, G. and Parker, A.L., 2019. "A Simplified Approach to Operational InSAR Monitoring of Volcano Deformation in Low- and Middle-Income Countries: Case Study of Rabaul Caldera, Papua New Guinea". *Frontiers in Earth Science*, 6(240).

Gavilanes-Ruiz J.C., Cuevas-Muñiz A., Varley N., Gwynne G., Stevenson J., Saucedo-Girón R., Pérez-Pérez A., Aboukhalil M., Cortés-Cortés A., 2009. "Exploring the factors that influence the perception of risk: The case of Volcán de Colima, Mexico". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 186, 238–252. ISSN 0377-0273

Gavilanes-Ruiz, J.C. 2013. “Roles y conceptualizaciones de los actores sociales en la eficiencia de los sistemas de alerta temprana por tsunamis y lahares en Colima y el sur de Jalisco”. X Coloquio del Doctorado en Geografía: From 11th to 15th of November 2013.

Gavilanes, Juan Carlos, 2015. Disponible en: http://posgrado.aplikart.com/coloquio/assets/juan_carlos_gavilanes_ruiz.pdf. Consultado el 19 marzo de 2015.

Gudykunst, W. B. 1998. *Bridging differences: Effective intergroup communication*. Thousand Oaks, CA: Sage.

Haynes, K., Barclay, J. and Pidgeon, N., 2007. “Volcanic hazard communication using maps: an evaluation of their effectiveness”. *Bulletin of Volcanology*, 70(2): 123-138.

Hewitt, K., 1983. “The idea of calamity in a technocratic age”. En: Hewitt, K. (Ed.), *Interpretation of Calamities. The Risks and Hazards series No. 1*. Allen & Unwin Inc, Boston, pp. 3–32.

Johnson, J.B. and Ripepe, M., 2011. “Volcano infrasound: A review”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206(3-4): 61-69.

Kavanagh, J.L., Engwell, S.L. and Martin, S.A., 2018. “A review of laboratory and numerical modelling in volcanology”. *Solid Earth*, 9(2): 531-571.

Kendrick, J.E., Lavallée, Y., Varley, N., Wadsworth, F.B., Lamb, O.D. and Vasseur, J., 2016. “Blowing off steam: Tuffisite formation as a regulator for lava dome eruptions”. *Frontiers in Earth Science*, 4.

Lindell, Michael K., Prater, Carla S., Perry, Ronald W., Nicholson W.C., 2006. “Fundamentals of Emergency Management. Federal Emergency Management Agency, USA. Chapter 4: Risk Perception and Communication”. http://training.fema.gov/hiedu/aemrc/booksdownload/fem/

Liu, E.J., Cashman, K.V. and Rust, A.C., 2015. “Optimising shape analysis to quantify volcanic ash morphology”. *GeoResJ*, 8: 14-30.

Luhr, J.F. and Carmichael, I.S.E., 1990. “Petrological monitoring of cyclical eruptive activity at Volcan Colima, Mexico”. *J. Volcan. & Geotherm*. Res., 42: 235-260.

Macías, J., Aguirre, B.: 2006. “A critical evaluation of the United Nations volcanic emergency management system: evidence from Latin America”. *J. Int. Aff.Spring/Summer* 59, 43–61 (2006)

Macías-Medrano J.M., 2018. “Social-Individual Behaviour Problems Regarding Early Warning Systems against Disasters”. En Preventing Health and Environmental Risks en Latin America”. Marván, M.L. y López-Vázquez E. (Eds.), *Springer*. ISBN 978-3-319-73799-7.

Marzocchi, W., Sandri, L. and Selva, J., 2008. “BET_EF: a probabilistic tool for long and short-term eruption forecasting”. *Bull Volcanol,* 70: 623-632.

McGonigle, A.J.S., Pering, T.D., Wilkes, T.C., Tamburello, G., D’Aleo, R., Bitetto, M., Aiuppa, A. and Willmott, J.R., 2017. “Ultraviolet Imaging of Volcanic Plumes: A New Paradigm in Volcanology”. *Geosciences*, 7(3): 68.

McNutt SR (1996) “Seismic monitoring of volcanoes: A review of the state-of-the-art and recent trends. In: Scarpa R, Tilling R (eds) Monitoring and mitigation of volcano hazards”, Chapter 3, *Springer-Verlag*, Berlin, pp 99–146.

Mileti y Sorensen, 1989. “La eficacia de los sistemas de alarma en América Latina”. (Capítulo 13). En: Consecuencias psicosociales de los desastres: La experiencia latinoamericana. *Serie de monografías clínicas* No. 2. 1989. Programa de Cooperación Internacional en Salud Mental “Simón Bolívar”.

Napoli, R., Currenti, G., Del Negro, C., Greco, F. and Scandura, D., 2008. “Volcanomagnetic evidence of the magmatic intrusion on 13th May 2008 Etna eruption”. *Geophys*. Res. Lett., 35.

Pesicek, J.D., Wellik, J.J., Prejean, S.G. and Ogburn, S.E., 2018. “Prevalence of Seismic Rate Anomalies Preceding Volcanic Eruptions in Alaska”. *Frontiers in Earth Science*, 6(100).

Phillipson, G., Sobradelo, R. and Gottsmann, J., 2013. “Global volcanic unrest in the 21st century: An analysis of the first decade”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 264(0): 183-196.

Quarantelli, E. 2005. “A Social Science Research Agenda for the Disaster of the 21st Century” en Perry and Quarantelli (Ed.) *What is a Disaster?* Xlibris, USA.

Queißer, M., Burton, M. and Kazahaya, R., 2019. “Insights into geological processes with CO_2 remote sensing – A review of technology and applications”. *Earth-Science Reviews*, 188: 389-426.

Reyes-Dávila, G.A., Arámbula-Mendoza, R., Espinasa-Pereña, R., Pankhurst, M.J., Navarro-Ochoa, C., Savov, I., Vargas-Bracamontes, D.M., Cortés-Cortés, A., Gutiérrez-Martínez, C., Valdés-González, C., Domínguez-Reyes, T., González-Amezcua, M., Martínez-Fierros, A., Ramírez-Vázquez, C.A., Cárdenas-González, L., Castañeda-Bastida, E., Vázquez Espinoza de los Monteros, D.M., Nieto-Torres, A., Campion, R., Courtois, L. and Lee, P.D., 2016. “Volcán de Colima dome collapse of July, 2015 and associated pyroclastic density currents”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 320: 100-106.

Rodríguez García H.I.R., 2019. “Civil Protection and Volcanic Risk Management in Colima”. En: Varley N., Connor C., Komorowski JC. (eds) Volcán de Colima. Active Volcanoes of the World. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25911-1_10

Rodríguez Van Gort, M.F., 2018. “Vulnerabilidad ante peligro volcánico asociado al Volcán de Fuego de Colima en las localidades de Quesería, Colima y Tonila, Jalisco” p. 145-162, en Salinas S. y García N., Eds., Análisis de la vulnerabilidad social desde un enfoque multidisciplinario, Editorial Porrúa, 238 p. ISBN: 978-607-515-3636.

Slovic, P., Fischhoff, B., Lichtenstein, S., 1982. “Why study risk perception?” Risk Analysis 2 (2), 83–93.

Slovic, P., 1987. “Perception of risk”. Science 236, 280–285.

Spampinato, L., Calvari, S., Oppenheimer, C. and Boschi, E., 2011. "Volcano surveillance using infrared cameras". Earth-Science Reviews, 106(1-2): 63-91.

Sparks, R.S.J., 2003. "Dynamics of magma degassing". En: C. Oppenheimer, D.M. Pyle and J. Barclay (Editors), Volcanic Degassing. Geological Society, London, pp. 5-22.

Stevenson, J.A. and Varley, N., 2008. "Fumarole monitoring with a handheld infrared camera: Volcán de Colima, Mexico, 2006-2007". Journal of Volcanology and Geothermal Research, 177(4): 911-924.

Thomas J.E. y Baró J.E., 2018. "Gestión Social de Riesgos Socionaturales. Construyendo escenarios de futuro", p. 283-312. En Enfrentando los Riesgos Socionaturales, Baró Suárez J.E. y Monroy Gaytán F., (Eds). Ed. Clave Editorial. ISBN: 978-607-437-457-5, 383 p.

UNISDR, 2006. "Global Survey of Early Warning Systems. An assessment of capacities, gaps and opportunities toward building a comprehensive global early warning system for all-natural hazards". Report prepared at the request of the Secretary-General of the United Nations. Ginebra. http://www.unisdr.org/2006/ppew/info-resources/ewc3/Global-Survey-of-Early-Warning-Systems.pdf. Accessed May 15, 2008.

Vargas, L.M., 1994." Sobre el concepto de percepción". Revista Efemérides. Universidad Autónoma Metropolitana, pp. 47–53. Año 4, No. 8.

Varley, N., Arámbula-Mendoza, R., Reyes-Dávila, G., Stevenson, J. and Harwood, R., 2010. "Long-period seismicity during magma movement at Volcán de Colima". Bull Volcanol, 72(9): 1093-1107.

Varley, N., 2017. "Volcanoes of Mexico". En: R.A. Meyers (Editor), Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. Springer, New York, NY, pp. 1-24.

Varley, N.R., 2019. "Monitoring the Recent Activity: Understanding a Complex System". En: N.R. Varley, C. Connor and J.-C. Komorowski (Editors), Volcán de Colima: portrait of a persistently hazardous volcano. Active Volcanoes of the World. Springer, Berlin, Germany, pp. 159-193.

Villemant, B., Komorowski, J.C., Dessert, C., Michel, A., Crispi, O., Hammouya, G., Beauducel, F. and De Chabalier, J.B., 2014. "Evidence for a new shallow magma intrusion at La Soufrière of Guadeloupe (Lesser Antilles): Insights from long-term geochemical monitoring of halogen-rich hydrothermal fluids". Journal of Volcanology and Geothermal Research, 285(0): 247-277.

White, R.A. and McCausland, W.A., 2019. "A process-based model of pre-eruption seismicity patterns and its use for eruption forecasting at dormant stratovolcanoes". Journal of Volcanology and Geothermal Research, 382: 267-297.

Wijkman, A. and Timberlake L. 1984. "Natural disasters". *Acts of God or acts of Man?* IIED, Earthscan, UK.

Zlotnicki, J., Sasai, Y., Toutain, J.P., Villacorte, E., Harada, M., Yvetot, P., Fauquet, F., Bernard, A. and Nagao, T., 2009. "Electromagnetic and geochemical methods applied to investigations of hydrothermal/volcanic unrests: Examples of Taal (Philippines) and Miyake-jima (Japan) volcanoes". *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, 34(6-7): 394-408.

2.2. Estudio y monitoreo de volcanes activos en México

Amiel Nieto Torres

Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México

María del Carmen Jaimes Viera

Centro de Geociencias
Universidad Nacional Autónoma de México

Anaid Pérez Pérez

Facultad de Geografía,
Universidad Autónoma del Estado de México

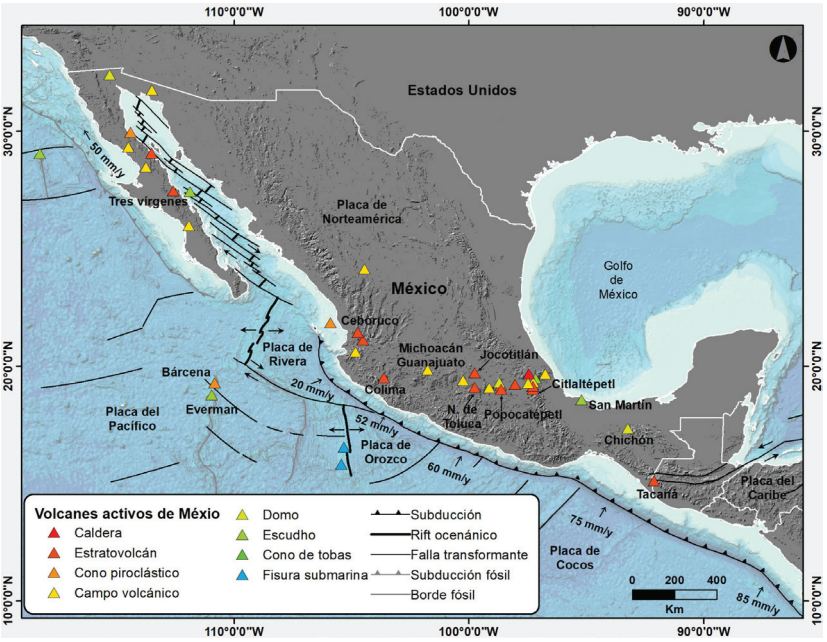
Introducción

Un volcán es considerado activo si existen evidencias, a partir de estudios geológicos detallados, de que hizo erupción en los últimos 10,000 años. Un volcán está en erupción cuando emite gases, lava y/o fragmentos sólidos, pero si no ha presentado emisiones recientes se dice que está en reposo y puede mantenerse en este estado por meses, años, décadas y hasta varios siglos. Se considera que un volcán es inactivo cuando no ha hecho erupción por más de 10,000 años, suele estar erosionado y puede no ser reconocible como volcán. Nuevos estudios pueden modificar la clasificación de un volcán.

En México existen cerca de 2,000 edificios volcánicos que varían en su forma y en su manera de hacer erupción. De estos, han presentado actividad histórica los volcanes Tres Vírgenes, Bárcena, Evermann, Ceboruco, Fuego de Colima, el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (volcanes Jorullo y Parícutin), Popocatépetl, Citlaltépetl, San Martin Tuxtla, Chichón y Tacaná. Según los registros geológicos, varios otros volcanes y campos volcánicos han presentado actividad en los últimos 10,000 años, por lo que se pueden considerar activos. Además, algunas calderas, cuyo periodo de retorno es mucho mayor, han presentado actividad durante los últimos 100,000 años y aunque es poco probable, podrían reactivarse nuevamente. Se considera, por lo tanto, que en México existen 48 volcanes activos, de

los cuales 30 son estratovolcanes o volcanes compuestos, 15 campos monogenéticos y 3 calderas que pueden considerarse potencialmente activos. De estos 48 volcanes considerados activos, 14 han presentado actividad histórica (Figura 1). Además, varios volcanes muy cercanos a nuestras fronteras norte (*Salton Buttes*, en EUA) y sur (Tajumulco, Fuego y Santiaguito, en Guatemala) pueden llegar a afectar territorio mexicano.

Figura 1. Localización de los volcanes activos de México



Nota: se muestra también el ambiente tectónico. Fuente: elaboración propia.

El monitoreo volcánico

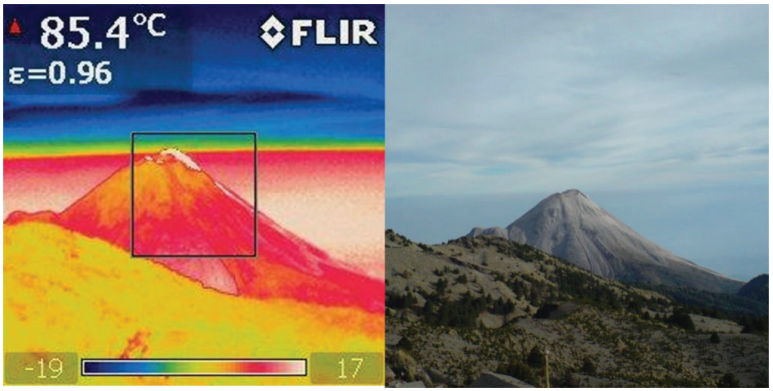
El monitoreo volcánico consiste en la observación continua y permanente del volcán por medio de instrumentos especializados. El monitoreo implica el reconocimiento e interpretación de los cambios que ocurren en el volcán, a estos cambios se les conocen como precursores. La identificación a tiempo de estos precursores permitirá accionar una serie de medidas encaminadas a la protección de la ciudadanía ante un incremento de la actividad volcánica que represente una potencial amenaza a la vida y a los bienes de las personas, tareas fundamentales de la protección civil. Las distintas técnicas de monitoreo volcánico se dividen en:

Monitoreo Visual

Es el monitoreo más básico que existe y consiste en la observación visual directa de la actividad del volcán. En algunos países donde el acceso a los recursos es limitado, el monitoreo visual se basa en la labor directa de observadores que se encuentran en campo. Estos observadores son personas que habitan en las comunidades cercanas alrededor de los volcanes a las que se les encomienda dar aviso al observatorio vulcanológico encargado en caso de observar algún cambio en la actividad del volcán. Cuando se cuenta con recursos o se hacen alianzas con empresas privadas, se instalan cámaras que transmiten en tiempo real imágenes del volcán hacia el observatorio. Muchas veces estas imágenes están abiertas al público en general como en el caso de los volcanes de Colima y Popocatépetl en México. La distribución de las cámaras instaladas alrededor de los volcanes debe satisfacer objetivos específicos de observación. Si es posible se deben instalar cámaras que observen al interior del cráter para poder identificar si se presenta ascenso de magma. Cuando debido a las condiciones topográficas de los volcanes, no es posible instalar cámaras que observen al interior del cráter, entonces se instalan cámaras que permitan reconocer la distribución de nubes de ceniza, la generación de flujos piroclásticos y/o lahares, derrumbes de rocas, entre otros. Se deben priorizar, además, aquellos flancos del volcán donde la actividad externa del volcán sea mayor, tomando en cuenta las limitaciones de acceso, de telecomunicaciones, así como las condiciones climáticas imperantes en los distintos flancos del volcán.

Actualmente, este tipo de monitoreo se ha modernizado con la instalación de sofisticadas cámaras térmicas, infrarrojas y UV que permiten ampliar el rango de observación de fenómenos que no son visibles a simple vista, como la emisión de algunos gases volcánicos. Además, este tipo de cámaras permite medir la temperatura relativa de los materiales emitidos por el volcán, un parámetro útil en el monitoreo. En México, únicamente el volcán de Colima es monitoreado de manera permanente con cámaras térmicas (Figura 2), mientras que en el Popocatépetl se llevan a cabo mediciones de gases y de temperatura en campañas ocasionales que permiten dar seguimiento a las variaciones de la actividad volcánica. El monitoreo visual en México se complementa con sobrevuelos en aeronaves que son proporcionadas por la Secretaría de Marina, la Guardia Nacional y en algunos casos los gobiernos de los estados involucrados, en coordinación con las autoridades de protección civil. En estos sobrevuelos se realizan reconocimientos visuales directos de las condiciones en el interior del cráter y las condiciones de las barrancas que nacen en los flancos de los volcanes (Figura 3).

Figura 2. Imagen térmica del Volcán de Colima



Nota: la imagen del lado izquierdo fue capturada con cámara infra roja portátil marca Flir, al lado derecho imagen visible del mismo ángulo; ambas tomas son de la estación Nevado de Colima en mayo de 2013. Fuente: fotografías tomadas por Nieto Torres.

Figura 3. Ejemplos de monitoreo visual del volcán Popocatépetl

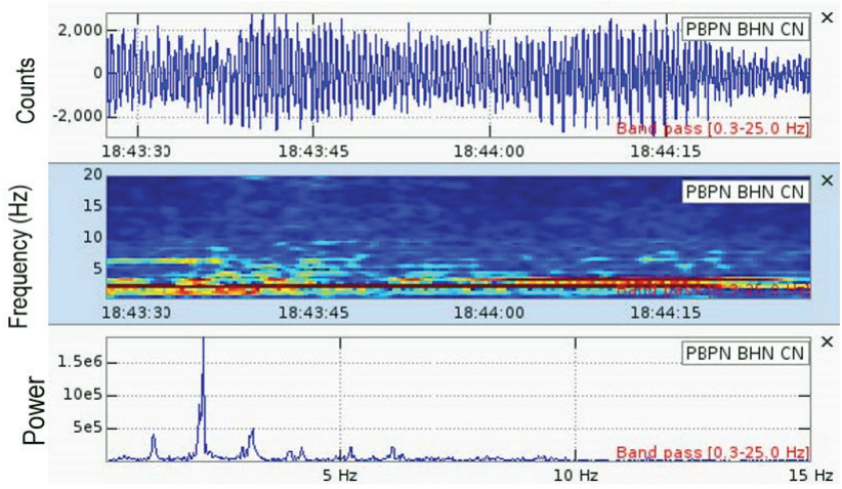
Nota: de izquierda a derecha imagen de sobrevuelo realizado el 23 de diciembre 2019; la segunda imagen corresponde a una transmisión en vivo realizada por una cámara del sitio Webcams de México 21:41:04 horas del 24 de abril de 2020; la tercera imagen corresponde con la transmisión de la cámara localizada en la estación Altzomoni de 23 de abril de 2020. Fuente: fotografías proporcionadas por el CENAPRED, 2020.

Monitoreo Sísmico

Cuando el magma y los gases volcánicos se mueven en el interior del volcán, las rocas que constituyen el edificio volcánico se ven sometidas a grandes esfuerzos. Estos esfuerzos producen que las rocas que forman el volcán se rompan, generando un sismo de magnitud pequeña conocido como sismo volcanotectónico. Las vibraciones que se generan en este tipo de eventos se registran en los sismómetros y las características particulares de las distintas ondas sísmicas se analizan por los expertos a través de los sismogramas. La emisión de gases y ocasionalmente cenizas produce otro tipo de vibraciones. Por su largo periodo de oscilación, son denominados sismos de periodo largo o tipo LP; aunque de manera más coloquial, para el caso del Popocatépetl se han denominado "exhalaciones".

Las explosiones también generan este tipo de señales, pero se distinguen de las anteriores porque tienen un registro, según los especialistas señalan, más impulsivo y en algunos casos son acompañadas por señales infrasónicas. Las características y clasificación de este tipo de señales sísmicas varían de volcán en volcán, pues ninguno es igual ni trabaja de manera similar. Por lo que el registro de estos eventos y su análisis varía notablemente dependiendo también del nivel de experiencia del personal involucrado en el monitoreo. Si los sismos de tipo LP son constantes y agrupados, de tal manera que no es posible distinguir cuándo termina uno y cuándo empieza el siguiente, se denomina tremor espasmódico o de alta frecuencia. En ocasiones, el movimiento de fluidos en el interior del volcán genera vibraciones rítmicas y armónicas, de manera similar a como vibra un órgano musical, que son conocidas como tremor armónico (Figura 4).

Figura 4. Representación de la forma de onda, el espectro y espectrograma de un segmento de tremor

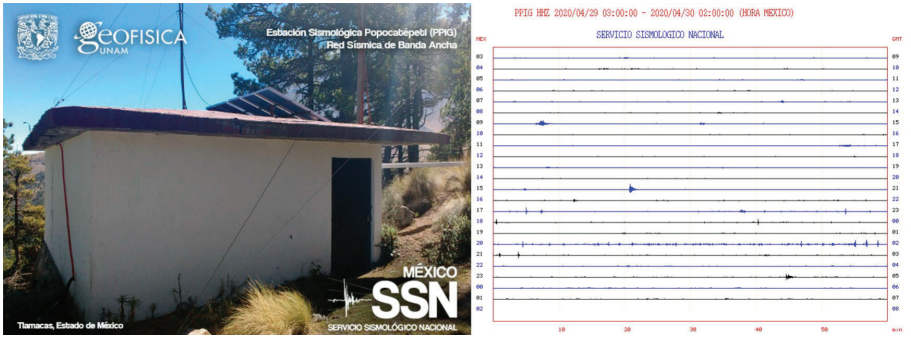


Nota: los datos fueron registrados el 3 de febrero de 2015 en la estación canario (PBP) en su componente norte. Fuente: Caballero *et al.*, 2015a.

Todas estas señales sísmicas se detectan mediante la colocación de sensores denominados sismómetros, que permiten registrar las ondas que se generan. Idealmente estos registros deben ser enviados en tiempo real mediante telemetría, donde pueden ser visualizados y estudiados conforme se van generando. En algunos casos debido a las condiciones presupuestales y climáticas, no es posible instalar estos equipos para que envíen sus señales, recibirlas y analizarlas en tiempo real, por lo que es necesario realizar campañas permanentes para recolectar los datos. La colocación de varios sismómetros

en los alrededores del volcán permite, mediante el análisis detallado de las ondas en cada aparato, determinar el punto en que se originaron dentro del edificio volcánico, y así identificar el ascenso de magma previo a una erupción importante, y en general monitorear el nivel de actividad que presenta el volcán. Entre mayor sea el número de sismómetros instalados en el volcán, mayor será la precisión del análisis, pero también se incrementan las necesidades analíticas y de presupuesto. Por lo que el diseño de una red sísmica dedicada al monitoreo volcánico debe considerar todas estas capacidades y limitaciones.

Figura 5. Estación sismológica Popocatépetl



Nota: esta estación correspondiente a la Red Sísmica de Banda Ancha del Servicio Sismológico Nacional y sismograma de 30 de abril 2020. Fuente: Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2020.

Monitoreo Geoquímico

La geoquímica volcánica estudia las variaciones químicas de las rocas, cenizas y fluidos que emiten los volcanes. De tal manera que el monitoreo geoquímico trata de identificar las variaciones que se presentan en los productos emitidos por el volcán con el fin de identificar, de forma oportuna, procesos que podrían alterar la dinámica eruptiva observada en el volcán. El monitoreo geoquímico tiene tres componentes: de gases, manantiales y de ceniza volcánica.

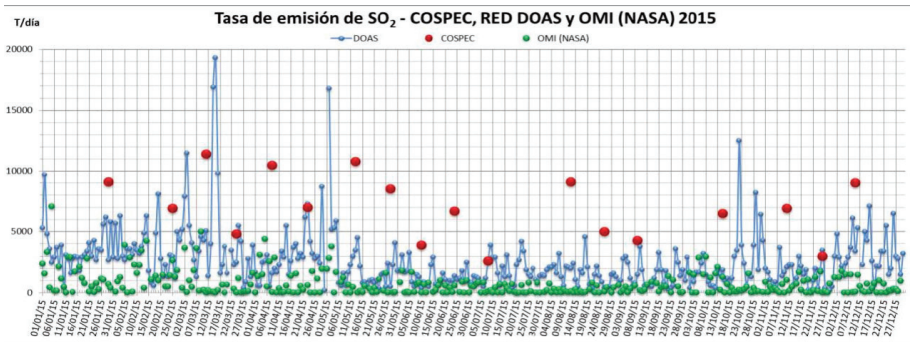
Monitoreo de gases

Los gases volcánicos son emitidos antes y durante una erupción. Las variaciones en la cantidad y tasa de emisión de los gases pueden indicar la presencia de nuevos cuerpos de magma en el interior del edificio volcánico, la disolución y asimilación de otras rocas presentes en el interior del sistema volcánico, así como un incremento o una reducción en la actividad volcánica. Entre los métodos más utilizados para el monitoreo de gases volcánicos en México se encuentran: la Espectroscopia Diferencial de Absorción Óptica (DOAS, por sus siglas en inglés) que es un método para determinar la

concentración de gases emitidos en las plumas volcánicas, principalmente SO_2, detectando las longitudes de onda de la luz solar (visible y ultravioleta) que son absorbidas por dichos gases. Para implementar el monitoreo DOAS en un volcán es necesario diseñar una red permanente de estos instrumentos que permita cubrir los flancos del volcán en los cuales las plumas de gases son transportadas por el viento.

Otro instrumento utilizado para el monitoreo de gases es el Espectrómetro de Correlación, conocido como COSPEC por sus siglas en inglés. Los dispositivos COSPEC se utilizan actualmente para detectar la cantidad de gas SO_2 que se libera de los volcanes, y pueden hacerse mediciones de manera estacionaria desde un punto fijo donde pasa la pluma de gases, o realizando transectos bajo la pluma de gases, ya sea en vehículo o en una aeronave. Actualmente, se están utilizando sofisticadas cámaras UV diseñadas especialmente para el análisis de otros tipos de gases volcánicos. Estas cámaras UV están diseñadas principalmente para la investigación en vulcanología y su uso en el monitoreo aún es limitado (Figura 6).

Figura 6. Reporte de monitoreo de emisión de SO2 del volcán Popocatépetl durante 2015



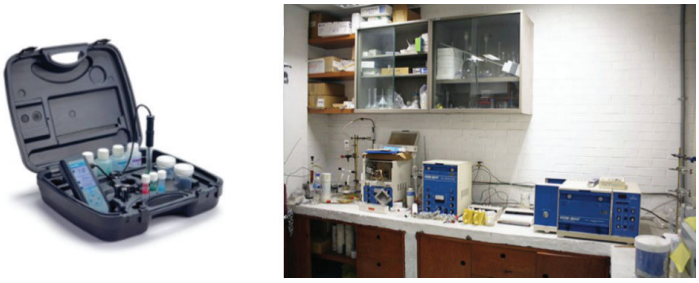
Nota: comparativo de mediciones realizadas mediante COSPEC, DOAS y el sistema OMI de la NASA. Fuente: Caballero *et al.*, 2015a.

Monitoreo de manantiales

El agua de lluvia y de deshielo se infiltra en el interior del volcán, a través de fracturas y poros en las rocas que lo constituyen; circulan por su interior, donde pueden entrar en contacto con los gases emitidos por el magma, y disolver algunos de sus componentes. Eventualmente esta agua regresa a la superficie en manantiales en los alrededores del volcán. De manera periódica se toman mediciones *in situ* de algunos parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH y conductividad del agua en estos manantiales. Además, se toman muestras de agua, para realizar análisis de los elementos químicos que

contiene, en el laboratorio (Fotografía 1). Esto permite identificar variaciones en estos parámetros que, contrastados con los otros tipos de monitoreo, pueden indicar el ascenso del magma hacia partes más someras del edificio volcánico.

Fotografía 1. Estación de medición portátil y laboratorio de análisis de gases y agua



Nota: imagen izquierda corresponde a estación de medición portátil para obtención de parámetros fisicoquímicos en campo consultada en es.hach.com. Imagen derecha corresponde a laboratorio de análisis de gases y agua de Instituto de Geofísica de la UNAM. Fuente: Instituto de Geofísica (UNAM) (2011).

Monitoreo de ceniza volcánica

Cuando cae la ceniza volcánica, se realizan muestreos para llevar a cabo diversos estudios. Se identifican los componentes mineralógicos de ceniza (fragmentos de roca y cristales), se analiza la granulometría, el tamaño de los componentes para establecer el grado de fragmentación de las rocas haciendo uso de microscopios petrográficos (Fotografía 2) . También se analiza la composición química y mineralógica de las cenizas para determinar el origen y la profundidad a la que se generaron las rocas que emite el volcán.

Estos análisis permiten identificar variaciones que podrían generar un incremento en el grado de explosividad de la actividad volcánica. En una erupción volcánica algunos gases emitidos son atrapados por los fragmentos sólidos porosos que componen las cenizas. Estos gases pueden ser estudiados, en el laboratorio, mediante un análisis de lixiviados, el cual permite identificar la presencia de elementos dañinos como fluoruros (F-), sulfatos (SO^{2-}_4) y cloruros (Cl-) adheridos a las cenizas. La ingestión de estos compuestos en grandes cantidades y por períodos prolongados puede ser dañina para la salud, tanto humana como animal. Además, las relaciones de la proporción en la que son emitidos estos gases permiten inferir la presencia de material nuevo en el interior del volcán.

Monitoreo geodésico

Cuando el magma penetra en el volcán puede provocar deformaciones, inflación o deflación en el edificio volcánico o parte de él. La deformación puede ser

muy grande que sea obvia a simple vista o puede ser apreciada únicamente con instrumentos de alta precisión, como sucede en la mayoría de los casos. Estas deformaciones menores solamente pueden ser detectadas mediante el uso de sensores especializados, como receptores GPS de alta sensibilidad, inclinómetros o mediante mediciones topográficas detalladas con estaciones totales ubicadas en las cercanías del volcán (Figura 7). En el caso del monitoreo geodésico es necesario establecer una línea base, es decir, conocer los parámetros previos a la etapa eruptiva, para poder detectar deformaciones del volcán que puedan ser atribuibles a la intrusión y ascenso de nuevos cuerpos magmáticos en el interior del volcán.

Fotografía 2. Microscopios empleados para el análisis de muestras de ceniza volcánica

Nota: microscopios al interior del laboratorio del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Fuente: Instituto de Geofísica (UNAM) (2011).

Figura 7. Estaciones de monitoreo geodésico

Nota: estación de monitoreo geodésico del Volcán Popocatépetl y ejemplo de estación de referencia topográfica de alta precisión que permite el monitoreo de deformaciones en el edificio volcánico de manera continua. Fuente: Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2019).

Monitoreo de lahares

Los lahares son una mezcla de materiales volcánicos, depositados en las laderas de los volcanes, y agua, que generalmente proviene de la lluvia, aunque también puede provenir de glaciares de los lagos que se forman en los cráteres. Debido a la naturaleza de este fenómeno, se pueden presentar lahares incluso en volcanes que no están activos. Además, el alcance que tienen los lahares es grande, lo que los convierte en uno de los peligros volcánicos más mortíferos y destructivos.

Existen diversos sistemas para monitorear lahares. Uno de los primeros sistemas de monitoreo utilizados fue la instalación de geófonos. Los geófonos permiten registrar las vibraciones superficiales del suelo generadas por las corrientes de lodo y bloques de rocas en su viaje por el interior de los valles. Una red de geófonos es instalada en la parte de los valles donde es más común que se generen lahares, permitiendo así dar aviso de manera oportuna a las poblaciones situadas laderas abajo, en la salida de las cañadas (Fotografía 3). Sistemas más recientes para el monitoreo de lahares incorporan sismómetros y cámaras de video que permiten visualizar en tiempo real la generación y evolución de estos fenómenos.

Fotografía 3. Ejemplo estación de monitoreo de lahares en el Volcán de Colima

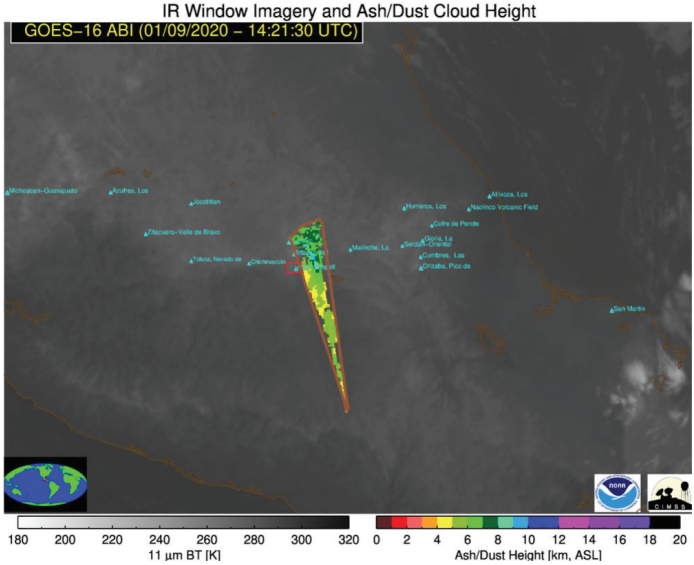
Fuente: fotografía tomada por Lucia Capra. Tomada de Isela Alvarado, 2018.

Sensores Remotos

A partir de imágenes de satélite, se siguen y monitorean las nubes de cenizas y gases que emiten los volcanes. Existen diversos tipos de imágenes y satélites, con diferentes resoluciones tanto espaciales como temporales, por lo que el tipo de imágenes utilizadas varía ampliamente dependiendo de su disponibilidad. Actualmente, para el monitoreo de nubes de cenizas, las

imágenes más utilizadas son las GOES que cuentan con una amplia cobertura espacial y temporal ya que se encuentran en satélites geoestacionarios a grandes altitudes. Las imágenes GOES pueden ser adquiridas de manera gratuita en crudo y procesarse en programas computacionales relativamente especializados, aunque también existen servicios de la NASA y de la NOAA que se encargan de proporcionar las imágenes ya procesadas y analizadas, lo que facilita el trabajo de los observatorios vulcanológicos (Figura 8).

Figura 8. Imagen de satélite GOES-16 procesada por NOAA/CIMSS *Volcanic Cloud Monitoring*



Nota: en la imagen se representa la zona de dispersión de ceniza del volcán Popocatépetl en dirección norte- noreste para en el evento ocurrido el 9 de enero de 2019. Los colores representan la altura de dispersión de ceniza en kilómetros sobre el nivel del mar. Fuente: CIMSS *Satellite* Blog, 2020.

Cuando el paso de los satélites de órbita polar coincide que los eventos eruptivos, las imágenes de LANDSAT y SENTINEL también son utilizadas parar el mapeo de las nubes de ceniza. Estas imágenes tienen una alta resolución espacial pero una pobre resolución temporal, por lo que la mejor estrategia consiste en utilizar todas las imágenes disponibles. Estas imágenes de mayor resolución espacial han sido utilizadas ampliamente para la identificación de cambios topográficos y han sido utilizadas como insumo en la elaboración de mapas de peligros.

También, mediante el uso de imágenes de satélite tipo MODIS se pueden detectar zonas de temperatura elevada o anomalías térmicas, que pueden estar asociadas a presencia de lava u otros materiales volcánicos calientes en la superficie. Las imágenes MODIS pueden también ser adquiridas y procesadas en softwares especializados. Aunque actualmente existen en

internet servicios como MIROVA que se encargan del procesamiento de estas imágenes y proporcionan información en tiempo casi real sobre las condiciones térmicas de los distintos volcanes alrededor del mundo. Estas imágenes también son utilizadas para la detección y monitoreo de incendios forestales y otros eventos de esta naturaleza.

Los gases volcánicos también pueden ser monitoreados mediante imágenes de satélite. Los observatorios vulcanológicos alrededor del mundo han utilizado las imágenes tipo OMI y sus derivados para el seguimiento de nubes de dióxido de azufre (SO_2) producidas por los volcanes, aunque también son utilizadas para medir las emisiones industriales y urbanas de este gas.

El monitoreo volcánico en México

En México, la *Ley General de Protección Civil* en sus artículos 23 y 82, así como en el artículo 109 del Reglamento Interior de la Secretaría de Gobernación, se estipula que el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) tiene la atribución de instrumentar redes de monitoreo y sistemas de alerta de fenómenos naturales, y es la institución encargada de la coordinación del monitoreo y alertamiento de fenómenos perturbadores de origen natural (H. Congreso de la Unión, 2018). De acuerdo con el *Reglamento de la Ley General de Protección Civil*, la Coordinación Nacional de Protección Civil impulsará la creación de un Sistema Nacional de Alertas (Artículo 62). Además, promoverá que las autoridades de los tres órdenes de gobierno asuman la operación y mantenimiento de los Sistemas de Alerta Temprana, incluido a los especialistas y responsables de su operación (H. Congreso de la Unión, 2015).

En la práctica, en el caso de la actividad volcánica, diversas dependencias, principalmente universidades, se han encargado de establecer las redes de monitoreo. Por lo que, actualmente se cuentan reconocidas las siguientes instituciones encargadas del monitoreo de los distintos volcanes activos del país: el Centro Nacional de Prevención de desastres (CENAPRED), encargado del monitoreo del volcán Popocatépetl y otros volcanes considerados activos en colaboración con el Instituto de Geofísica y el Servicio Sismológico Nacional de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El Centro Universitario de Estudios Vulcanológicos (Universidad de Colima), monitorea el volcán de Colima; el Centro de Monitoreo Vulcanológico-Sismológico (Universidad de ciencias y artes de Chiapas), monitorea el volcán Chichonal. El observatorio sismológico y vulcanológico de La Universidad Veracruzana (UV) y el Centro de Ciencias de la Tierra (CCT), monitorea los volcanes Pico de Orizaba, San Martín y el campo volcánico Los Tuxtlas. El volcán Tacaná es monitoreado por el Servicio Sismológico Nacional. Otras instituciones como el Centro de Geociencias de la UNAM, el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y la Universidad de Guadalajara también colaboran en el monitoreo volcánico, aunque con fines principalmente de investigación.

Monitoreo volcánico en el Popocatépetl: la labor del Centro Nacional para la Prevención de Desastres

Después de la erupción del volcán Chichón en 1982 y de los sismos de 1985 y con el fin de reducir el impacto de los fenómenos naturales, la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Secretaría de Gobernación (SEGOB), fundaron en 1988 el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). El objetivo de este centro es el de realizar investigaciones sobre las causas de los desastres, para prevenir su ocurrencia y disminuir sus consecuencias.

Cuando en diciembre de 1994 el Popocatépetl entró en erupción, el CENAPRED, con apoyo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), instaló las primeras estaciones de monitoreo volcánico y, desde entonces, asume la vigilancia de este volcán. El sistema de monitoreo del Popocatépetl opera de forma continua, las 24 horas del día, los 365 días del año, desde 1994 hasta la fecha. Su instrumentación, operación y mantenimiento fue posible gracias a la colaboración que existe entre el CENAPRED, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

En el Laboratorio de Fenómenos Naturales del CENAPRED se reciben, en tiempo real, cerca de 100 señales obtenidas por cámaras y sismómetros, infrasónicos y GPS, situados en doce estaciones multiparamétricas alrededor del volcán, instrumentadas y operadas por el CENAPRED. Adicionalmente se reciben 30 señales sísmicas, provenientes de diez estaciones sísmicas ubicadas a distancias de hasta 60 km del volcán, que pertenecen a la Red Sismológica del Servicio Sismológico Nacional (SSN) y diversas imágenes de satélite GOES procesadas por el Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra del Instituto de Geografía de la UNAM. En total, 37 personas están involucradas directamente en el monitoreo del Popocatépetl. Personal de las Direcciones de Instrumentación e Investigación del CENAPRED realizan el monitoreo ininterrumpido las 24 horas del día los 365 días del año, con 21 computadoras dedicadas. Diariamente se publican en internet reportes técnicos en los que se contabiliza el nivel de actividad presentado en las 24 horas anteriores, y se incluyen imágenes para ilustrar los eventos más destacados. Toda esta información está además disponible vía telefónica para la población que no cuenta con internet a través del POPOTEL. La información diseminada es retomada por las autoridades nacionales de protección civil y dispersada a través de las redes sociales.

Además, mediante un acuerdo con el Centro Universitario de Estudios e Investigación en Volcanología de la Universidad de Colima, también se le da seguimiento a la actividad del volcán Fuego de Colima. En el CENAPRED también, se reciben señales de sensores instalados en el volcán Ceboruco, Nayarit (por acuerdo con el SSN), de los volcanes Nevado de Toluca y Jocotitlán en el Estado

de México (por acuerdo con PC de Toluca), del Citlaltépetl (Pico de Orizaba) y el San Martín Tuxtla, en Veracruz (por acuerdo con la Universidad Veracruzana) y de los volcanes Chichón y Tacaná, en Chiapas (por acuerdos con la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas y el SSN). Adicionalmente se realizan campañas mensuales (en el caso del Popocatépetl) y anuales (en otros volcanes activos) de muestreo geoquímico de manantiales, así como sobrevuelos de reconocimiento de las condiciones del cráter y la evaluación de las dimensiones de los domos y cráteres de explosión que se generan por la actividad.

Medios de difusión de la actividad volcánica

Semáforo de alerta volcánica

Con el objeto de informar a la población sobre la actividad del volcán Popocatépetl y las medidas generales de prevención correspondientes se desarrolló un sistema de alertamiento denominado Semáforo de Alerta Volcánica, que se divide en tres niveles con distintas fases cada uno (Figura 9).

Figura 9. Semáforo de Alerta Volcánica para el volcán Popocatépetl

Fuente: Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2018.

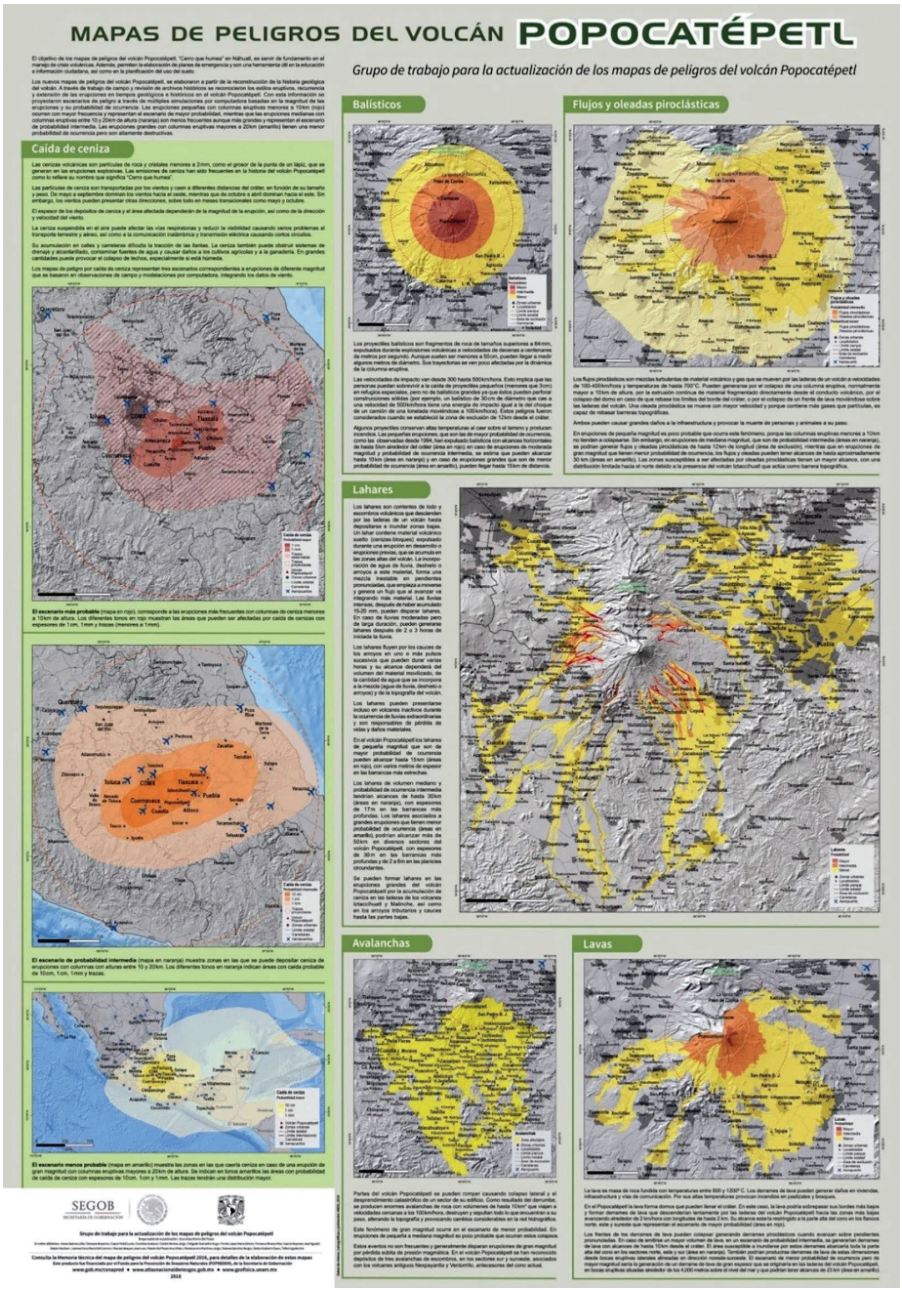
Los niveles de alertamiento que las autoridades y la población deben tener son: Verde (Normalidad), que corresponde a un estado de calma o reposo en el volcán (Fase 1), o con mínimas manifestaciones de actividad (Fase 2). El nivel Amarillo (Alerta) indica que el volcán presenta abundantes manifestaciones no eruptivas de actividad (Fase 1), o presenta actividad eruptiva leve (Fase 2) a alta, sin afectar áreas más allá del perímetro de seguridad (Fase 3). Esta última fase indica también, a las autoridades de Protección Civil, que deben prepararse para realizar evacuaciones y atender a la población evacuada en caso de incrementarse la actividad. Por último, el nivel Rojo (Alarma) indica que el volcán presenta actividad explosiva intermedia y es necesario evacuar a las poblaciones más cercanas (Fase 1), a incluso actividad explosiva muy fuerte, que requiere una evacuación completa de todas las poblaciones en el área de peligro, según el mapa de peligros (Fase 2).

Mapas de peligros volcánicos

La función de los mapas de peligro es servir de fundamento en el manejo de las crisis volcánicas. Además, permiten la elaboración de planes de emergencia y son una herramienta útil en la educación e información ciudadana, así como en la planificación del uso del suelo. Los mapas de peligros permiten distinguir los alcances de cada uno de los fenómenos volcánicos, describiendo sus efectos sobre el hombre y el medio, así como las probabilidades de que estos eventos ocurran. Se elaboran a partir de la reconstrucción de la historia geológica del volcán. Con esta información se proyectan, a través de múltiples simulaciones de computadora, escenarios de peligro. Estos escenarios se basan en los tamaños de las erupciones y en su probabilidad de ocurrencia. Una vez definidos los peligros volcánicos es necesario desarrollar la capacidad de respuesta ante la posibilidad de actividad volcánica, lo que involucra una clara comprensión, por parte de la población vulnerable y de las autoridades responsables de su protección, del fenómeno natural y de todas sus posibles manifestaciones destructivas, y la elaboración de medidas de reducción de la vulnerabilidad.

Algunos mapas, como los publicados en 2016 por el Grupo de Trabajo para la actualización de los mapas de peligros del volcán Popocatépetl, pueden ser sumamente detallados y precisos, algunos otros mapas son más sencillos, pero ambos se pueden traducir a planes concretos de evacuación y otras acciones encaminadas a la protección de la población y la reducción de la vulnerabilidad. Para llegar a toda la población, el mapa de peligros del Popocatépetl también está disponible en una versión en náhuatl. Además, en el Popocatépetl se diseñó un radio de exclusión de 12 km desde el cráter, dentro del cual se restringen ciertas actividades en caso de un incremento de la actividad de este volcán (Figura 10).

Figura 10. Mapa de peligros del volcán Popocatépetl



Fuente: Martín del Pozzo *et al*., 2016.

Planes Operativos y Rutas de Evacuación

Para atender una emergencia provocada por incremento de la actividad del volcán Popocatépetl, las autoridades estatales y municipales de Protección Civil, de las regiones que pueden ser afectadas, elaboraban cada año sus planes operativos, en los que se detallan las acciones que se llevarán a cabo por los tres órdenes de gobierno, por las autoridades de Protección Civil y por los pobladores. Estos planes fueron recientemente homologados e integrados en un solo plan, que permitió unificar los criterios y los esfuerzos de cada estado para el beneficio de la sociedad en virtud de lograr una verdadera gestión integral del riesgo volcánico. En este nuevo plan operativo unificado se incluyen también las Rutas de Evacuación, que son planificadas a partir de la información plasmada en los mapas de peligros, considerando también el estado de los caminos y carreteras (Figura 11).

Figura 11. Croquis de rutas de evacuación del volcán Popocatépetl. Estado de Puebla

Nota: rutas de evacuación elaboradas por el Sistema Estatal de Protección Civil del Estado de Puebla, empleadas para los simulacros de las comunidades cercanas al volcán. Popocatépetl.
Fuente: *Sol de México*, 2019.

Simulacros de Evacuación

Es importante que las autoridades realicen lo más frecuentemente posible simulacros de evacuación, y que la población participe en ellos, ya que de esta manera se identifican los problemas y posibles complicaciones en los planes operativos y en las rutas de evacuación. Al participar en los simulacros, la población aprende lo que se requiere de ellos, así como las medidas que deben de tomar para garantizar su seguridad y la de sus bienes, lo que redunda en una mayor eficiencia durante una evacuación real. En el Popocatépetl se han realizado diversos simulacros de evacuación, principalmente en las localidades ubicadas el noreste, en Santiago Xalitzintla y San Nicolás de los Ranchos. Incluso, en 2016 se realizó un simulacro en el que se incluían acciones encaminadas a los animales de compañía y los de producción agropecuaria.

Reuniones de los Comités Científicos Asesores

Si el nivel de actividad lo amerita, se convoca al Comité Científico Asesor del Sistema Nacional de Protección Civil para el volcán Popocatépetl o para el volcán de Colima. Estos dos comités están integrados por los vulcanólogos más reconocidos del país y personal de los distintos observatorios. En sesiones ordinarias o extraordinarias se analiza y discute, de manera conjunta, la información recabada e interpretada por los sistemas de monitoreo, para realizar un diagnóstico de la actividad presente, así como un pronóstico del tipo de actividad que puede presentarse en el futuro inmediato y cómo puede variar con el paso del tiempo. Posteriormente, se elaboran recomendaciones, que son turnadas a la Coordinación Nacional de Protección Civil y a otras autoridades, quienes son las encargadas de tomar las decisiones pertinentes para salvaguardar la vida e integridad de la población situada en zonas de peligro, así como de las acciones preventivas necesarias para minimizar el riesgo. Otros comités han sido integrados durante la actividad del volcán Tacaná en 1986 y durante el enjambre sísmico localizado en el campo volcánico Michoacán-Guanajuato a principios del 2020.

Monitoreo de la actividad volcanes mexicanos (Chichón, Tacaná, Pico de Orizaba, San Martín y Nevado de Toluca).

Desde hace varios años el CENAPRED, además del monitoreo permanente del volcán Popocatépetl, realiza periódicamente monitoreo hidrogeoquímico en los volcanes Ceboruco, Chichonal, San Martín Tuxtla, Pico de Orizaba y Nevado de Toluca. En estos dos últimos se realiza también monitoreo sísmico a través de equipos instalados en los flancos de los edificios volcánicos en coordinación con diversas dependencias.

Pico de Orizaba

El Volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba) está instrumentado con tres estaciones sísmicas. La instalación de estas estaciones es fruto de la colaboración entre el CENAPRED y la Universidad Veracruzana. El 20 de marzo de 1998, se instaló y puso en operación la primera estación de monitoreo sísmico en el volcán, denominada Halcón (POH), que se localiza en el flanco norte del volcán a 4150 m s. n. m. Consiste en un sismómetro, equipo de telemetría y celdas solares con baterías. La señal de telemetría se envía simultáneamente al Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana en Jalapa, Veracruz y al CENAPRED en la ciudad de México, a través de una repetidora en el volcán Popocatépetl. Para fortalecer la instrumentación del Pico de Orizaba, el 22 de junio de 2001, se instaló y puso en operación la estación Chipe (POC) con un sensor sísmico y transmisión

en tiempo real al CENAPRED. Se localiza en el flanco sur del volcán a 4437 m s. n. m. La tercera estación sísmica se instaló en 2003 en el flanco este del volcán, en el lugar denominado casa Manuel (POM). Consiste en un sismómetro, equipo de telemetría y celdas solares con baterías. La señal de telemetría se envía directamente al Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana en Jalapa de donde la reenvía vía Intern*et al.* CENAPRED. Con estas tres estaciones era posible realizar la localización y la obtención de parámetros epicentrales de los sismos asociados al volcán. Sin embargo, estas estaciones funcionaron hasta 2011, cuando empezó a haber intermitencia en los señales telemétricas y problemas de recepción de la señal desde Veracruz (Nieto Torres y Espinasa-Pereña, 2016a).

Volcán San Martín

El gobierno del estado de Veracruz, a través de la Dirección General de Protección Civil, y el Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana (CCTUV) pusieron en marcha diversos proyectos apoyados por el Fondo de Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN) para el diseño, instalación y operación de una red sísmica en esta zona volcánica con fines de monitoreo. Desde el 15 de julio de 2013, el CENAPRED y la Universidad Veracruzana comenzaron a recibir los datos de la primera estación símica instalada, la estación PMUV "Perla de San Martín", equipada con un sismómetro. Los datos registrados además se envían al Servicio Sismológico Nacional empleando un enlace satelital y telemetría por radiofrecuencia. También existen dos estaciones más, equipadas con sismómetros (RAUV "Revolución de Arriba "y CZUV "EL Cenizo", que actualmente no están disponibles por falta de telemetría (Nieto Torres y Espinasa-Pereña, 2016b).

Volcán Tacaná

El Tacaná está entre los volcanes considerados de mayor riesgo en el país, y sus efectos eruptivos pueden tener consecuencias severas para la población y economía de la región de Chiapas y Guatemala. Por ello, a iniciativa del Servicio Sismológico Nacional (SSN) y del Instituto de Geofísica de la UNAM, con fondos de CONACyT se instalaron en territorio mexicano, en el mes de marzo de 2010, cuatro estaciones sísmicas distribuidas alrededor del volcán a distancias variables entre 0.4 y 13.3 km de la cima. La transmisión es en tiempo real a la estación central en Tapachula y de ahí al SSN. Actualmente solo quedan en operación tres de las cuatro estaciones, debido a la vandalización de la estación CIMA que se ubicaba en la cima del volcán. Las estaciones que actualmente están en funcionamiento son: Estación PAVE, ubicada en Pavencul. Estación PATRIA, ubicada en La Patria. Estación CHIQ, ubicada en Chiquigüites. El Tacaná al ser un volcán fronterizo también es monitoreado por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) de Guatemala (Caballero *et al.*, 2015).

Volcán Chichón

Desde diciembre de 2011, el Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) en colaboración con CENAPRED, cuenta con una Red de tres estaciones sismológicas ubicadas en Francisco León, Nicapa (Pichucalco) y Viejo Volcán (Chapultenango). Además de una cámara telemétrica que captura imágenes del cráter. La señal de Viejo Volcán se recibía desde entonces en el CENAPRED y desde finales de marzo de 2014 también se recibía en CENAPRED la señal de Francisco León. Sin embargo, durante una tormenta registrada en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en abril de aquel año se vino abajo una de las torres que retransmitían la señal y desde entonces no se han vuelto a recibir los datos en el CENAPRED, pero sí son procesados periódicamente en la UNICACH, cada vez que se descargan manualmente los datos en campo, actividad que por falta de presupuesto se realiza con poca frecuencia.

Por otro lado, desde 2006 el CENAPRED ha realizado un monitoreo geoquímico y térmico de este volcán, que consiste en el análisis fisicoquímico de las aguas termales y gases, obtenidos a través de un muestreo cuasi periódico de estos (Fotografía 4).

Fotografía 4. Monitoreo geoquímico del lago cratérico del volcán Chichonal

Nota: el monitoreo es realizado por personal de la Subdirección de Riesgos Volcánicos del CENAPRED. En la fotografía Nieto Torres. Fuente: fotografía tomada por Espinasa Pereña, noviembre 2016.

Asimismo, se toman diversas imágenes térmicas del lago cratérico para su análisis. La Subdirección de Riesgos Volcánicos del CENAPRED cuenta con datos de esta técnica de monitoreo desde 2006. Los datos de geoquímica fueron complementados con la información publicada por distintos autores, por lo que se pudo construir una base de datos de las variaciones geoquímicas del lago cratérico y otros manantiales a partir de 1983. Adicionalmente, desde 2008 se han tomado imágenes térmicas desde el borde superior hacia el interior del cráter (Nieto Torres y Espinasa-Pereña, 2014).

Nevado de Toluca

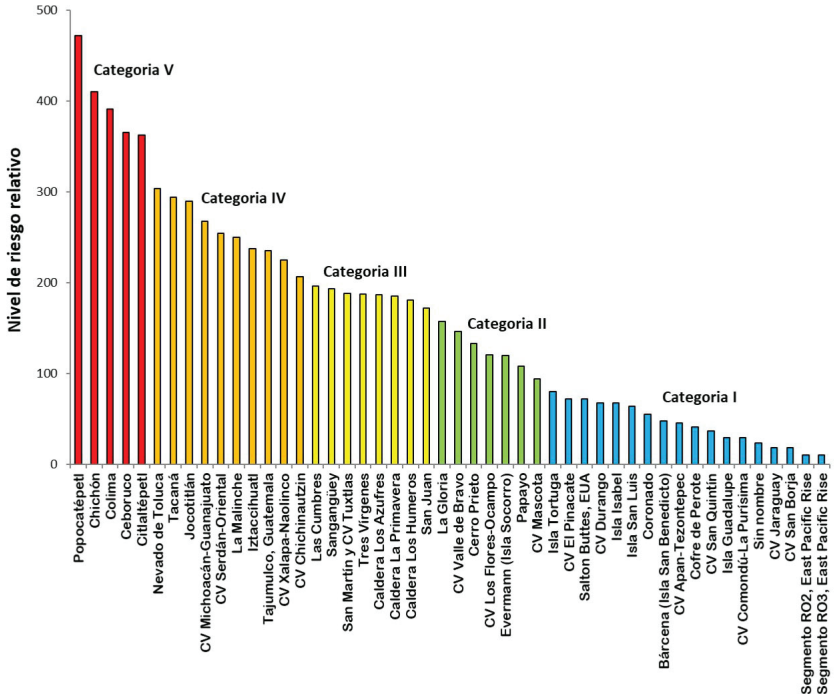
En colaboración con la Dirección de Instrumentación y Cómputo del CENAPRED y personal de la Dirección General de Protección Civil del Estado de México, se instaló la estación sísmica en el Nevado de Toluca y se realizó la ubicación del Puesto Central de Registro en las oficinas de la Dirección General de Protección Civil del Estado de México en la ciudad de Toluca, en abril de 2008. Esta estación entró en operación el 8 de diciembre de 2012. La red consta de una estación (TOL) sísmica que se encuentra ubicada sobre la parte alta de la ladera noreste del volcán, a una altura de 4,129 m s. n. m. Adicionalmente, se instaló otra estación sísmica en el flanco sur del volcán Jocotitlán, a 3,863 m s. n. m. El volcán Jocotitlán está situado a 44 km al noroeste de la ciudad de Toluca. La información registrada en estas dos estaciones se envía al puesto central de registro que se encuentra en las oficinas de protección civil del Estado de México. Las señales provenientes del volcán se guardan en una computadora destinada exclusivamente para esta función y posteriormente se envían por intern*et al.* CENAPRED (Nieto-Torres *et al.,* 2015).

Análisis de riesgo relativo de los volcanes mexicanos considerados activos para establecer una red de monitoreo

En 2014 el CENAPRED realizó un análisis comparativo del riesgo relativo de cada uno de los volcanes mexicanos considerados como activos (Espinasa-Pereña *et al.,* 2015). Se categorizaron los volcanes en niveles de riesgo, tomando en cuenta los peligros que cada uno puede presentar, su historia geológica y eruptiva, así como los elementos vulnerables que estarían expuestos, como población, vivienda, carreteras y otra infraestructura situada en las zonas de posible afectación, para poder priorizar la atención que se les debe dar y el nivel de monitoreo que merece cada uno de ellos. El cálculo del riesgo relativo representado por cada volcán se hizo mediante una modificación de la metodología propuesta por Ewert *et al.,* (1998), Ewert *et al.,* (2005), Ewert (2007) y Ewert *et al.,* (2018) considerando el tipo de información disponible en la literatura geológica acerca de los volcanes mexicanos, así como la información disponible en el Atlas Nacional de Riesgos acerca de la población

e infraestructura alrededor de los volcanes. La evaluación del peligro relativo de cada volcán se hizo a partir de la información sobre su historia eruptiva, los tipos de peligros volcánicos característicos, su recurrencia y el estado de actividad que presenta actualmente. De igual manera, para calificar la exposición se asignaron valores dependiendo de la densidad de población y de la infraestructura que estaría expuesta, en caso de una erupción del volcán. Se clasificaron los volcanes en cinco categorías de riesgo, desde Muy Alto (Categoría V) hasta Muy Bajo (Categoría I) (Figura 12).

Figura 12. Nivel de riesgo relativo de los volcanes considerados como activos en México



Fuente: modificado de Espinasa-Pereña *et al.*, 2015.

Para priorizar los esfuerzos de monitoreo y mitigación por riesgos volcánicos de manera eficiente, el nivel de monitoreo instalado en cada volcán debe estar en función del riesgo relativo que representa, considerando el tipo de actividad que puede presentar, así como la vulnerabilidad de la población y la infraestructura afectable. Con base en esto, se realizó una propuesta sobre el nivel de monitoreo mínimo que debiera tener cada volcán, de acuerdo con la categoría de riesgo relativo que representa (Ewert *et al.*, 2005 y Espinasa-Pereña *et al.*, 2015) (Cuadro 1).

Cuadro 1
Nivel de monitoreo requerido de acuerdo con la categoría de amenaza que representan los diferentes volcanes mexicanos

Categoría de riesgo	Nivel de monitoreo
Categoría de riesgo V Muy Alto	Nivel de monitoreo 5: Continuo en tiempo real. El monitoreo debe permitir seguir los cambios detallados de la actividad en tiempo real, así como desarrollar, probar y aplicar modelos a la actividad presente y futura. Sísmico: Al menos 10 estaciones sísmicas a < 20 km de la boca eruptiva, incluyendo al menos 4 a <5 km. Deformación: Al menos 4 estaciones de GPS y/o inclinómetros, para seguir cambios geodésicos en espacio y tiempo. Gases: Al menos 3 arreglos de sensores continuos tipo DOAS, y campañas mensuales de medición áereas o terrestres con sensores tipo COSPEC. Hidrológico: Monitoreo en tiempo real de condiciones de suelo, humedad, precipitación y sistemas de detección de lahares en las principales barrancas. Sensores continuos de hidrogeoquímica. Sensores remotos: Imágenes infrarrojo térmal de alta resolución diarias, imágenes multicanal de alta resolución frecuentes. Radar Doppler. Visual: Cámara térmica y al menos 3 cámaras visuales. Vuelos frecuentes (mensualmente a incluso diarios, según la actividad) y campañas terrestres para evaluar los posibles cambios en el cráter y laderas externas.
Categoría de riesgo IV Alto	Nivel de monitoreo 4: Monitoreo básico en tiempo real. El monitoreo debe permitir detectar y seguir los cambios pre-eruptivos y los eruptivos en tiempo real, con una comprensión básica de los fenómenos que están ocurriendo: Sísmico: Al menos 6 estaciones sísmicas a < 20 km de la boca eruptiva, incluyendo al menos 3 a <10 km Deformación: Al menos 2 estaciones de GPS y/o inclinómetros; mediciones rutinarias para seguir cambios geodésicos en espacio y tiempo. Gases: Campañas bimestrales de medición aereas o terrestres con sensores tipo COSPEC, apoyadas por 1 ó 2 sensores continuos tipo DOAS. Hidrológico: Sistemas de detección de lahares en las principales barrancas. Campañas bimestrales a semestrales de monitoreo hidrogeoquímico. Sensores remotos: Imágenes infrarrojo térmal de alta resolución frecuentes, ocasionales imágenes multicanal de alta resolución. Visual: Cámara térmica y al menos 1 cámara visual. Vuelos anuales y campañas de campo (por tierra) semestrales para evaluar los posibles cambios en el cráter y laderas externas.
Categoría de riesgo III Moderado	Nivel de monitoreo 3: Monitoreo limitado para detección de cambios El monitoreo deberá permitir la detección de posibles precursores de actividad eruptiva y el seguimiento de esta. Sísmico: El volcán estará cubierto por al menos 1 estacion sísmica a < 100 km de la boca eruptiva. Adicionalmente, al menos 2 estaciones sísmicas a <20 km de la boca eruptiva. Deformación: Mediciones anuales, para seguir cambios geodésicos en espacio y tiempo. Gases: Campañas anuales de medición áereas o terrestres con sensores tipo COSPEC. Hidrológico: Modelación de lahares en las principales barrancas. Campañas anuales de monitoreo hidrogeoquímico. Sensores remotos: Revisión regular de imágenes de satélites meteorológicos (AVHRR, GOES) e imágenes infrarrojo térmal. Obtención de un inventario de imágenes de satélite tipo LANDSAT y fotografías áereas de alta resolución. Visual: Campañas de campo anuales, para evaluar los posibles cambios en el cráter y laderas externas.
Categoría de riesgo II Bajo	Nivel de monitoreo 2: Monitoreo mínimo El monitoreo debera permitir establecer el nivel base de la actividad del volcán, así como reconocer la aparición de actividad anómala. Sísmico: El volcán o campo volcánico tendrá al menos 2 estaciones sísmicas a < 100 km de la boca eruptiva o centro del campo. Deformación: Mediciones ocasionales para seguir cambios geodésicos en espacio y tiempo. Gases: Campañas ocasionales de medición aereas o terrestres, con sensores tipo COSPEC, para detectar desgasamiento anómalo. Hidrológico: Campañas ocasionales de monitoreo hidrogeoquímico. Sensores remotos: Obtención de un inventario de imágenes de satélite tipo LANDSAT y de fotografías áereas. Visual: Se realizan campañas ocasionales para evaluar posibles cambios en el cráter y laderas externas.
Categoría de riesgo I Muy bajo	Nivel de monitoreo 1:Sin monitoreo permanente El monitoreo debera permitir reconocer la aparición de actividad anómala. Sísmico: El volcán o campo volcánico tendrá al menos 2 estaciones sísmicas a < 250 km de la boca eruptiva. Deformación: No se realizan estudios de deformación sistemáticos. Gases: No se realiza monitoreo de gases sistemático. Hidrológico: No se realiza monitoreo de aguas sistemático. Sensores remotos: Obtención de inventario de imágenes de satélite tipo LANDSAT y fotografías áereas. Visual: No se lleva a cabo monitoreo visual sistemático.

Fuente: modificado de Ewert *et al.*, 2005 y Espinasa-Pereña *et al.*, 2015.

Conclusiones

A casi 40 años del desastre ocurrido en Chiapas por la erupción del volcán Chichón, los esfuerzos para incrementar un sistema de monitoreo que cubra las necesidades reales de este volcán son escasas. Lo mismo pasa con el resto de los volcanes en México.

El monitoreo de la actividad volcánica requiere de un esfuerzo institucional mayor que involucra a académicos, autoridades y diversas instituciones gubernamentales y de la sociedad civil que se comprometan a aportar presupuesto y personal técnico y científico dedicado.

De los 48 volcanes considerados como activos en México, solamente 14 han presentado actividad histórica, por lo que tradicionalmente se ha considerado como volcanes activos a estos 14, lo que ha causado una subestimación de la potencial actividad volcánica en México. Actualmente,

solo los volcanes Popocatépetl y Colima tienen instalados sistemas de monitoreo óptimos, que permiten identificar aumentos en su actividad de forma oportuna. Y el volcán Popocatépetl mantiene un monitoreo con personal dedicado exclusivamente las 24 horas, los 365 días, por lo que es indiscutible el rezago en términos de monitoreo del resto de los volcanes.

Las redes de monitoreo volcánico son costosas en términos económicos y de recursos humanos, por lo que, monitorear todos los volcanes activos en México. bajo el esquema de monitoreo actual, parece una meta imposible.

Es indispensable un esfuerzo mucho mayor por parte del gobierno para implementar una estrategia que permita incrementar el número de volcanes monitoreados en México. Estos esfuerzos se deben priorizar en función del nivel de riesgo que cada volcán representa y cubrir las necesidades de monitoreo de al menos los volcanes considerados en las categorías de Muy alto, alto y de riesgo medio.

Bibliografía

Caballero G., Espinasa Pereña R., y Nieto Torres A., Hernández A., Castañeda E., 2015. “Informe del monitoreo del volcán Tacaná 2014”. Subdirección de Riesgos Volcánicos, Dirección de Investigación. Centro Nacional de Prevención de Desastres. *Reporte interno*. 7 pp.

Caballero G., Espinasa Pereña R., y Nieto Torres A., Hernández A., Castañeda E., 2015a. Actividad del volcán Popocatépetl (2015). “Subdirección de Riesgos Volcánicos”, Dirección de Investigación. Centro Nacional de Prevención de Desastres. *Reporte interno*. 26 pp.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2019. “Monitoreo geodésico del volcán Popocatépetl”. Disponible en: https://www.gob.mx/cenapred/articulos/monitoreo-geodesico-del-volcan-popocatepetl. Consultado el 1° mayo 2020.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2018. “Popocatépetl. Semáforo de Alerta Volcánica”. Disponible en: http://www.files.cenapred.gob.mx/es/publicacionesRelevantes/CARTEL_SEMAFORO_ALERTA_VOLCANICA.pdf. Consultado el 1° mayo 2020.

CIMSS Satellite Blog, 2020. “Eruption of Popocatepetl in Mexico”. Disponible en: https://cimss.ssec.wisc.edu/satellite-blog/?s=popocatepetl. Consultado el 1° mayo 2020.

Espinasa-Pereña R., Nieto-Torres, A., Hernández, O. A, y Castañeda, E., 2015. “Diagnóstico de los volcanes activos a monitorear por el servicio vulcanológico nacional”. Centro Nacional de Prevención de Desastres. *Reporte Interno*. 181 p.

Ewert, J. W., Miller, C. D., Tilling, R. I., and Neal, C. A., 1998. “Revised criteria for identifying high-risk volcanoes around the world”. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 79 (45), 993.

Ewert, J.W., 2007. “System for Ranking Relative Threats of U.S. Volcanoes”, *Natural Hazards Review*, Vol. 8, Págs. 112 124.

Ewert, J.W., Diefenbach, A.K., and Ramsey, D.W., 2018. "Update to the U.S. Geological Survey National Volcanic Threat Assessment: U.S." *Geological Survey Scientific Investigations Report* 2018–5140, 40 P.

Ewert, J.W., Guffanti, M. and Murray, T.L., 2005. "An Assessment of Volcanic Threat and Monitoring Capabilities in The United States: Framework for A National Volcano Early Warning System", *United States Geological Survey Open-File Report* 2005 1164, 62 P.

H. Congreso de la Unión, 2015. *Reglamento de la Ley General de Protección Civil*, Estados Unidos Mexicanos: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Diario Oficial de la Federación (DOF) 09-12-2015.

H. Congreso de la Unión, 2018. *Ley General de Protección Civil*, Estados Unidos Mexicanos: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión Diario Oficial de la Federación (DOF) 19-01-2018.

Instituto de Geofísica (UNAM), 2011. "Vulcanología. Laboratorios". Disponible en: http://vulcanologia.geofisica.unam.mx/infraestructura.html. Consultado el 1° mayo 2020.

Isela Alvarado, 2018. "El propósito, generar alertas tempranas. Monitoreo en tiempo real del Popo y el Volcán de Colima". *Gaceta UNAM*. Disponible en: https://www.gaceta.unam.mx/monitoreo-en-tiempo-real-del-popo-y-el-volcan-de-colima/. Consultado el 1° mayo 2020.

Martin Del Pozzo et al., 2017. Memoria técnica del Mapa de peligros del Volcán Popocatépetl.

Nieto Torres A., Castañeda E., Espinasa Pereña R., 2015. "Informe del monitoreo del volcán Nevado de Toluca 2014". Subdirección de Riesgos Volcánicos, Dirección de Investigación. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Reporte interno. 14 pp.

Nieto Torres A., Espinasa Pereña R., 2014. "Informe del monitoreo del volcán Chichón 2014". Subdirección de Riesgos Volcánicos, Dirección de Investigación. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Reporte interno. 11 pp.

Nieto Torres A., Espinasa Pereña R., 2016a. "Informe del monitoreo hidrogeoquímico del volcán Pico de Orizaba. Subdirección de Riesgos Volcánicos, Dirección de Investigación". Centro Nacional de Prevención de Desastres. Reporte interno. 19 pp.

Nieto Torres A., Espinasa Pereña R., 2016b. *Informe del monitoreo sísmico e hidrogeoquímico del volcán San Martín Tuxtla*. Subdirección de Riesgos Volcánicos, Dirección de Investigación. Centro Nacional de Prevención de Desastres. *Reporte interno*. 22 pp.

Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2020. "Sismogramas de banda ancha". Disponible en: http://www.ssn.unam.mx/sismogramas/ppig/. Consultado 1° de mayo 2020.

Sol de México, 2019. "Estas son las 10 rutas de evacuación del volcán Popocatépetl". *Sol de México.* Disponible en: https://www.elsoldemexico.com.mx/republica/sociedad/estas-son-las-10-rutas-de-evacuacion-del-volcan-popocatepetl-cuales-son-las-ruta-de-evacuacion-en-el-popo-3250620.html. Consultado el 1° mayo 2020.

2.3. Monitoreo de la actividad sísmica en la red sismológica del suroccidente colombiano

Nathalie García-Millán,

Jhonattan Fernández Córdoba,

Jorge Andrés Vélez Correa,

César Augusto Cardona Parra

Elkin de Jesús Salcedo Hurtado

Grupo de Investigación Georiesgos, Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano (OSSO)

Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia

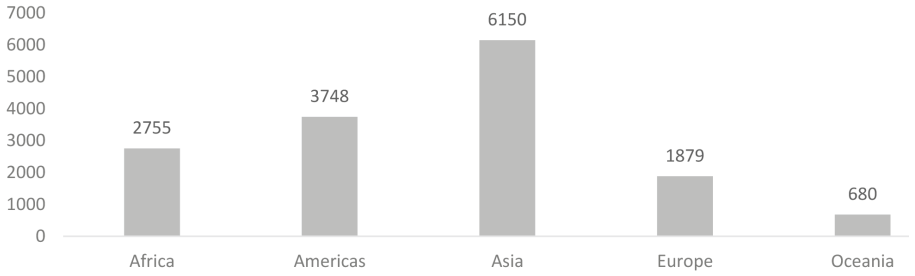
Introducción

La amenaza sísmica es considerada una de las dinámicas geológicas más inquietantes para la sociedad global, sus huellas sobre diferentes territorios han dejado escenarios de devastación, pérdidas humanas y económicas difíciles de afrontar. Lo anterior se expresa en las cifras producto de los impactos de este fenómeno en el mundo, tal como se revela en la base de datos de eventos de emergencia (EM-DAT) en la que se registran para el periodo 1900–2019 un total de 15212 eventos sísmicos, de los cuales 2755 se encuentran reportados en el continente africano, 3748 en América, 6150 en Asia, 1879 en Europa y 680 en Oceanía (Figura 1).

Colombia posee regiones en que la presencia de sismos ha dejado huellas imborrables, casos como el del terremoto de Popayán en 1983, el sismo del eje cafetero en 1999, el sismo de Pizarro en 2004, entre otros. El Departamento del Valle del Cauca al Suroccidente colombiano se encuentra en la zona de contacto de las placas litosféricas de Nazca y Sudamericana, creando una estructura tectónica compleja en la cual se revelan, al menos, tres tipos de fuentes importantes generadoras de eventos sísmicos. Las zonas de Subducción, de

Benioff y las fallas corticales, las cuales, son responsables de la alta sismicidad que se presenta en la región, generando, por tanto, que sea catalogada como una de las zonas de mayor amenaza sísmica en el país (AIS, 1998).

Figura 1. Distribución global de sismos registrados en el periodo 1900 – 2019



Fuente: elaborado a partir de la base de datos EM-DAT.

En este contexto resulta de gran importancia el monitoreo de la actividad sísmica de la región para lo cual la Universidad del Valle a través del Observatorio Sismológico del Sur Occidente colombiano ha instalado desde hace varios años, una red sismológica regional y, en convenio con el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente DAGMA, una red de acelerógrafos en la ciudad de Cali que le permite tener conocimiento del comportamiento de la sismicidad regional y la respuesta sísmica local, factores importantes pala la planificación territorial y la toma de decisiones en materia de gestión del riesgo sísmico.

El capítulo se encuentra distribuido de la siguiente forma: en el numeral 1 se describe de manera detallada la composición y funcionamiento de la red sismológica del suroccidente colombiano. En segundo lugar, se muestra la estructura y operación de la red de acelerógrafos de Cali. En el numeral 3 se hace una síntesis y caracterización de la sismicidad histórica de la ciudad de Santiago de Cali. Finalmente se presentan las conclusiones del documento.

Funcionamiento de la red sismológica del suroccidente colombiano

El Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano (OSSO) de la Universidad del Valle, realiza el monitoreo sismológico de la región del suroccidente colombiano a través de un conjunto de estaciones que integran, por un lado, la Red Sismológica del Suroccidente Colombiano (REDSW) que al mismo tiempo opera la Red de Acelerógrafos de Cali (RAC) de propiedad del Municipio Santiago de Cali (Departamento Administrativo de Gestión del medio Ambiente DAGMA).

Las estaciones pertenecientes a la RAC, se conforman por ocho equipos Etna2 y seis Etna ambos modelos están configurados a una sensibilidad de 2,5 V/g@100Hz, con transmisión de datos en tiempo real. La REDSW cuenta con cinco estaciones distribuidas en el departamento del Valle de Cauca, configuradas con cinco *dataloggers* (Digitalizadores) Quanterra Q330 configurados a 200Hz (kinemetrics, 2007), cuatro sensores de movimiento fuerte Episensor FBA ES-t con una sensibilidad de 80V/g (Templeton, 2017) y un sensor de corto periodo Sercel L4-3D 1Hz (Templeton, 2017). Al igual que la RAC la transmisión y la recepción de datos es en tiempo real.

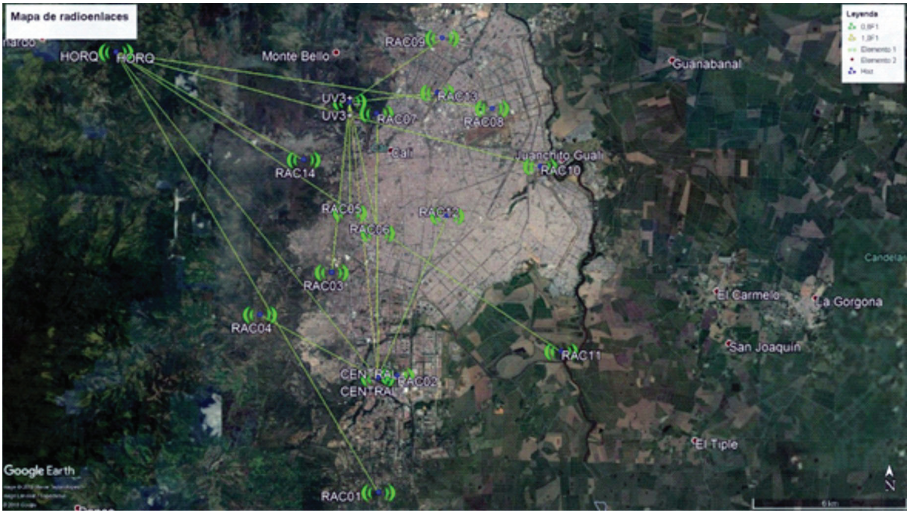
En términos generales, la REDSW tiene implementado un sistema de adquisición de formas de ondas denominado *Earthworm* (EW) (ISTI, 2016) el cual permite extraer información de los diferentes *dataloggers* de las estaciones sismológicas, así como el intercambio de la información con otros institutos que cuenten con información de formas de ondas sismológicas y a su vez requieran de la información de las estaciones propias de la REDSW. El sistema EW en su forma de diseño e implementación tiene como características: modularidad, independencia del sistema, escalabilidad, conectividad y robustez, lo que permite el ajuste y crecimiento prolongado de los centros de recepción de datos sismológicos.

El Sistema de Procesamiento implementado en los servidores de la Red Sismológica del Suroccidente Colombiano es SEISAN Versión 11 (Ottomöller *at al*., 2020). El SEISAN (Sistema de Análisis Sísmico), es un completo set de programas y una simple base de datos para el análisis de sismos desde datos análogos y digitales, con éste es posible localizar tanto sismos locales como globales o telesismos, además de la localización de los eventos sísmicos es posible calcular magnitudes, determinar parámetros de espectros, momento sísmico, entre otras virtudes del estudio sismológico.

Además del SEISAN, la REDSW tiene implementado software para el análisis de diferentes procesos sísmicos, entre los programas contenidos en los servidores están el SAC, Strong Motion Analyst (Kinemetrics, 2004), GMT (Generic Mapping Tools), etc. Tanto el Sistema de Procesamiento como el Sistema de Adquisición, se envían a los computadores del Área de Análisis y Procesamiento mediante un servicio de Linux llamado NFS (Servidor de Archivos de Red), lo que permite a los clientes usar los archivos y programas en cada uno de los PC's sin intervenir en los servidores principales.

Actualmente se cuenta con un sistema de telemetría para la comunicación de las estaciones remotas con el sistema de adquisición, este sistema de comunicaciones fue diseñado por el Área de Sistemas y Comunicaciones de la Red Sismológica del Suroccidente Colombiano y se basa en la topología de red tipo estrella (Figura 2).

Figura 2. Topología de Red tipo estrella de la Red de Acelerógrafos de Santiago de Cali



Fuente: ilustración propia visualizada en Google Earth.

Esquema funcional del sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo de la REDSW está integrado por dos subsistemas generales correspondientes al sistema de la estación remota y el sistema de centro de datos y control (Figura 3). El sistema de la estación remota comprende los subsistemas de alimentación o de potencia, de adquisición en campo y de transmisión de datos. Mientras que el sistema de datos y control se compone, al igual que el sistema de la estación remota, de un subsistema de alimentación o potencia, un sistema de recepción de datos y un sistema de adquisición de señales sismológicas. Estos sistemas son compatibles y funcionales tanto para las estaciones acelerográficas como sismológicas.

Sistema de la estación remota

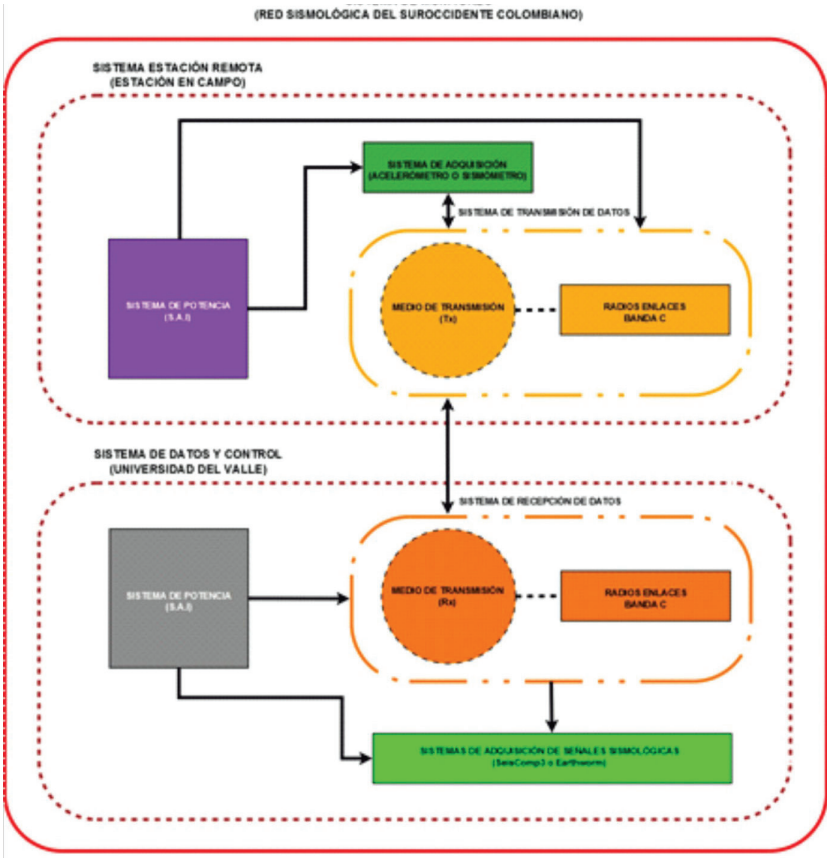
a) Sistema de potencia

El sistema de potencia en ambos subsistemas es el principal, dado que alimenta energéticamente los demás subsistemas.

Lo ideal es que posea un Sistema de Alimentación Ininterrumpida (S.A.I.), bien sea fotovoltaica o energía eléctrica, que se encargue de la alimentación y funcionamiento del resto de los subsistemas, sin dejar a parte los sistemas de puesta a tierra necesarios, los cuales son resaltados como parte importante por la legislación Colombiana y contempladas en estándares internacionales

en lo concerniente a la protección y aseguramiento de la operación a bajo ruido y que cumple con la función de retorno a tierra para el EMI/RFI y transitorios.

Figura 3. Esquema de monitoreo sismológico de la REDSW



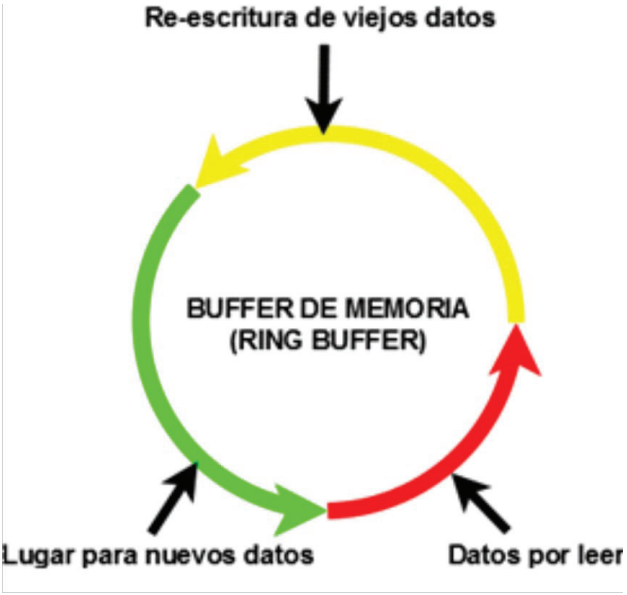
Fuente: ilustración propia.

b) Sistema de adquisición en campo

El sistema de adquisición en campo es el subsistema raíz o primordial en cuanto al objetivo del sistema principal y es el encargado de registrar los movimientos sísmicos ocurridos en la zona de influencia. Los sistemas de adquisición en su mayoría utilizan una parte de la memoria física del equipo para la creación de una memoria virtual y volátil, como se muestra en la Figura 4, lo que permite almacenar de forma temporal los datos recibidos para su posterior envío, a través del sistema telemétrico, a los servidores de

adquisición en el centro de datos y control, donde el *buffer* de memoria es utilizado para extraer y almacenar las formas de ondas.

Figura 4. Modo operacional y descriptivo de un *ring buffer*



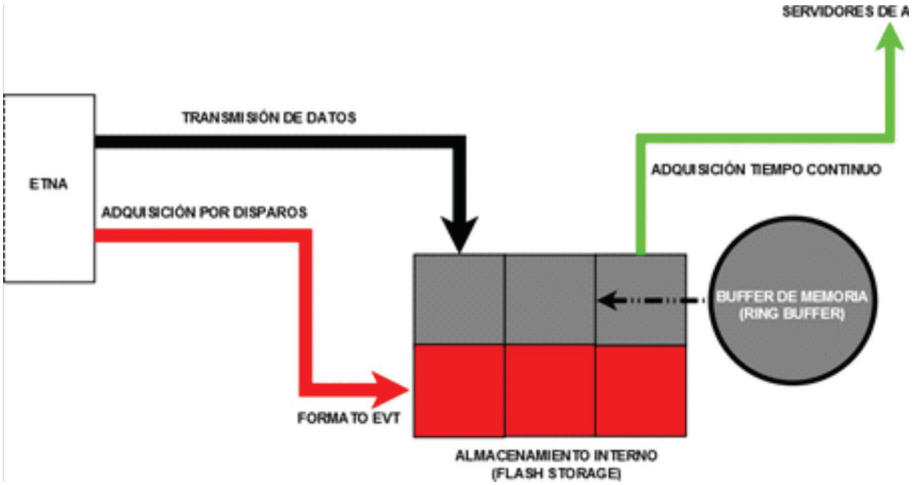
Fuente: ilustración propia.

En el sistema de adquisición de campo de la REDSW se tienen equipos de diferentes modelos y configuración. En este caso se describe el modo de adquisición de los equipos modelos Etna (Templeton, 2017) y Etna2 (Kinemetrics, 2017).

Acelerógrafo Etna

Etna es un acelerógrafo de la familia Altus de la compañía Kinemetrics, no desarrollado para la comunicación en tiempo real. Debido a las limitaciones que posee para la transmisión de datos, se propuso implementar herramientas sugeridas por la propia casa matriz para la realización de comunicaciones TCP/IP mediante conversores RS232 a Ethernet con lo que es posible realizar adquisiciones en tiempo real. En la Figura 5 se aprecia cada uno de los elementos que intervienen en el proceso de la adquisición de formas de ondas, donde el factor primordial es la memoria de almacenamiento interno, encargada de crear el espacio en memoria (*ring buffer*) y asignarlo para la transmisión de datos al servidor de formas de ondas; además, dentro del espacio de memoria restante es posible alojar los eventos producidos por disparos.

Figura 5. Descripción del modo de adquisición del acelerógrafo Etna

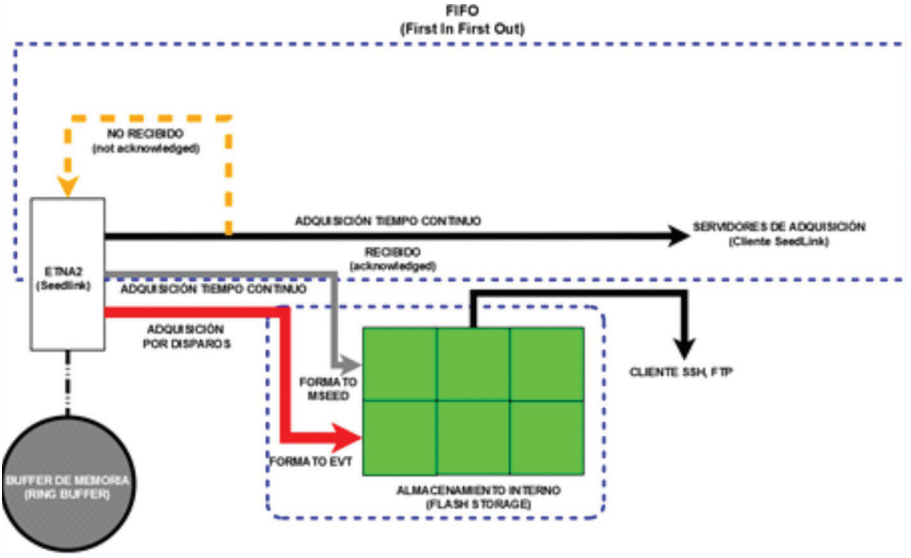


Fuente: ilustración propia.

Acelerógrafo Etna2

El acelerógrafo Etna2, es un equipo que tiene todas las prestaciones necesarias para el estudio de movimientos fuertes, prestaciones que van a la par de las nuevas tecnologías en la digitalización de datos sísmicos, así como los protocolos de comunicaciones necesarios para el control y enlaces desde y hacia servidores de adquisición. En la Figura 6, se observan los diferentes elementos y formas de interacción en la adquisición de información de eventos sísmicos. A diferencia del Etna, éste tiene un procesador con memoria cache lo cual permite tener un *buffer* de memoria nativo, lo que permite no ocupar espacio en memoria de almacenamiento, que por su tecnología es mayor que los equipos pertenecientes a la familia Altus. Al estar el *buffer* de memoria instalado y debidamente configurado bajo el protocolo de comunicaciones seedlink nos permite enviar información a los servidores de adquisición, éste permite enviar información usando el principio de un algoritmo denominado FIFO (*First In First Out*), y a su vez, usa un mensaje (ACK) donde el destino de la comunicación envía al origen de esta para confirmar la recepción del mensaje, lo que permite no perder información en la transmisión de datos. El ACK también puede informar si se ha recibido de forma íntegra y sin cambios.

Figura 6. Descripción modo de adquisición acelerógrafo Etna2



Fuente: ilustración propia.

El equipo Etna2, además de las prestaciones ofrecidas por el equipo Etna para el almacenamiento de eventos por disparos en formato EVT, tiene la capacidad de almacenar en su memoria interna la información registrada por el sensor en formato mseed de cada uno de los canales configurados para la adquisición.

Sistema de transmisión de datos (Tx)

El sistema de transmisión de datos es el encargado de envío de las señales sismológicas, desde los digitalizadores en campo hasta los servidores de adquisición en el centro de datos, mediante radio enlace que utiliza la banda de comunicaciones C para el transporte de la información, que posteriormente son almacenados en los servidores destinados con este fin.

a) Sistema de datos y control. Sistema de recepción de datos (Rx)

El sistema de recepción de datos es el encargado de recibir las señales sismológicas provenientes de los digitalizadores en campo y almacenarlas en los servidores de adquisición en el centro de datos. Este proceso se realiza mediante antenas receptoras interconectadas por equipos de infraestructura de redes y utilizan la misma banda de comunicaciones.

b) Sistemas de adquisición de señales sismológicas

Este sistema se conforma de servidores encargados de hacer la petición para el envío y recepción de señales sismológicas procedentes desde las estaciones remotas o en campo. En la actualidad, en la REDSW se está implementando el sistema de adquisición SeisComp3 (SC3) (GEMPA, 2020) como sistema principal de adquisición de datos y se ha dejado al *earthworm* (EW) como sistema de adquisición de las estaciones que no contienen los módulos de comunicaciones con el SeisComp3, en el caso particular se refiere a las estaciones que tienen un sistema Altus (K2, Etna) como *datalogger* (digitalizador), esto debido a la estabilidad del SC3 frente al EW en lo referente a la latencia y al *gaps* o vacíos en las formas de ondas. Se pretende que SeisComp3 sea utilizado para el procesamiento primario y automático de las formas de ondas procedentes de las estaciones en campo, así como la elaboración de *shakemap*.

2. Red de Acelerógrafos de Cali (RAC)

La Red de Acelerógrafos de la ciudad de Cali (RAC) fue instalada en el año 2004 como uno de los productos del estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad. Actualmente, consta de 14 estaciones distribuidas a lo largo del área urbana del municipio (Cuadro 1).

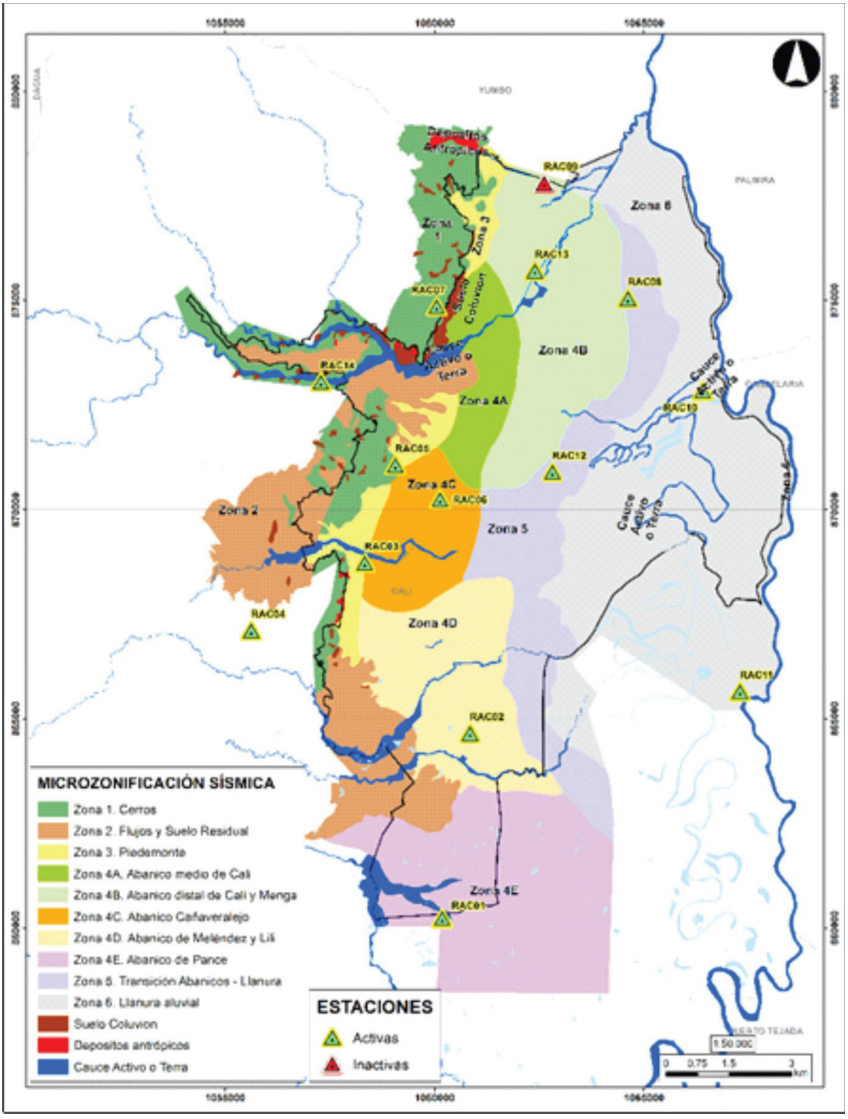
Cuadro 1
Nombre de las estaciones de la Red de Acelerógrafos de Cali –RAC-

Código Estación	Nombre	Geología del área de ubicación	Topografía del área de ubicación
RAC01	Parque de las Garzas	Suelo	Plana
RAC02	INGEOMINAS	Suelo	Plana
RAC03	Seminario Bautista	Suelo	Plana
RAC04	Planta La Reforma	Suelo	Ondulada
RAC05	Hospital Universitario	Suelo	Ondulada
RAC06	Canchas Panamericanas	Suelo	Plana
RAC07	Ecoparque Bataclán	Roca	Ondulada
RAC08	Transito Salomia	Suelo	Plana
RAC09	Bomberos Norte	Suelo	Plana
RAC10	Puerto Mallarino	Suelo	Plana
RAC11	Navarro	Suelo	Plana
RAC12	Centro de Salud Luis H. Garcés	Suelo	Plana
RAC13	Vivero DAGMA	Suelo	Plana
RAC14	Zoológico	Roca	Ondulada

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7 se puede observar la distribución espacial de las estaciones de la RAC, ubicadas en diferentes zonas de amenaza sísmica según el mapa de Microzonificación Sísmica de Cali (INGEOMINAS, 2005).

Figura 7. Localización de las estaciones de la RAC, ubicadas en las diversas zonas de amenaza sísmica determinadas por el estudio de Microzonificación sísmica de la ciudad de Cali



Fuente: INGEOMINAS, 2005.

El objetivo del funcionamiento de la RAC consiste en monitorear y dar a conocer la respuesta sísmica de los suelos de la ciudad de Cali ante la ocurrencia de un evento sísmico fuerte de tal manera que se produzca la información necesaria para diseñar, construir y planificar adecuadamente los procesos de desarrollo que se lleven a cabo en las diferentes zonas de Santiago de Cali. La información generada es almacenada mediante la memoria interna de cada equipo acelerográfico presente en las estaciones y es recolectada después de la ocurrencia de un evento sísmico considerable con influencia en la ciudad de Cali. Posterior al almacenaje de la información en las estaciones, estos datos requieren ser tratados, procesados y analizados en el laboratorio para poder generar resultados. El proceso de registro, almacenamiento y procesamiento se realiza involucrando los tres componentes en la forma como se explicó arriba. Cada estación de la RAC se compone de una caseta construida en ladrillo y concreto dentro de la cual se encuentra el equipo acelerográfico y los equipos del sistema de potencia (Fotografía 1); para el caso de los equipos del componente telemétrico (radios), se encuentran localizados al exterior de las casetas en antenas o postes en altura de tal manera que faciliten la transmisión de la información sin el menor obstáculo posible (Fotografía 1 y 2).

Fotografía 1. Tipo de casetas y equipos internos de las estaciones de RAC

Fuente: fotografías proporcionadas por el equipo.

Fotografía 2. Equipamiento externo, panel solar y antenas de transmisión, en las estaciones de RAC

Fuente: fotografías proporcionadas por el equipo.

El constante crecimiento urbanístico y poblacional de la ciudad de la ciudad de Cali hace necesario la actualización de las normas para garantizar las condiciones mínimas de seguridad respecto a la construcción de nuevas edificaciones, así como la regulación de las existentes. Desde el año 2013, fecha desde la cual se vienen realizando los convenios entre la entidad ambiental de la ciudad de Cali (DAGMA) y la Universidad del Valle (Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente) para la operación y mantenimiento de la RAC, hasta final de 2018 se ha podido realizar el procesamiento y análisis de 21 eventos sísmicos con influencia en la ciudad de Cali (Cuadro 2 y Figura 8).

Debido a la poca ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud que hayan afectado la ciudad de Cali, desde el periodo de funcionamiento continuo de la RAC, la muestra de sismos procesados no puede ser concluyente respecto a los registros experimentales captados por las estaciones, ya que los eventos de magnitudes menores y de grandes distancias hipocentrales no logran clasificarse como movimientos fuertes para la ciudad al no superar los umbrales de disparo de dichas estaciones. Lo anterior se resume en que los sismos contenidos en la base de datos de procesamiento de la RAC no contienen todas las características estimadas que conllevan los sismos y modelos analíticos usados para la construcción de los espectros de diseño correspondiente a cada zona. En este sentido, es necesario valorar la importancia que representa la RAC y los numerosos usos que se le pueden

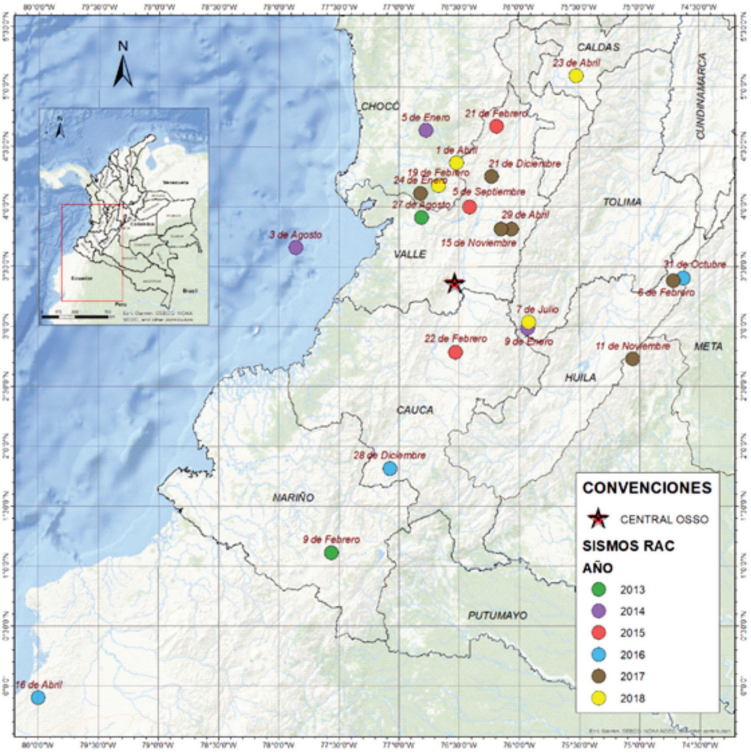
dar para el conocimiento y mitigación del riesgo sísmico por medio de mejoras en las normas de sismo resistencia de las edificaciones a partir de la respuesta dinámica de los suelos.

Cuadro 2
Muestra de sismos registrados por las estaciones de la RAC entre los años 2013 y 2018

Fecha			Tiempo			Coordenadas		PROF	Magnitud		Departamento	Municipio
Año	Mes	Dia	Hora	Min	Seg	Lat	Long		Ml	Mw		
2013	2	9	14	16	5	1.113	-77.561	162.8	6.4	7.0	Nariño	Guaitarilla
2013	8	27	23	22	4	3.913	-76.812	4.0	4.5	4.4	Valle Del Cauca	Dagua
2014	1	5	3	36	39	4.642	-76.774	19.0	5.2	5.3	Choco	Sipi
2014	1	9	12	50	16	2.989	-75.930	0.0	5.0	5.2	Huila	Santa María
2014	8	3	9	38	4	3.661	-77.861	56.0	4.8	5.0	Choco	Litoral del San Juan
2015	2	21	22	26	45	4.674	-76.186	95.5	5.0	5.2	Valle Del Cauca	Argelia
2015	2	22	12	56	24	2.785	-76.529	138.7	4.6	5.7	Cauca	Caldono
2015	9	5	23	14	53	4.002	-76.412	135.7	4.5	4.9	Valle Del Cauca	Calima
2016	4	16	23	58	34	-0,1	-80	20	6,3	5,9	Ecuador	Perdernales
2016	10	31	0	20	12	3.405	-74.636	13.2	5.2	5.3	Huila	Colombia
2016	12	28	5	5	5	1.817	-77.077	150.0	4.5	4.8	Cauca	Mercaderes
2017	1	24	19	35	39	4.116	-76.821	87.9	4.1	4.1	Valle Del Cauca	Buenaventura
2017	2	6	13	2	44	3.381	-74.718	0.0	5.3	5.4	Huila	Colombia
2017	4	29	10	6	34	3.818	-76.061	49.5	4.4	4.5	Valle Del Cauca	Ginebra
2017	11	11	14	45	20	2.730	-75.056	2.0	4.8	4.8	Huila	Rivera
2017	11	15	2	12	18	3.816	-76.149	159.5	4.2	4.4	Valle Del Cauca	Ginebra
2017	12	21	19	26	39	4.257	-76.228	146.0	4.7	4.9	Valle Del Cauca	Bugalagrande
2018	2	19	1	50	0	4.180	-76.67	97	4.7		Valle Del Cauca	Trujillo
2018	4	1	15	17	2	4.370	-76.520	108		4.2	Valle Del Cauca	Bolivar
2018	4	23	15	42	11	5.096	-75.524	121		5.4	Caldas	Manizales
2018	7	7	0	19	46	3.036	-75.924	9	4.5		Huila	Volcán Nevado Del Huila

Fuente: información proporcionada por los sismos (RSNC, 2018).

Figura 8. Mapa de localización de la muestra de eventos sísmicos trabajados



Fuente: RSNC, 2018.

3. Sismos históricos en Santiago de Cali

La ciudad Santiago de Cali, localizada en el suroccidente del territorio colombiano, históricamente se ha visto afectada por diversos eventos sísmicos que, por un lado, son generados en la zona de subducción que se produce por el choque entre las placas Nazca y Sudamericana, por otro lado, por la actividad de las fallas geológicas presentes en la región. En el Cuadro 3 se presentan los principales eventos sísmicos históricos que han dejado algún tipo de afectación en la ciudad, mostrando la fecha de ocurrencia, localización hipocentral, la magnitud y la intensidad máxima observada como la evaluada en Cali.

Cuadro 3
Sismos históricos que han dejado efectos en la ciudad de Cali

Fecha			Coordenadas hipocentro			Magnitud	Intensidad máxima observada	Intensidad local en Cali
Año	Mes	Día	Lat. °n	Long. °w	Prof. (km)		Ems-92/98	Ems-92/98
1566	¿Mar?	-	3.0	76.5	-	-	VII	VII
1766	Jul	9	3.7	76.3	-	-	VII	VII
1906	Ene	31	1.0	81.5	25	8.7 Mw	IX	VI
1925	Jun	7	3.9	76.4	170	6.8 Ms	VII - VIII	VII – VIII
1958	Ene	19	1.2	79.5	60	7.8 Ms	VII – VIII	IV
1961	Dic	20	4.6	75.6	176	6.9 Ms	VI	VI
1962	Jul	30	5.4	75.9	69	6.9 Ms	VIII	VIII
1967	Feb	9	2.9	74.9	Sup	6.8 Ms	VII - VIII	VII – VIII
1979	Feb	9	2.9	74.9	105	7.2 Mw	IX	VII
1979	Dic	12	1.2	79.3	60	8.1 Mw	X	VII
1991	Nov	19	4.5	77.5	104	-	VIII	VI – VII
1995	Feb	8	4.1	76.7	100	6.6 Mw	VIII – IX	VII
1995	Ago	19	4.6	75.4	118	6.5 Mw	V – VI	V – VI
2004	Nov	15	4.8	77.8	Sup.	6.7 Mw	-	VII
2012	Sep	30	1.98	76.6	166	7.1 Mw	-	V-VI

Fuente: Salcedo *et al.* , 2005.

Dentro de los eventos históricos que han afectado la ciudad de Cali sobresale el sismo del 7 de junio de 1925, en el cual se presentaron daños en templos e iglesias, como agrietamientos de muros y desprendimientos de cornisas, capiteles y cúpulas. Tal es el caso de las iglesias de San Pedro, San Francisco, La Ermita, San Nicolás, Santa Rosa, La Merced y la capilla de Santa Librada. Daños mayores se notaron en edificaciones como el *Salón Moderno*, el Edificio del diario *El Relator*, la clínica, el cuartel de la Policía y la casa Municipal. Otros edificios como el cuartel del Ejército, el edificio Emilio Otero, los edificios de la administración municipal, del Ferrocarril del Pacífico y del hotel Majestic presentaron daños de consideración. El hotel Francia fue destruido totalmente. Según reportes del diario El Relator, no quedó casa alguna sin averías (Salcedo *et al.*, 2007). Este evento ha sido relocalizado en las coordenadas j = 3,45°N; l = -76,49°W, y profundidad focal de h_n = 37,4±2,89 km, y magnitud Richter 6,88M.

4. Actividad sísmica reciente

En la actualidad, la sismicidad regional del Suroccidente Colombiano es monitoreada por la Red Sismológica Nacional del Servicio Geológico Colombiano que tiene cobertura en todo el territorio nacional, y por la Red Sismológica del Suroccidente Colombiano del Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano de la Universidad del Valle, que ha hecho ingentes esfuerzos para mantener en funcionamiento esta importante red localizando los eventos sísmicos locales y regionales. Con ello, se brinda información confiable y oportuna a la comunidad y a las autoridades competentes para la toma de decisiones en materia de atención y prevención de situaciones de emergencia por causa de la ocurrencia de un terremoto fuerte; así como para el estudio detallado de las diferentes fuentes sismogénicas y las estructuras tectónicas presentes en la región.

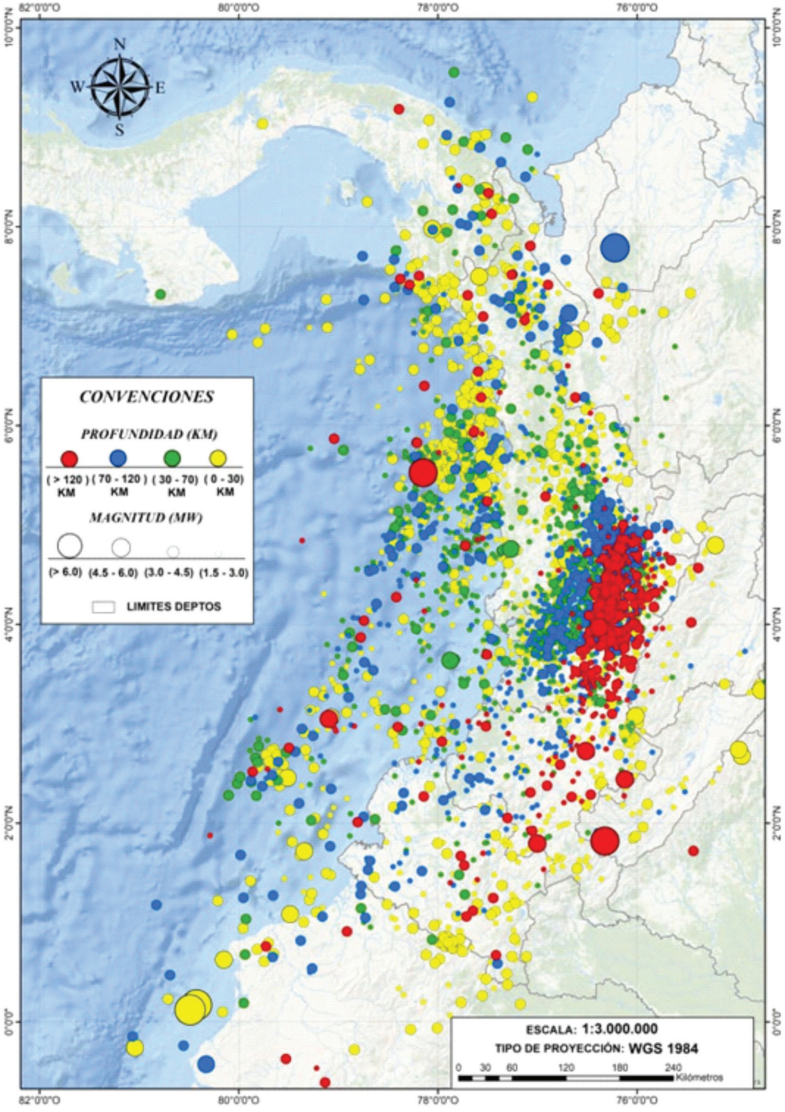
La sismicidad de la región suroccidental del territorio colombiano es dominada, por un lado, por la interacción de las placas Nazca y Sudamericana, que, de acuerdo con INGEOMINAS & DAGMA (2005), generan una compleja zona de subducción que se fragmenta en los segmentos norte, centro y sur, cuyos planos de Benioff varían entre sí y con potencial sísmico diferente y, por otro lado, por la presencia de diversos sistema de fallamiento que según Nivia (2001), resultan de la fuerte compresión entre las placas tectónicas y se expresan en direcciones N20°- 30°E y N40º-50ºW principalmente.

En la Figura 9 puede observarse la distribución espacial de la sismicidad registrada por la RedSW en la región occidental de Colombia para sismos de magnitud superior a 1,5 Mw y profundidades desde superficiales a intermedios en el periodo entre 2012 a 2017. Se nota una fuerte concentración de sismos en la parte central a una latitud media de 4° norte, que a medida que se extiende desde la zona costera hacia el continente, los sismos alcanzan profundidad superior a los 120 kilómetros a una longitud aproximada de 76° oeste, manifestando de esta forma la presencia del plano de Benioff.

La distribución temporal de esta sismicidad, como se muestra en la Figura 10, indica que se trata de una zona sísmica muy activa, donde por año se registran más de 400 eventos de diferentes magnitudes, siendo los años 2014 y 2015 los que muestran mayor frecuencia de ocurrencia. La distribución de la sismicidad con profundidad muestra grandes concentraciones de eventos superficiales muy profundos, tanto que este caso se ha discriminado en los siguientes rangos: superficiales, entre 0 y 30 km; intermedios, entre 30 y 70 km; profundos, entre 70 y 120 km, y muy profundos, mayores de 120 km (Figura 11). Según se muestra en la Figura 12, la mayor concentración de esta sismicidad se presenta en los eventos superficiales, donde se tienen cerca de 2000 eventos en el rango de magnitudes y periodos indicados, cuya distribución geográfica cubre toda la zona del occidente del país con fuertes concentraciones de hipocentros en la

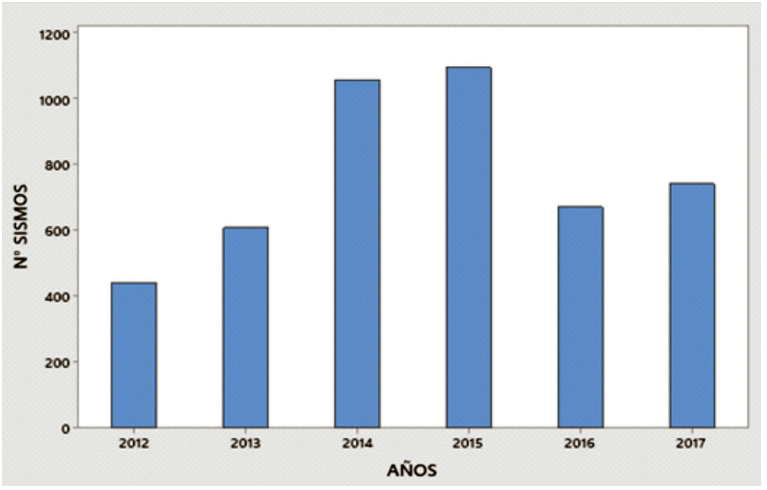
zona de contacto de las placas oceánica de Nazca y continental Sudamericana y al interior del continente (Figura 13), reflejando la actividad sísmica de la zona de subducción y del fallamiento activo presente en la región.

Figura 9. Mapa de epicentros en la región occidental del territorio colombiano, localizados por la RedSW en el periodo 2012 hasta 2017



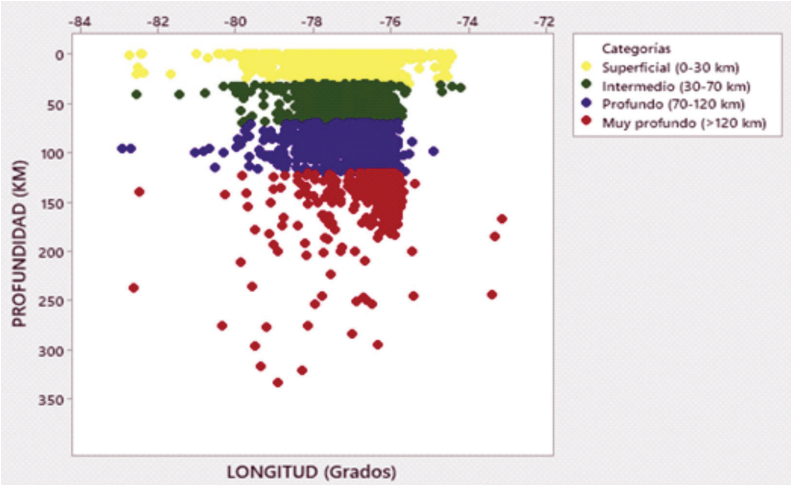
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Distribución temporal del número de sismos registrados por la RedSW en el periodo 2012 hasta 2017 con magnitud superior a 1,5 Mw y profundidad entre superficial e intermedia



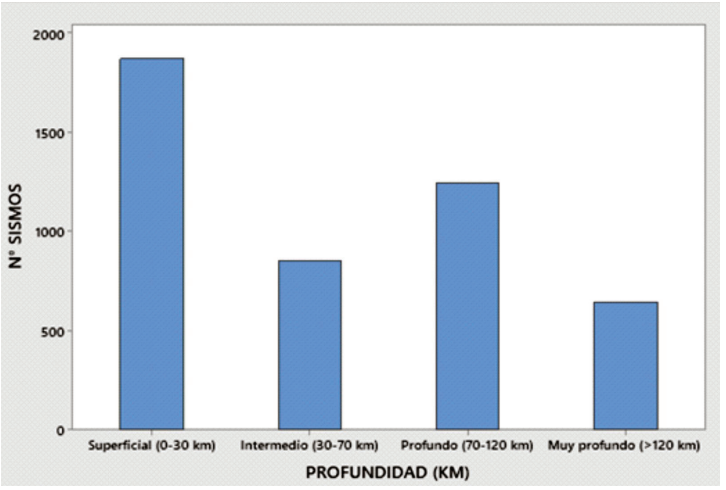
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Distribución en profundidad del número de sismos registrados por la RedSW en el periodo 2012 hasta 2017 con magnitud superior a 1,5 Mw y profundidad entre superficial e intermedia



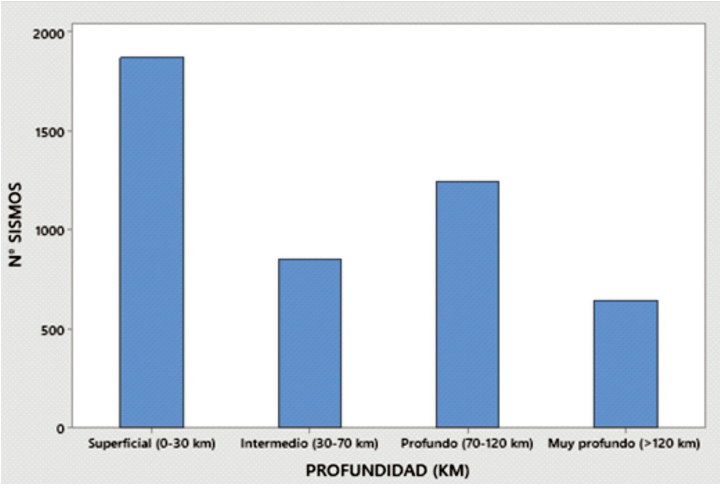
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Diagrama de la distribución en profundidad del número de sismos registrados por la RedSW en el periodo 2012 hasta 2017 con magnitud superior a 1,5 Mw y profundidad entre superficial e intermedia



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Mapa de epicentros de sismos superficiales en la región occidental del territorio colombiano, localizados por la RedSW en el periodo 2012 hasta 2017



Fuente: elaboración propia.

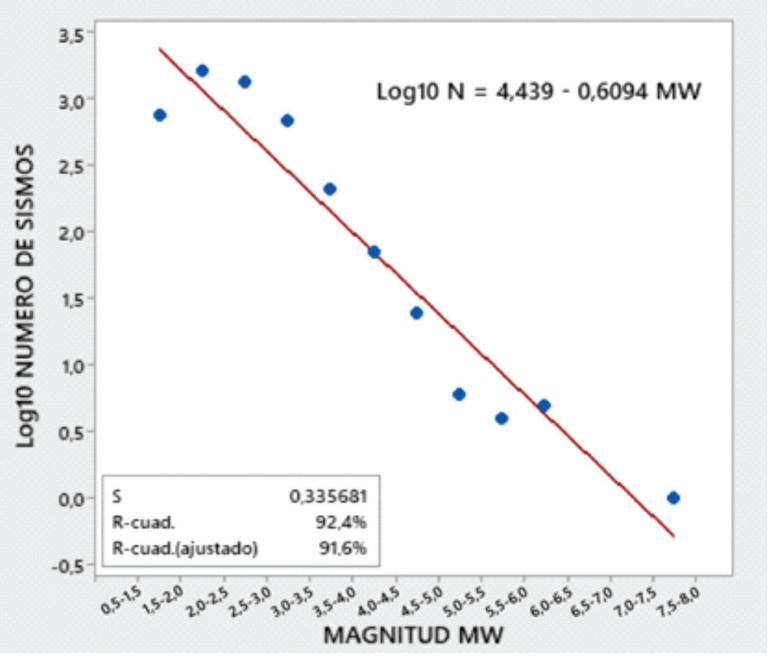
La frecuencia de ocurrencia de la sismicidad en la región se establece mediante la relación de Gutenberg-Richter (relación G-R), expresada como:

$$LogN = a - bM$$

Dónde: M es la magnitud, a y b son constantes que determinan las particularidades del medio geofísico. El parámetro "a" corresponde al intercepto de la línea de mejor ajuste con el eje que representa el número de sismos, por tanto, se interpreta como el grado de actividad sísmica de la región; mientras que el parámetro "b", que tiene un valor cercano a 1, corresponde a la pendiente de la línea de mejor ajuste. En una región determinada, este parámetro está relacionado con el campo de esfuerzos tectónicos (Bune y Gorshkov, 1980; Risnichenko, 1985).

La Figura 14 muestra el gráfico de frecuencia de ocurrencia de terremotos para la región occidental del territorio colombiano, con sismicidad registrada por la RedSW en el periodo entre 2012 y 2017, con sismos de magnitud superior a 1,5Mw y profundidades entre 0 y 350 kilómetros.

Figura 14. Gráfico que representa la frecuencia de ocurrencia de sismos en la región occidental del territorio colombiano, registrados por la RedSW en el periodo 2012 hasta 2017



Fuente: elaboración propia.

Se aprecia que el punto donde la recta decae, correspondiendo a la magnitud mínima representativa es en el intervalo de magnitud Mw entre 2,0 y 2,5. De esta manera, la relación de frecuencia de ocurrencia de terremotos para la zona está definida por la siguiente ecuación:

$$LogN = 4{,}44 - 0{,}61Mw$$

Donde los valores a y b aproximados corresponden a 4,44 y 0,61, respectivamente. Sin embargo, se debe precisar que para obtener valores más exactos y confiables de estos parámetros es necesario realizar un estudio de "completitud" del catálogo ya que, como se aprecia en la Figura 15, la recta de ajuste aún es muy deficiente, lo que indica los diferentes rangos de magnitudes considerados no tienen un número completo de eventos que permita el trazado de una línea recta de mínima dispersión.

Conclusiones

El monitoreo sísmico es de gran importancia para el desarrollo de procesos de conocimiento y gestión del riesgo en el territorio dada la complejidad geofísica de los lugares en que estos fenómenos pueden presentarse, poniendo en riesgo a la población y su infraestructura.

Para el caso específico del sur occidente de Colombia este monitoreo es realizado por el Observatorio Sismológico del Sur Occidente colombiano de la Universidad del Valle que cuenta con una red sismológica y en convenio con el DAGMA opera la red de acelerógrafos de la ciudad de Cali. En este sentido, desde el año 2012 se tiene conocimiento de las características y particularidades de la sismicidad de la región.

La distribución espacial de esta sismicidad, tomada con sismos de magnitud superior a 1,5 Mw y profundidades desde superficiales a intermedias, muestran una fuerte concentración de eventos en la parte central a una latitud media de 4° norte, que a medida que se extiende desde la zona costera hacia el continente, los sismos alcanzan profundidad superior a los 120 kilómetros a una longitud aproximada de 76° oeste, manifestando de esta forma la presencia del plano de Benioff. La distribución temporal de esta sismicidad indica que se trata de una zona sísmica muy activa, donde por año se registran más de 400 eventos de diferentes magnitudes, siendo los años 2014 y 2015 los que muestran mayor frecuencia de ocurrencia.

En cuanto a la distribución de la sismicidad en profundidad, se nota mayor concentración en los eventos superficiales, donde se tienen cerca de 2000 sismos en el rango de magnitudes y periodos indicados, cuya distribución geográfica cubre toda la zona del occidente del país con presencia de hipocentros en la zona de contacto de las placas oceánica de Nazca y continental Sudamericana

y al interior del continente, reflejando la actividad sísmica de la zona de subducción y del fallamiento activo presente en la región.

De esta manera, la frecuencia de ocurrencia de la sismicidad en la región establecida mediante la relación de Gutenberg-Richter (relación G-R) muestra que los valores aproximados de los parámetros a y b corresponden a 4,44 y 0,61, respectivamente, lo cual permite indicar que se trata de una zona sísmicamente muy activa.

Bibliografía

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 1998. Estudio general de amenaza sísmica de Colombia. *Publicación Especial de Ingeominas* 1998. Bogotá. 252p.

Bermúdez, M. L., Duarte, J. A., & de Quindío, C. O. S., 2002. La Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia. En Primer Simposio Colombiano de Sismología: Avances de la Sismología Colombiana en los últimos 20 años (p. 12). Colombia. Universidad Nacional de Colombia; Colombia. Observatorio Sismológico de Quindío; Colombia. INGEOMINAS.

Bermúdez, M. L.; Llanos, D.; Rengifo, R.; Villa, M. y Ojeda, A., s.f. *Red de Acelerógrafos de Santiago de Cali e implicaciones para el estudio de microzonificación sísmica*. Versión electrónica disponible en: http://bdrsnc.ingeominas.gov.co/publicaRNAC/PUBLICACIONES/SISMOLOGIA_2004/Red_Cali_Bermudez.pdf. Consultado el día 05 de octubre de 2012.

Bune V. I., Gorshkov G. P. (Editores) 1980. *Zonificación Sísmica del Territorio de la URSS*. Moscú. 307 p. (en Ruso).

Global Earthquake Monitoring Processing Analysis (GEMPA), 2020. SeisComP3 documentation, https://docs.gempa.de/seiscomp3/current/. Consultado: febrero 10 de 2020.

Instrumental Software Technologies, Inc. ISTI, 2016. *Earthworm*, https://isti.com/products/eq-monitoring-seismic-software/earthworm/. Consultado: febrero 10 de 2020.

Kinemetrics Inc., 2004. Kinemetrics Strong Motion Analyst.

Kinemetrics Inc., 2007. Q330HR/Q330 Operation and Overview of Support Tools and Baler Operation - v20070409.

Kinemetrics Inc., 2017. *ETNA2 Accelerograph User Manual*.

Mary E. Templeton, 2017. IRIS Library of Nominal Response for Seismic Instruments. *Incorporated Research Institutions for Seismology*. Dataset. https://doi.org/10.17611/S7159Q. Consultado: febrero 10 de 2020.

Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano (OSSO) y Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA), 2018. Fortalecimiento de la red de acelerógrafos en el municipio de Santiago de Cali y evaluación de los registros sísmicos: *Informe Técnico* No 4. Convenio interadministrativo No. 4133.010.27.0.1.022-2018 DAGMA – Universidad del Valle.107 p.

Ottemöller, Voss and Havskov, 2017. *Seisan earthquake analysis software for windows, solaris, linux and macosx*.

Risnichenko Yu. V., 1985. *Problemas de la Sismología. Obras Escogidas*. Nauka, 408p. (en ruso).

Red Sismológica Nacional De Colombia (RSNC), 2018. Consulta Catalogo Sísmico. Versión electrónica disponible en: https://www2.sgc.gov.co/sgc/sismos/Paginas/catalogo-sismico.aspx.

Consultado el día 17 de diciembre de 2018.

Salcedo Hurtado, E. de J.; Romero Vergara, M. D. y Vallejo Chocué, M. A., 2007. Contribución al análisis macrosísmico del terremoto del 7 de junio de 1925: principales efectos en la ciudad de Cali. En: *Revista Academia Colombiana Ciencias*, No. 120, Vol. 31. 379- 394 p.

Salcedo, E., Romero, M. D., Vallejo-Chocué, M. A., y Cortés, M. A., 2005. Estudio de sismicidad histórica. Proyecto de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Cali. INGEOMINAS-UNIVALLE. Inédito.

2.4. Geodinámica reciente del relieve: expresiones de la tectogénesis regional y la morfogénesis fluvial local en la planeación territorial y la gestión del riesgo[1]

José Ramón Hernández Santana
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Luis Miguel Espinosa Rodríguez
Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México

Ana Patricia Méndez Linares
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Alexis Ordaz Hernández
Juan Carlos Garatachía Ramírez
Norma Angélica Dávila Hernández
Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

La dimensión de las investigaciones sobre los procesos y fenómenos naturales que constituyen peligros para la población y sus infraestructuras habitacionales y socioeconómicas, demanda una visión de carácter multifactorial y complejo. Requiere la participación multidisciplinaria de enfoques académicos, métodos científicos y geotecnologías modernas, así

1 Los autores agradecen a la Academia de Ciencias de Cuba, actual Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, el financiamiento de los proyectos "*Investigaciones fundamentales actuales y perspectivas en el polígono geodinámico complejo de Santiago de Cuba*" y "*Correlaciones de la geodinámica reciente con la diferenciación morfoestructural de Cuba Oriental*". A su vez, reconocen la colaboración de Armando Venéreo Morales (†), Rodolfo Ortiz González (†), Francisco Pérez Cárdenas (†), Jorge Ávila Hernández, en los trabajos instrumentales de precisión realizados en la cuenca del Río Carpintero, y de José Luis Batista Silva y Francisco Cutié Rizo por la información hidroclimática regional.

como de estrategias de educación, divulgación y gestión oportuna, tanto por parte de las autoridades gubernamentales, a diferentes niveles de decisión, como por las instituciones de la sociedad civil involucradas en su prevención y mitigación, y la propia sociedad en general.

Estos estudios necesitan fundamentalmente estar enfocados al conocimiento de las regularidades de la estructura, funcionamiento y dinámica de los procesos y fenómenos naturales, en aras de revelar sus magnitudes e intensidades, frecuencias y tendencias, y sobre todo los niveles de impacto, vulnerabilidad y riesgos.

En este capítulo, se abordan dos procesos naturales caracterizados por su periodicidad, por su desarrollo lento permanente y por su detonación súbita con consecuencias instantáneas, uno de origen litosférico y el otro hidroatmosférico en condiciones deleznables o no consolidadas del substrato geológico y con marcada pendiente del perfil fluvial longitudinal y de las laderas de las cuencas hidrológicas de montaña: los movimientos tectónicos recientes de la corteza terrestre, la deformación del relieve y la liberación de energía sísmica. Mientras, el segundo corresponde a los flujos de lodo y rocas, en condiciones extremas de tormentas severas con consiguientes avenidas hidrológicas en regiones montañosas.

El primero, en su faceta lenta, seglar o secular, origina deformaciones del subsuelo con sus implicaciones y daños a la infraestructura de viviendas, viales, infraestructuras de todo tipo. A su vez, junto con los sismos, estos procesos de acción retardada forman parte de los procesos tectogéneticos de la corteza terrestre, estrechamente enlazados en su desarrollo y manifestaciones. En regiones sismoactivas, la acumulación sostenida de energía con una tendencia marcada contribuye a la deformación intensa de la corteza y del substrato geológico, provocando la ruptura estructural con la liberación de energía sísmica. Es por ello, que las investigaciones sobre las magnitudes de los movimientos tectónicos recientes verticales y horizontales y sus tendencias, son de vital significado, cuando se analizan las correlaciones espaciales y temporales con el régimen sísmico de un territorio.

Paralelamente a los descensos tectónicos actuales, regionales y/o locales, la subsidencia lenta y sutil originada por la sobre consolidación sedimentaria y la extracción desmesurada de los acuíferos, marcan su acción escultural con agrietamientos, fracturas y colapsos, destruyendo patrimonios familiares, sociales y gubernamentales y, en algunas ocasiones, arrebatando vidas en las ciudades y pueblos.

Por otra parte, los flujos de lodo y rocas (*mudflows* y *rock flows*) desafían permanentemente la existencia de las poblaciones ribereñas de regiones montañosas, con intenso régimen pluvial y enclavadas en el fondo de valles con laderas inclinadas formadas sobre rocas poco consolidadas y susceptibles al intemperismo físico y químico.

A continuación, se detallan cada uno de esos procesos, indicando algunos métodos e instrumental de precisión aplicables a regiones mexicanas, sometidas a deformaciones urbanas notables, a magnitudes sísmicas intensas y a avenidas hidrológicas inesperadas, que agravan los impactos en la población, debido a las deficiencias o inexistencias de sistemas eficientes de drenaje.

Métodos y técnicas

1. Endodinámica reciente de la corteza terrestre y del relieve: su significado en la planeación urbana y regional

Uno de los antecedentes más lejanos sobre la preocupación científica en torno a la geodinámica reciente de la corteza terrestre, aparece en los trabajos de John Milen, presentados en la *Royal Geographical Society*, el 10 de febrero de 1896 (Milen, 1896), ya en las postrimerías del siglo XIX, donde enfoca la atención a los escasos estudios sobre los movimientos de la "tierra firme" e indicando la necesidad del desarrollo de bases instrumentales sistemáticas para el conocimiento de estas deformaciones corticales diferenciadas, lentas y seglares de la superficie terrestre.

En ese entonces, el método instrumental más preciso para medir las irregularidades topográficas de la superficie terrestre eran las nivelaciones geodésicas, las que a partir de la VII Conferencia de la *International Association of Geodesy* celebrada en Hamburgo, Alemania, en septiembre de 1912, fueron consideradas como nivelaciones de alta precisión, debiendo cumplir los requisitos de ±1 mm para el error probable accidental y ±0,2 mm/km^2 para el error probable sistemático. Posteriormente, ya en el año 1919, se funda la *Internacional Unión of Geodesy and Geophysics,* donde la *International Association of Geodesy* es un miembro constitutivo.

La primera mitad del siglo XX, caracterizada por las dos guerras mundiales y sus devastadoras secuelas, no fue un escenario favorable para los estudios geodinámicos, ni para la actividad científica, en general. No obstante, durante la segunda mitad del siglo, comenzaron a desarrollarse, de manera diferenciada por países, las redes geodésicas de control horizontal y vertical de la superficie terrestre, que posteriormente fueron utilizadas para revelar los primeros datos sobre las magnitudes y las tendencias de la tectónica reciente y sus deformaciones en el relieve, a diferentes escalas espaciales.

Estas primeras fueron construidas para fines geodésicos, cartográficos, de catastro y de ingeniería civil (obras viales y de infraestructura, principalmente), por lo que sus emplazamientos, a los efectos de estudios geodinámicos de precisión, no siempre contaron con una valoración geólogo-geomorfológica de los sitios seleccionados. Esto determinó que la estabilidad de los signos geodésicos, tanto monumentos o bancos y chapas, no fuese totalmente

confiable en algunas localidades para medir desplazamientos verticales de origen endógeno del orden de décimas de milímetros.

Para resolver esta deficiencia metodológica, Mescheriakov (1963), Lilienberg y Setunskaya (1980) y Lilienberg *et al.*, (1993) desarrollaron un método de evaluación ingeniero-geomorfológica de los signos geodésicos en condiciones campo, tomando en consideración los aspectos siguientes: a) Estado del monumento geodésico: calidad técnica, existencia de deterioro mecánico, grado de corrosión, nivel de fijación en el terreno, resistencia de la cimentación y deformaciones; b) Estado de la obra de fijación: tipo de obra (monolito, substrato rocoso, edificio, puente, alcantarilla, banqueta, escalera, etc.), calidad de la obra (mampostería, albañilería, cimentación, losas de hormigón, otras), existencia de deformaciones exteriores (fisuras, grietas, su carácter y dimensiones; deformaciones del fundamento, reconstrucciones); c) Características ingeniero-geológicas del substrato: litología del substrato, potencia sedimentaria, susceptibilidad deformativa del suelo, procesos geomorfológicos exógenos, profundidad del manto freático; d) Particularidades de la ubicación: con relación a los morfoelementos del relieve, con respecto al plano morfoestructural y de acuerdo con las evidencias de movimientos neotectónicos intensos.

Esta metodología ha sido aplicada con éxito para muchas regiones cubanas, como las regiones occidentales (Díaz-Díaz, 1986) y oriental (Hernández-Santana, 1987a; Marques, 1997) y en México por Espinosa *et al.* (2016) en la región de Acambay, Estado de México.

Este análisis permite diferenciar los bancos y chapas geodésicas en estables, relativamente estables e inestables. Los signos confiables se corresponden con los estables, los inestables son desechados y los relativamente estables solo se consideran para afirmar posibles tendencias entre signos de buena estabilidad. Esta discriminación de bancos geodésicos, según su estabilidad, facilitó la identificación de aquellos signos geodésicos confiables para la verdadera estimación de las velocidades de los movimientos tectónicos recientes de la corteza terrestre.

Dada la importancia del estudio de la tectogénesis planetaria, en el año 1963, la Decimotercera Asamblea General de la *International Union of Geodesy and Geophysics,* aprobó el programa "Estudio de los movimientos recientes de la corteza terrestre", dirigido entre muchas intenciones, a obtener un mapa mundial sobre la geodinámica de la corteza terrestre y analizar sus correlaciones con las manifestaciones sísmicas, como parte de los primeros intentos de la prognosis del fenómeno telúrico, al menos en su componente espacial.

En ese sentido, la antigua Unión Soviética, junto con otros países exsocialistas de Europa oriental, acumularon cierta cantidad de datos sobre los movimientos tectónicos verticales recientes de la corteza terrestre, aprovechando los resultados de las nivelaciones geodésicas reiteradas de las redes nacionales de primer orden, durante las etapas de las posguerras mundiales. De esta manera, ya en el año 1958, se presenta el primer mapa

sobre los movimientos recientes de la porción occidental del territorio europeo de la antigua URSS, con su versión revisada, en 1963. En el año 1971, se presenta el primer mapa de los movimientos verticales recientes de la corteza de Europa oriental, a escala 1:10 000 000, para finalmente editar el mapa de los movimientos corticales recientes de Bulgaria, Hungría, República Democrática Alemana, Polonia, Rumania, URSS y Checoslovaquia, en el año 1986 (Enman y Nikonov, 1993).

En el último cuarto del siglo XX y en las primeras dos décadas del siglo XXI, estas investigaciones geodinámicas se extendieron profusamente por todo el orbe, pero principalmente en las regiones sismoactivas, de contacto entre las grandes geotexturas continentales, oceánicas y de transición marginal entre placas, como expresiones geomorfológicas planetarias del carácter y de la dinámica de los diferentes mecanismos geotectónicos.

La precisión y extensión de estos estudios de frontera, dentro del campo de las Geociencias, también marcharon aparejadas con el desarrollo geodésico instrumental; las nuevas tecnologías. La aparición de los sistemas de posicionamiento global y el análisis de la interferometría de imágenes de radar con vistas a detectar magnitudes y tendencias de desplazamientos de la superficie terrestre, tanto por deformaciones endógenas, como por alteraciones del relieve, debido a la acción de los procesos exógenos modeladores del mismo.

El establecimiento de redes regionales y locales de medición instrumental sistemática, longitudinales y transversales a las principales fallas activas, tanto en sitios de elevada movilidad cortical, como en aquellos que comprometen la estabilidad de zonas urbanas e infraestructuras socioeconómicas. Toto lo anterior reveló datos significativos sobre la geodinámica de la corteza terrestre, referidos en dirección, velocidades absolutas y relativas, y tendencias de los movimientos, ya fuesen verticales u horizontales, oscilatorios o de tendencia lineal sostenida.

En las regiones sismoactivas, los movimientos tectónicos oscilatorios liberan energía sísmica. Mientras, la acumulación de esta se intensifica bajo regímenes de tendencia sostenida, en el sentido de los desplazamientos tectónicos, lo que contribuye a notables deformaciones estructurales y a la ruptura de las mismas, con la consiguiente liberación de energía telúrica. Precisamente, el estudio correlativo entre estas manifestaciones geodinámicas lentas y seculares de la corteza, las dimensiones de las estructuras asociadas y la magnitud, profundidad y la periodicidad de los eventos sísmicos, constituye una de las premisas básicas para conocer las regularidades de la tectogénesis regional o local, con fines de planeaciones urbanas, industriales e infraestructurales, en general, como medidas preventivas ante el peligro sísmico, para el cálculo de diseño de infraestructuras civiles sismoresistentes y para la reducción de los niveles de riesgo de génesis tectónica, que además de deformar el subsuelo, también detonan el desarrollo de los procesos de remoción en masa y fracturan diques de embalses. Esto último como preámbulo de inesperadas catastróficas avenidas fluviales, que arrasan pueblos y ciudades ribereñas, entre otras inducciones destructivas.

Cuadro 1
Magnitudes de los movimientos tectónicos recientes en algunas regiones del mundo

Regiones	Amplitudes geodinámicas
Travale, Italia	Descensos de -20 mm/año a -25 mm/año (Geri *et al.*, 1984)
Rift del lago Assal, África oriental	Expansión de +60 mm/año (Kasser *et al.*, 1987)
Ex-República de Checoslovaquia, porción central	Descensos de -40 mm/año (1943-1976) (Zeman,1988)
Sierra Maestra, Gran Piedra, Meseta del Guaso y Sagua de Tánamo, Cuba oriental	Ascensos de +5 mm/año a +10 mm/año (Lilienberg *et al.* ,1988)
Depresiones del Cauto, Central y Guantánamo, Cuba oriental	Descensos entre -10 mm/año a -15 mm/año (Lilienberg *et al.* , 1988)
Rift de Kenia, África	Expansión alcanzó +2 mm/año (Rostom, 1991)
Islas Jónicas, Grecia	Ascensos de +10 a +11 mm/año (Papazachos *et al.* ,1992)
Sur del Peloponeso, Creta y Rodos; y Mar Egeo y alrededores, Grecia	Ascensos de +5 a +6 mm/año (Papazachos *et al.* ,1992)
Anatolia noroccidental y fallas del Egeo norte, Turquía-Grecia	Ascensos entre +19 y +22 mm/año (Papazachos *et al.* ,1992)
Montañas Kent y Karkaraly, Asia central	Ascensos de + 20 mm/año a + 23 mm/año (Finko, 1992)
Rusia europea	Descensos extremos de -4,3 mm/año y ascensos de +14,6 mm/año (Enman and Nikonov, 1993)
Falla San Andrés, E.E.U.U.	Desplazamientos sostenidos de +39 mm/año (Argus and Gordon, 2001)
Falla Boconó, Colombia	Movimientos horizontales de +12 mm/año (Molina, 2006)
Islandia	Desplazamientos horizontales de +20 mm/año y verticales en la región central de la isla de +25 mm/año (Völksen *et al.* , 2009)
Ática, Evia, Peloponeso oriental, islas del Egeo y Patras, Grecia	Ascensos de +30 mm/año a +35 mm/año (Rontogianni, 2010)
Oriente de la zona de la falla Anatolia norte, Turquía	Desplazamientos horizontales de +16 mm/año a +24 mm/año, con respecto a Eurasia (Ozener *et al.*, 2010)
Lineamiento morfoestructural Campobello di Mazara-Castelvetrano, Suroeste de Sicilia, Italia	Desplazamientos diferenciales del subsuelo de hasta +2 mm/año (Barreca *et al.* , 2014)
Extrusión salina activa de Qum, Irán	Descensos de -3 mm/año en noroeste y ascensos de +4 mm/año en el oriente (Nastaran *et al.*, 2014)
Isla Hainan (porción oriental), China	Descensos de -3 a -5 mm/año (Lingyun *et al.* , 2015)
Los Ángeles, E.E.U.U.	Desplazamientos horizontales de +1.0 a +2.1 cm/año y −2.6 a −4.8 cm/año en las direcciones norte y este, Desplazamientos de cuenca Santa Ana con desplazamiento vertical máximo de +43 mm (Hu *et al.*, 2016)
Suroeste Ibérico, Europa	Desplazamientos horizontales de +16.62 a +18.11 mm/año (Cabral *et al.* , 2017)
Cuenca Weihe, China Central	Desplazamientos horizontales de hasta +10 ±1 mm/año (Wei Qu *et al.* , 2018)

Fuente: Elaboración propia, con base en autores.

En la literatura especializada destacan estudios geodinámicos de esta naturaleza en los territorios continentales europeos y norteamericanos, algunas regiones africanas, asiáticas y sudamericanas. No escapan los países insulares, como Japón, Islandia, Cuba y otros archipiélagos mediterráneos (Cuadro 1).

Las primeras nivelaciones aplicaron, por lo general, una metodología suizo-americana (*Interamerican Geodhetic Service*, 1948), con las mediciones en una sola dirección, y el cálculo de sus errores permisibles, se obtuvo con la fórmula:

$$\text{Formula: } \pm 4.0 \text{ mm}\sqrt{K}$$

Como equipamientos se emplearon los niveles suizos N-3 y las miras americanas "invar", con dos escalas (principal y secundaria). Para los cálculos de los errores permisibles, se tomaron las fórmulas que fueron aceptadas en la VII Conferencia Internacional de Geodesia de Hamburgo, en 1912. La aplicación de dichas fórmulas arrojó los valores siguientes: error probable accidental (0.78 mm/km), error medio accidental (1.17 mm/km), error probable sistemático

(0.10 mm/km) y error medio sistemático (0.15 mm/km) (Lilienberg *et al.*, 1993; Marques y Rueda, 1993). En años más recientes, estas nivelaciones se emprenden con observaciones en dos sentidos (directo e inverso), lo que genera una mayor precisión de los resultados. Los cálculos de los errores medios cuadráticos permitieron la obtención de los desplazamientos totales de la corteza terrestre (en mm), de las velocidades promedio anuales de desplazamiento (en mm/año) y de los gradientes de velocidad relativa (en mm/año/km), en las zonas de ruptura de las curvas de los perfiles geodinámicos complejos (Figura 1).

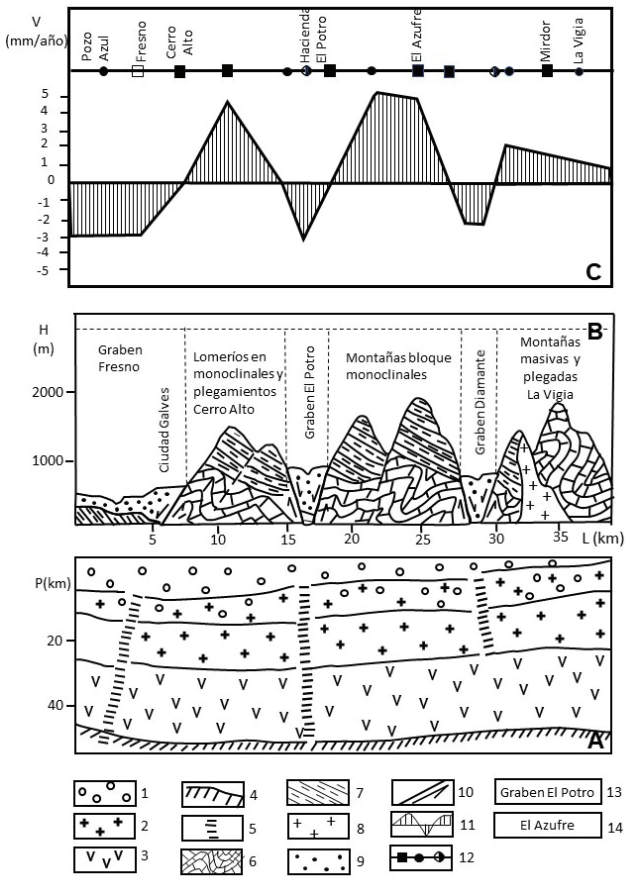
Para estudios geodinámicos, la frecuencia de los levantamientos está en función de la actividad tectónica de la región específica, aunque en regiones muy activas y móviles, las mediciones pueden efectuarse anualmente e incluso bajo monitoreo mensual permanente, como se desarrollaron en el polígono geodinámico de Santiago de Cuba, durante la década de 1980, con resultados novedosos, dado el carácter oscilatorio de los movimientos.

Para los análisis geodinámicos, bajo un enfoque integral, la elaboración de los perfiles complejos es de gran importancia, pues facilitan la correlación entre los datos geofísicos sobre la estructura profunda de la corteza terrestre, la información geológica superficial, los datos morfoestructurales del relieve y los valores de las velocidades de los movimientos tectónicos recientes.

El avance en los conocimientos de la tectónica global y regional, así como el desarrollo acelerado de la clasificación morfoestructural del relieve, durante la segunda mitad del siglo XX, bajo criterios geomorfológicos, correlativos estructuro-geológicos, neotectónicos, geofísicos y geodésicos, orientaron las investigaciones geodinámicas en polígonos geodinámicos complejos, en las siguientes direcciones fundamentales:

- Estudio de las regularidades generales y regionales de la endodinámica del relieve (movimientos tectónicos recientes) y sus correlaciones con la estructura geológica.
- Monitoreo de la actividad de los movimientos tectónicos recientes, la sismicidad y sus correlaciones espaciotemporales con las morfoestructuras.
- Análisis morfoestructural de los mecanismos geodinámicos de los territorios sismoactivos y pronóstico de los lugares de ocurrencia de terremotos fuertes, a partir de fuentes estadísticas y estudios de la estructura profunda de la corteza terrestre.
- Determinación de las regularidades de la interrelación entre los procesos endógenos y exógenos recientes, formadores del relieve, mediante observaciones y mediciones estacionarias, fundamentalmente de los fluviales de cauce, de la erosión fluvial lateral y lineal en laderas, así como las deformaciones o cambios de estas últimas.
- Evaluación de zonas de vulnerabilidad y de riesgo sísmico y geomorfológico, fundamentalmente a lo largo de las zonas de interacción entre placas y en los nudos morfoestructurales sismoactivos.

Figura 1. Correlaciones entre la estructura profunda de la corteza terrestre, la estructura geológica



Nota: el plano morfoestructural y las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes, a lo largo de un perfil morfoestructural geodinámico hipotético. A. Estructura profunda de la corteza terrestre: 1. Cobertura sedimentaria, 2. Capa granítica, 3. Capa basáltica, 4. Límite de Mohorovicic, 5. Zonas estructuro-tectónicas, según datos geofísicos; B. Condiciones estructuro-geológicas y morfoestructurales del relieve: 6. Calizas plegadas del Cretácico inferior, 7. Dolomías y calizas del Cretácico superior, 8. Granitos y granodioritas del Eoceno superior, 9. Depósitos terrígenos plio-cuaternarios, 10. Fallas notables, 11. Morfoestructuras; C. Velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes (mm/año), según nivelaciones geodésicas reiteradas de precisión: 12. Curva de las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes (1956-1990: 35 años), indicando en achurado vertical las zonas de ascensos y descensos y sus magnitudes, y signos geodésicos (bancos, chapas), según su estabilidad ingeniero-geomorfológica (estables, moderadamente estables e inestables), 13. Tipos morfoestructurales del relieve, 14. Topónimos relacionados con la ubicación de los signos geodésicos, para facilitar la localización y búsqueda en campo. Fuente: elaboración propia.

En Europa oriental y Asia central, se instalaron diversos polígonos geodinámicos, como el de Asjabad, creado a partir del año 1961. Esta región constituye una estructura plegada alpina de las montañas del Kopetdag central, con una notable sismicidad. De acuerdo con los datos de las nivelaciones geodésicas reiteradas, los descensos fueron de -6 a -9 mm/año, mientras los ascensos concentrados en las montañas fueron de +2 a +3 mm/año (Kurbanov *et al*., 1973).

En América Latina, también se han realizado esfuerzos para conocer las regularidades de los movimientos tectónicos verticales y horizontales recientes en diferentes escenarios geotectónicos (entre placas e intraplacas) y planos morfoestructurales, no obstante la gran demanda de recursos presupuestarios requeridos para el desarrollo de estas investigaciones geocientíficas complejas, de carácter multidisciplinario, ante las graves insuficiencias económicas gubernamentales de las naciones latinoamericanas. Las escasas experiencias geodinámicas en esta región siempre han estado auspiciadas y soportadas, en su gran mayoría, por fondos intergubernamentales y de organizaciones e instituciones internacionales.

En el caso cubano, los estudios geodinámicos comenzaron entre los años 1971 y 1973, a la luz de la colaboración científica entre el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (hoy GEOCUBA), el Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba (actualmente Instituto de Geografía Tropical del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente) y el Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de la ex Unión Soviética (actual Academia de Ciencias de Rusia), tomando como base la numerosa información y datos de las nivelaciones geodésicas reiteradas, acumulados por la red geodésica nacional, a partir de su creación en el año 1949. Para ello, se emplearon los dos primeros ciclos de nivelación geodésica realizados por el *Interamerican Geodhetic Service* (IGS)y por el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (ICGC), comprendidos entre 1954 a 1966 y 1972 a 1975, respectivamente, con un intervalo de tiempo de 15-20 años en promedio.

Las nivelaciones en el polígono fueron realizadas con el método de "coincidencia" por dos pares de pines que forman dos líneas separadas de nivelación: el de la derecha, que corresponde a la línea por el pin derecho y, el de la izquierda, que corresponde a la línea por el pin izquierdo. Además, esta nivelación se realiza en los sentidos directo e inverso, para garantizar mayor precisión (Marques y Rueda, 1993).

Según estos autores, el instrumento empleado fue un nivel N-3 (Wild), solamente para las mediciones en el polígono geodinámico. Las características técnicas son: a) error medio cuadrático en 1 km de nivelación doble, ±0,2 mm; b) aumento de anteojo, 42; c) abertura libre del objetivo, 50 mm; d) enfoque mínimo, 2.15 m; e) constante de multiplicación, 100; f) constante de adición, -20 cm; g) longitud, 297 mm; h) sensibilidad del nivel tubular, 10''/2 mm; i) precisión del centrado del nivel tubular, 0,25''; j) sensibilidad del nivel

esférico, 4'/2 mm; k) micrómetro de placa plano paralela con lectura óptica, 10 mm recorrido, 0,1 mm int., 0,01 mm aproximadamente.

Paulatinamente, y a partir de los años 70, el empleo de niveles fue sustituido por equipos electroópticos integrados, como la estación total, con la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador a un teodolito electrónico, que según Hernández-Valencia (2011): "surge para reemplazar el instrumento conocido como teodolito en la topografía, pero además integra en sí misma otros instrumentos de gran utilidad para medición de distancias y una computadora para los cálculos necesarios con memoria interna para el almacenamiento de datos. Esa versatilidad hizo factible su uso para levantamientos catastrales referenciados con GPS sobre todo en zonas de interés por su potencial desarrollo urbano", sobre todo en sitios con subsidencia o ascensos sostenidos, que deforman y destruyen la traza urbana, poniendo en peligro a la población por colapsos del subsuelo, agrietamientos y potenciales inundaciones.

A partir de la década de los años 90, las Tecnologías de la Información Geográfica, especialmente la Percepción Remota adquieren vital importancia en el estudio de las deformaciones del relieve de la superficie terrestre, surgiendo nuevos métodos de observación, medición e interpretación con el empleo de las técnicas de Interferometría Diferencial con imágenes de Radar de Apertura Sintética (DInSAR, por sus siglas en inglés).

De acuerdo con Crosseto *et al.* (2005), las técnicas DInSAR han tenido mayor aplicación para la medición y monitoreo de deformaciones del terreno en el ámbito de la Sismología, Vulcanología, Glaciología, procesos de remoción en masa y subsidencia del terreno, siendo la primera de estas considerada como la que ha obtenido mayores logros científicos. En este sentido, el antecedente más antiguo corresponde al trabajo de Gabriel *et al.* (1989), quienes emplearon datos del sensor SEASAT SAR para cartografiar pequeños cambios de elevación debido a procesos de expansión y contracción de arcillas en el Valle Imperial, en California.

También destacan los trabajos realizados en los sistemas de fallas Ovacik y Anatolian, en Turquía, cuyo objetivo fue medir las deformaciones del terreno durante y después de eventos sísmicos. Para ello, se emplearon imágenes de radar del sensor ERS-1, en combinación con mediciones GPS (Chorowicz *et al.*, 1995; Reilinger *et al.*, 2000; Wright *et al.*, 2001). Por su parte, Pedersen *et al.* (2001) y Jónsson *et al.* (2003), quienes midieron desplazamientos co y post sísmicos superiores a 15 cm, derivados del terremoto de M= 6.6, ocurrido en South Iceland, Islandia, en el año 2000, mediante el uso de datos de los sensores ERS-1 y ERS-2.

Otros estudios han empleado datos provenientes del sensor SAR, como ENVISAT ASAR, en combinación con mediciones de dispositivos GPS; sobresalen los trabajos realizados en la Falla Xianshuine, situada en el

margen este del Tíbet, para la cual se determinó una tasa de desplazamiento de 5 a 10 mm/año (Jiang *et al.*, 2010). Asimismo, el análisis morfotectónico y geodésico de la Falla Tabriz, en Irán, realizado por Rizza *et al.*, 2013, quienes aplicaron la técnica *Persistent Scatteres Interferometry* (PSI, por sus siglas en inglés), una variante de las técnicas DInSAR, para evidenciar una velocidad de desplazamiento que, en la parte central del alineamiento geológico, alcanza picos de 10 a 15 mm/año.

En años más recientes, la oferta de datos, así como la variedad de técnicas DInSAR, se ha incrementado. Esto se debe al creciente número de nuevos sensores, que han sido puestos en órbita por las distintas agencias espaciales alrededor del mundo, así como al desarrollo de nuevos algoritmos por parte de la comunidad científica, mismos que paulatinamente han sido implementados en los softwares de procesamiento.

En la actualidad, uno de los sensores con mayor auge es Sentinel-1, puesto en órbita por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), en abril de 2014. Los datos provenientes de este satélite son de acceso abierto y ya han sido aplicados en investigaciones sobre deformación del terreno, en el contexto de actividad sísmica, volcánica y subsidencia del terreno (ver Crosseto *et al.*, 2016 y Devanthéry *et al.*, 2016).

En México, el uso de técnicas DInSAR se puede agrupar en dos principales campos de aplicación: 1) el estudio de la topografía y la medición de deformaciones superficiales en volcanes activos y 2) el análisis de subsidencia del terreno en zonas urbanas. En el primer caso, los trabajos se han enfocado en volcanes como el Colima y el Popocatépetl, donde se han empleado imágenes de los sensores ENVISAT-ASAR, *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) y TerraSAR-X para la medición de cambios en la topografía, así como el mapeo de procesos y peligros asociados a los distintos episodios de actividad volcánica (Huggel *et al.*, 2008; Dávila, 2011; Pinel *et al.*, 2011).

En el estudio de subsidencia del terreno destacan los trabajos realizados en zonas como la ciudad de Celaya y Salamanca, así como los valles de México, Toluca y Mexicali, donde los hundimientos se asocian al abatimiento de los acuíferos, debido a su sobreexplotación. Para la medición de estos cambios, se emplearon datos provenientes de sensores, como ALOS-PALSAR, ENVISAT-ASAR, ERS-1 y RADARSAT con los cuales se aplicaron técnicas DInSAR convencionales y, además, algunas variantes como *Dual Pair Interferometry* (DPI, por sus siglas en inglés), PSI y *Small Baseline Subset Technique* (SBAS, por sus siglas en inglés) (López *et al.*, 2009; Osmanoglu *et al.*, 2010; Calderhead *et al.*, 2010; Calderhead *et al.*, 2011; Sarychikhina *et al.*, 2011; Chaussard *et al.*, 2013; Dávila *et al.*, 2014; López, 2015).

A nivel regional, se han realizado diversos estudios con el objetivo de mostrar las características geomorfológicas y sismotectónicas predominantes en el noroeste de México y lo correspondiente al Sur de California. Lo anterior

ha sido propiciado por el atractivo científico que representa el Sistema de Fallas de San Andrés (SFSA), el cual se sitúa en el límite activo de las placas tectónicas Norteamericana y Pacífico. Por mencionar algunos de estos estudios, destacan las investigaciones realizadas por Samsonov *et al.* (2007), quienes aplicaron técnicas DInSAR con imágenes de los sensores ERS1/2 para la obtención de valores de deformación en el sur de California; dichos resultados fueron contrastados y modificados en función de las velocidades de desplazamiento vertical, medidas con GPS, y la aplicación de técnicas de corrección estadística. Por su parte, Manzo *et al.* (2012), en un trabajo similar, aplicaron la técnica SBAS a partir de imágenes del mismo sensor y mediciones GPS durante el periodo 1992-2006; con ello demostraron que los desplazamientos en la región fluctúan entre -1.5 a +1.5 mm/año y están controlados por la deformación inter sísmica, debida al SFSA. En este contexto, también destaca el estudio de Sarychikhina *et al.* (2011), enfocado al proceso de subsidencia que afecta el Valle de Mexicali, asociado a la extracción de campos geotérmicos; para dicha zona, mediante técnicas DInSAR aplicadas en el período 2006-2007 y tasas de subsidencia obtenidas por nivelación durante 1994-1997, determinaron que la tasa de deformación fluctúa entre -18 a +18 cm; además se encontró relación de los valores más altos con el trazo de fallas geológicas.

En un estudio reciente realizado en la ciudad de Tijuana, Baja California (Garatachía, 2017), se aplicó la técnica PSI a partir de imágenes del satélite Sentinel 1; esto con la finalidad de medir los desplazamientos del terreno durante el periodo 2014-2016. En este sentido, la velocidad del desplazamiento durante dicho tiempo fluctuó entre -22.0 a +11.00 mm/año. Aunado a lo anterior, con el apoyo de métodos geomorfológicos como el análisis morfométrico y morfotectónico, se estableció la correlación entre los desplazamientos recientes del terreno y la dinámica de las morfoestructuras de la región.

Indiscutiblemente, los trabajos multidisciplinarios sobre la tectónica reciente con el empleo de instrumentos de precisión, no solo contribuyen al conocimiento de las regularidades generales, regionales y locales del régimen geodinámico de un territorio, sino que aportan información valiosa a la planeación urbana y regional sobre sus correlaciones con las deformaciones del terreno y con la sismicidad, revelando las estructuras más activas y apoyando a los diseños de obras sismorresistentes, que contribuyan a mitigar el peligro sísmico y tectónico en ciudades nuevas e incluso en la remodelación de las más antiguas.

2. Intensidad de los procesos fluviales de cauce: prevención de desastres por flujos de lodo y rocas en llanuras bajas de inundación intramontanas

El estudio de las regularidades del desarrollo de la exógenesis del relieve en diferentes zonas morfoclimáticas y unidades morfotectónicas constituye una de las principales direcciones de investigación para la

ciencia geomorfológica contemporánea, estrechamente vinculada a la óptica científica moderna, relativa a la necesidad de enfoques sistémicos, dirigidos no solo a la precisión de la estructura interna de los geosistemas y del funcionamiento de sus procesos, sino a su evolución y dinámica reciente, así como a la gestión de riesgos ante potenciales peligros.

Hasta el presente, los estudios multidisciplinarios en el campo de las geociencias han demostrado que el desarrollo geólogo-geomorfológico de la superficie terrestre se encuentra estrechamente vinculado a la interacción de los procesos de la tectogénesis y de la morfogénesis en diferentes contextos espaciotemporales. Estos conceptos corroboran el principio genético básico de la formación del relieve, que considera a éste como resultado de la acción entre los procesos endógenos y exógenos.

En la literatura científica internacional son numerosas las referencias sobre el vector endógeno del desarrollo geomorfológico, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo, no sucediendo de igual forma con la faceta exodinámica de su modelación. En este sentido, los escasos resultados obtenidos mediante el empleo de métodos geodésicos de precisión responden a zonas templadas y frías, y en ocasiones, a algunas regiones tropicales.

En los últimos años, la geomorfología fluvial ha abordado diversas líneas científicas de desarrollo, como la modelación de la evolución de los cauces en función de los procesos imperantes y las formas generadas, para explicar tendencias espaciales y temporales (Biedenharn *et al.*, 2000), además, tomando en consideración la textura del lecho fluvial(Doyle and Shields, 2000); el monitoreo de los flujos de escombros en las cuencas montañosas, con vistas a la reducción de riesgos en asentamientos de montaña, como en la cuenca de Arroyo Moscardo, en los Alpes italianos orientales, desde 1989 hasta 1998 (Marchi *et al.*, 2002); el monitoreo continuo de los flujos de carga en diferentes tipos de lecho fluvial, como en el Río Tordera, en el Mediterráneo nororiental español (García *et al.*, 2000), con valores promedio de 0.83 kg $m^{-1}s^{-1}$ durante un intervalo de 15 minutos, mediante trampas de sedimentos del tipo Birkbeck; y los cambios de los cauces en diferentes regiones morfoclimáticas, como en las regiones semiáridas y áridas australianas (Tooth, 2000), donde los cambios responden a interacciones complejas entre la descarga, el transporte de sedimentos, la pendiente, los patrones del drenaje tributario y los tipo de sedimentos y de vegetación; y sobre el análisis cuantitativo del relieve en cuencas exorreicas y sus implicaciones hidro-geomorfológicas (Méndez, 2016), tomando el escenario de los aludes torrenciales más importantes registrados en la historia venezolana, en el año 1999, como consecuencia de lluvias extraordinarias.

En cuencas hidrográficas sometidas a notables procesos fluviales de arrastre de lodo y rocas (*mudflow* y *rock flow*), el monitoreo de los procesos erosivos y sobre todo acumulativos de los ríos es indispensable para

diferentes probabilidades de caudales hidrológicos intensos, detonantes del desplazamiento de grandes volúmenes de sedimentos aluviales, capaces de atentar contra ciudades y pueblos ribereños.

Los resultados que se presentan a continuación son una muestra local cubana, pero aporta bases metodológicas para su aplicación en otros contextos territoriales con mayores gradientes energéticos del escurrimiento fluvial concentrado, más aun sobre subsuelos acumulativos arcillo-arenosos, conglomerados con matriz deleznable y otras litologías muy susceptibles al intemperismo profundo y a la erosión y transporte, bajo regímenes de peligro fluvial para las poblaciones situadas en las llanuras de inundación bajas y altas de redes fluviales caudalosas.

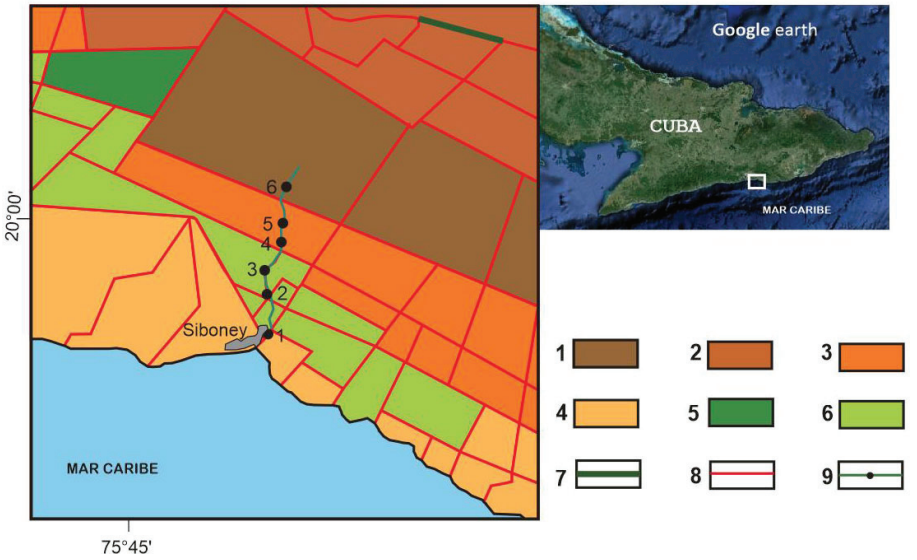
En Cuba, una de las pocas experiencias sobre la dinámica fluvial reciente de cauce fue obtenidas en la cuenca del Río Carpintero, territorio del polígono geodinámico complejo de Santiago de Cuba, primeramente, durante dos años de observaciones instrumentales estacionarias (Hernández-Santana *et al.*, 1987b, 1989), las cuales se extendieron sistemáticamente a series más largas, de cinco años (1984-1989), cuyos resultados son presentados por primera vez en este capítulo. Los valores erosivos y acumulativos obtenidos durante este monitoreo de cinco años revelaron los cambios morfológicos en el valle fluvial bajo de este torrente montañoso, de fuerte gradiente y corta longitud, típico de las cuencas hidrográficas localizadas en el flanco meridional de la Sierra Maestra y del Macizo de la Gran Piedra, en Cuba oriental (Figura 2), precisamente en la zona sismo activa de interacción entre las placas Norteamericana y Caribe.

Estas investigaciones están enfocadas al conocimiento cuantitativo y de las tendencias de la dinámica erosiva o acumulativa de los procesos fluviales de cauce en diferentes contextos morfoestructurales en la cuenca del Río Carpintero, mediante mediciones geodésicas reiteradas, en estaciones de monitoreo bajo diferentes condiciones energéticas del relieve: llanuras, lomeríos, premontañas y montañas.

Contexto espacial: evolución y consolidación morfoestructural del relieve

El sistema montañoso de la Sierra Maestra posee una singular posición morfoestructural y geodinámica en la región del Caribe septentrional, a lo largo de la zona de interacción entre las placas continental Norteamericana y la oceánica Caribe, y bajo la acción independiente y conjunta de diversos mecanismos geotectónicos durante su historia geológica, y fundamentalmente en el transcurso de la etapa geomorfológica de formación de su relieve, coincidente con la etapa neotectónica (neógeno-cuaternaria) de su evolución.

Figura 2. Morfoestructuras de la cuenca del Río Carpintero y zonas aledañas, y localización de las estaciones de mediciones instrumentales



Nota: 1. Montañas bajas, basculadas, sobre basamento intrusivo y plegado (800 < H, altitud < 1 200 m); 2. Montañas pequeñas, de bloque, escalonadas, en cadenas, sobre basamento intrusivo y plegado (500 < H< 800 m); 3. Premontañas, de bloque, escalonadas, en cadenas, sobre basamento intrusivo y plegado (200 < H< 500 m); 4. Meseta estratificada subhorizontal, fracturada en bloques, blindada (100 < H,< 240 m); 5. Llanuras medianas, de bloque, en plegamientos y monoclinales (60 < H< 120 m); 6. Depresión litólogo-estructural; 7. Depresión de graben escalonados; 8. Fallas; 9. Estaciones de mediciones geodésicas en el Río Carpintero. Fuente: elaboración propia.

Las montañas de la Sierra Maestra se formaron como resultado del proceso de abertura de la fosa profunda de Bartlett-Caimanes y del subcorrimiento de su borde septentrional por debajo del margen meridional de la denominada Microplaca Cubana (borde de transición marginal de la placa Norteamericana), lo que produjo la compresión transversal en la zona de convergencia, con el sobrecorrimiento en varios planos y el ascenso brusco del sistema asimétrico de bloques en monoclinales y plegamientos (Hernández-Santana, 1987). Como resultado del desplazamiento lateral siniestro entre las placas Norteamericana y Caribe, se produjeron rotaciones y desplazamientos de los mesobloques y bloques que componen esta gran macro unidad morfotectónica, tanto en la dirección horizontal como en la vertical. Otras investigaciones sobre el modelo geodinámico de este segmento cubano del límite noroeste de la placa Caribe (Sánchez y Vorobiova, 1992), demuestran que el sistema disyuntivo

regional experimenta una inflexión hacia la derecha (*dextral offset*), generando esfuerzos compresivos con marcada actividad sísmica, precisamente entre Santiago de Cuba y Guantánamo, al Sur del territorio estudiado.

El macizo montañoso de la Gran Piedra constituye el mesobloque oriental de la Sierra Maestra, caracterizado por un complejo plano morfoestructural de estilo germánico en bloques, elaborado sobre un basamento intrusivo (granodiorítico) y plegado (complejo vulcanógeno-sedimentario del arco volcánico del Paleógeno), con basculamientos de la neomorfoestructura y desarrollo de monoclinales en su periferia.

Como resultado de la diferenciación de los movimientos neotectónicos, en su plano morfoestructural se expresa un claro escalonamiento de pisos geomorfológicos: montañas bajas y pequeñas, premontañas y lomeríos. Este sistema escalonado posee un carácter longitudinal-sublatitudinal, ascendente de Sur a Norte, reelaborado bajo la influencia de un intenso fracturamiento diagonal, de dirección noreste, coincidente con el estilo disyuntivo neotectónico temprano, derivado del desplazamiento lateral izquierdo de la zona de sutura entre placas (Hernández-Santana *et al*., 1991). La conjugación de ambos estilos geotectónicos determinó la deformación transverso-diagonal del relieve en una serie de bloques morfotectónicos de jerarquía inferior, sobre los cuales se desarrolla la cuenca hidrográfica del Río Carpintero, base experimental de estas investigaciones geodinámicas.

Como se puede apreciar, en su contexto espacial geomorfológico, el territorio seleccionado para el análisis dinámico fluvial posee una notable diferenciación morfoestructural de su relieve, lo cual permite conocer el comportamiento de los procesos erosivo-acumulativos de cauce en distintas condiciones geomorfológicas (Figura 2).

Contexto temporal: estacionalidad climático-hidrológica

Clima

La macropendiente meridional de Cuba oriental, en la cual se localiza la cuenca del Río Carpintero, presenta particularidades climático-hidrológicas, que la distinguen del resto de las zonas montañosas y litorales del país, convirtiéndose en un área con características físico-geográficas diferenciadas.

De acuerdo con el análisis dinámico realizado por Alisov (1989), este territorio se encuentra en la zona climática tropical de tipo Caribe oriental, caracterizado por vientos alisios relativamente lluviosos, con gran diferenciación en el humedecimiento entre las vertientes de barlovento (macropendiente septentrional en el caso del Macizo de la Gran Piedra) y de sotavento (macropendiente meridional, donde se localiza la cuenca hidrográfica del Río Carpintero); así como la existencia de pequeñas franjas semidesérticas de tipo seco estepario en las costas meridionales de las Antillas

Mayores, como la llanura costera del sur de Puerto Rico (915 mm promedio anual), la región de Enriquillo (605 mm), al sur de República Dominicana, la zona costera suroriental de Cuba, desde Cabo Cruz hasta Punta Maisí (menosde 600 mm) y la región meridional de Jamaica, entre Kingston y Alligator Pond (alrededor de 900 mm, como promedio).

Para el territorio del tercio medio e inferior de la cuenca del Río Carpintero, las características climáticas se corresponden con el tipo de llanuras y montañas con humedecimiento estacional, relativamente estable, alta evaporación y altas temperaturas, subtipo 6 de la regionalización climática general de Cuba (Díaz, 1985, 1989), con 1000 a 1200 mm de precipitación anual, de la cual 76-80% se produce en el período lluvioso (mayo-octubre); con un promedio de 60-80 días con lluvia al año y una evaporación media anual de 1800 a 2200 mm y una temperatura media anual de 25º-27º C (23º- 25º C en enero; 27º-29º C en julio).

Para el tercio superior de la cuenca, ubicado en el bloque montañoso central de la Gran Piedra, las características climáticas se corresponden con el tipo montañoso, con humedecimiento alto y estable, baja evaporación y temperaturas frescas, subtipo 3 planteado por Díaz (1989), con 1600 a 1900 mm de precipitación anual, de la cual 75- 82% se produce en el período lluvioso; con un promedio de 90-120 días con lluvia al año; con una evaporación media anual de 1 400-1 800 mm; y con una temperatura media anual de 20º-24º C (18º-22º C, en enero, y 25º-27º C, en julio). Como se puede apreciar, la cuenca presenta un carácter azonal del clima, motivado por el escalonamiento hipsométrico del relieve.

Esta situación geográfica del archipiélago cubano, en el borde septentrional de la zona tropical, y su configuración sublatitudinal, alargada y estrecha, determinan este carácter estacional en el régimen de humedecimiento anual, con dos períodos bien definidos. Por ello, las observaciones instrumentales fueron realizadas dos veces al año, siempre al final de cada período estacional pluvial, ya que en la zona tropical las lluvias constituyen el principal agente modelador del relieve. Bajo estas consideraciones, las mediciones geodésicas de la dinámica fluvial de cauce se realizaron durante 10 ciclos semestrales en el período comprendido entre noviembre de 1984 y mayo de 1989.

Para analizar las precipitaciones ocurridas durante la etapa instrumental de campo, se dispuso de los datos registrados en el pluviómetro Siboney, situado en el tercio inferior de la cuenca, así como, el de la Gran Piedra en su sector superior (Cuadro 2).

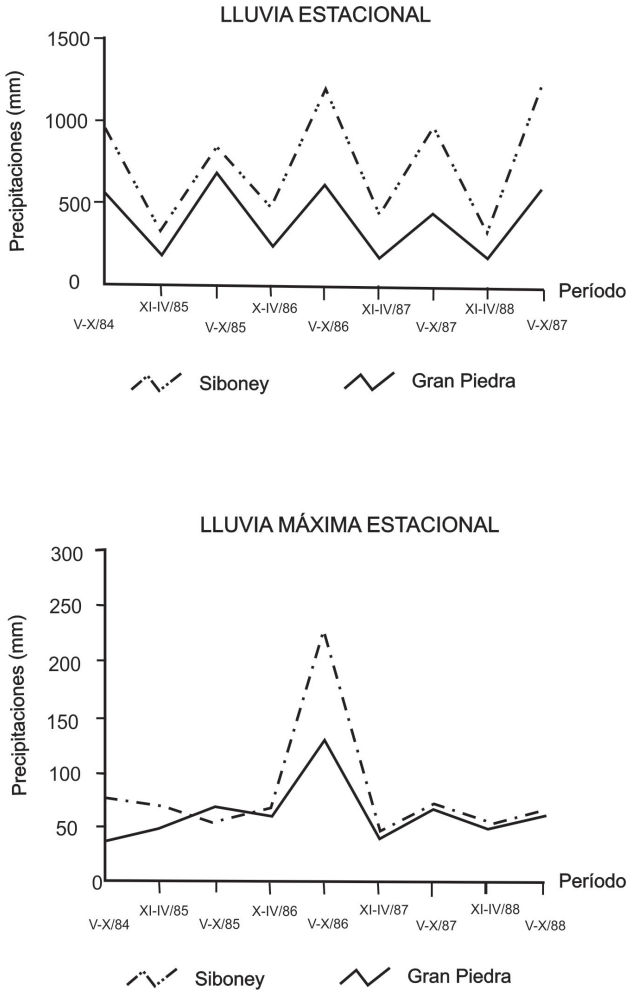
El procesamiento de los datos obtenidos en ambos pluviómetros, se realizó a partir de totales mensuales y láminas máximas en 24 horas, calculándose los totales estacionales y seleccionando la mayor de las láminas diarias para los períodos menos lluvioso y lluvioso (Figura 3). Al observar las normas anuales de lluvia de ambos pluviómetros y su posición altimétrica, se reafirma la tendencia general del incremento de la lluvia con la altitud.

Cuadro 2
Precipitaciones medias por períodos en la cuenca del río Carpintero

Nombre del Pluviómetro	No.	Coordenadas Geográficas		Coordenadas Lambert		Altitud (m)	Período de observación (años)	Precipitaciones medias (mm)	
		Latitud Norte	Longitud Oeste	Norte	Este			Período lluvioso	Período menos lluvioso
Siboney	1053	19° 57' 37"	75° 42'18"	145,7	619,2	10	1964-1989	588	233
Gran Piedra	535	20° 00' 39"	75° 37' 40"	151,5	525,5	1 120	1964-1989	1 076	453

Fuente: elaboración Cutié Rizo, Francisco.

Figura 3. Variaciones estacionales de las precipitaciones en la cuenca hidrográfica del Río Carpintero durante los cinco años de mediciones instrumentales



Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista genético, en general, las lluvias están asociadas a las hondonadas y ondas del Este, las cuales tienen mayor frecuencia durante la estación lluviosa. Otra situación sinóptica que favorece la ocurrencia de actividad pluvial son los frentes fríos, restringidos a la época invernal (menos lluviosa), aunque su aporte no es significativo, debido al debilitamiento a su paso por los territorios occidental y central cubano, lo cual provoca, en ocasiones, su estado de disipación.

Los ciclones y huracanes constituyen fenómenos meteorológicos de carácter catastrófico en regiones tropicales, capaces de modificar la acción normal de los procesos erosivos y acumulativos fluviales durante su recorrido. En el caso del presente estudio, no existieron alteraciones pluviométricas anómalas de esta naturaleza, pues durante el período seleccionado no ocurrieron amenazas de este tipo.

Los valores máximos diarios observados durante los ciclos instrumentales fueron de 224 mm (Gran Piedra) y 136 mm (Siboney) en el período lluvioso. La media anual de precipitaciones para la cuenca es de 1161 mm, muy similar al valor isoyético propuesto por Díaz *et al.* (1989), con 1150 mm para la cuenca del Río Carpintero en el período hiperanual 1931 a 1972, lo cual demuestra la adecuada representatividad pluvial del período climático.

Características hidrológicas

Desde el punto de vista hidrológico, la cuenca está situada en la subregión "Vertiente sur de la Sierra Maestra", según la regionalización hidrológica de Cuba (Batista, 1974). Esta subregión se extiende desde Cabo Cruz hasta la cuenca del Río Baconao, la cual limita al norte con la del Río Carpintero, por toda la macropendiente meridional de la Sierra Maestra.

Dentro de las características más importantes, se manifiestan las extraordinarias pendientes de los ríos desde su nacimiento, lo cual determina un recorrido de pocos kilómetros hasta sus desembocaduras. Durante las avenidas estos forman corrientes de piedra y fango (mudflows), únicas en el territorio cubano, y en general, los ríos son pequeños y durante su recorrido forman saltos, cascadas y rápidos, labrando profundos y estrechos valles transversales en el sistema orográfico.

La cuenca del Río Carpintero se caracteriza por una densidad de la red fluvial de 1,9 km/km^2 (Batista, 1989) y presenta los siguientes parámetros morfométricos: coordenadas geográficas de la desembocadura del río: 19° 57′ 39′′ de latitud norte y 75° 42′ 18′′ de longitud oeste (coordenadas Lambert: 145,6 norte y 618,3 este); con un área de 17,3 km^2, altura máxima de 1000 m y media de 224 m, pendiente media de la cuenca de 284 ^{0}/00; su longitud es de 8,9 km, con una pendiente media de 49,4 ^{0}/00 y una lámina de escurrimiento medio anual de 251 mm.

Dadas las condiciones de río montañoso (altas pendientes de la cuenca y del cauce fluvial) no ha sido posible la instalación de una estación hidrométrica para conocer sus caudales. En este sentido, como la información hidrológica sistemática disponible es muy escasa, se determinó el gasto promedio hiperanual (Q), por el método de cálculo indirecto (Batista, 1974) tomando en consideración los parámetros hidrológicos anteriores, los valores de las precipitaciones medias de la cuenca, su altura media y la lámina de escurrimiento medio hiperanual, arrojando un valor de 0,14 m^3/seg. Realmente este valor es bajo, lo cual se refleja moderadamente en la dinámica de los procesos fluviales de cauce, aunque en el desarrollo de estos, desempeña un papel fundamental el estado de equilibrio del perfil longitudinal del río, en cada uno de los sectores estacionarios de observaciones instrumentales representativos de las características morfoestructurales del relieve. Por supuesto, el gasto máximo durante tormentas alcanza valores mucho mayores, que son, en definitiva, los que determinan las mayores intensidades de los procesos fluviales de cauce y, en casos extremos, grandes flujos de lodo y rocas.

1. Nivelaciones geodésicas reiteradas: base instrumental geomorfológica

La consulta de antecedentes sobre la dinámica de los procesos fluviales recientes de cauce permitió perfeccionar y adaptar, a las condiciones geográficas cubanas, la metodología empleada por Gorelov *et al.* (1973) en las montañas del Kopetdag central, en el territorio asiático, consistente en la renivelación geodésica de precisión de los cauces fluviales, con el objetivo de cuantificar instrumentalmente los espesores, y las velocidades erosivas y acumulativas fluviales.

En los seis sectores estacionarios en el Río Carpintero fueron confeccionados detalladamente los perfiles geólogo geomorfológicos del cauce y de los planos de inundación del Río Carpintero, reflejándose la composición litológica de los morfoelementos del plano inferior del valle.

Como parte fundamental de referencia geodésica y geodinámica, la base geomorfológica instrumental constó de dos monumentos geodésicos (bancos) de apoyo, de especial construcción, caracterizados por una estructura metálica, con un tubo acerado que atraviesa su porción central, quedando enclavado en el basamento rocoso, de forma tal, que no menos de 0,2 m se encuentre sobre la superficie del terreno. Ambas construcciones, situadas en ambas márgenes fluviales, constituyeron el punto inicial (cero geodésico) y final de las nivelaciones de precisión.

En los casos en que el zócalo de la primera terraza o el plano de inundación presentaron sedimentos no consolidados, la longitud del tubo acerado se hizo corresponder con la necesaria para que su extremo inferior siempre estuviera clavado en el substrato consolidado resistente. Al mismo tiempo, con el objetivo de mantener la verticalidad absoluta del referido tubo axial, la superficie del terreno en cada sitio fue reforzada con la construcción de un monolito de hormigón.

Durante las observaciones instrumentales realizadas, se situaron tensores de longímetro sobre los monumentos, desde los cuales se estableció un nivel de base horizontal, indispensable para las mediciones geodésicas, con la ayuda de un cable metálico de acero con máxima tensión (longímetro) y con un diámetro de 0,5 cm. La posición horizontal del mismo fue verificada con el nivel geodésico, con una precisión de 0,1 cm.

La máxima tensión del longímetro se obtuvo mediante la ubicación de contrapesos de 10 kg en sus puntos extremos, en cada una de las márgenes del río, con lo cual se redujo sustancialmente la curva catenaria producida por el cable tendido y, a su vez, se garantizó la precisión de las observaciones.

A lo largo del longímetro, se realizaron marcas métricas cada 0,5 m, con una precisión de 0,1 cm, desde las cuales y con la ayuda de un nivel geodésico y una mira invar, se midieron las profundidades del cauce cada 0,5 m y con una precisión de 0,1 cm. Durante las mediciones se utilizó un nivel N-2 de la firma *WILD*, el cual fue instalado en un punto fijo también monumentado, para garantizar aún más, la precisión de las nivelaciones repetidas.

En las mediciones geodésicas aplicadas, se utilizó el nivel *WILD* N-2 de semiprecisión No. 29262, el cual presenta los parámetros técnicos siguientes: error medio para 1 km de nivelación doble: +2 mm; anteojo de imagen real directa; aumento: 30 X; diámetro del objetivo: 40 mm; campo visual a 100 m: 2,8 m; distancia mínima de enfoque: 1,8 m; constante de multiplicación: 100; constante de adición: 0; longitud del anteojo: 196 mm; sensibilidad del nivel esférico: 8,5; sensibilidad del nivel tabular: 30”/2 m; precisión de centrado: +0,8”.

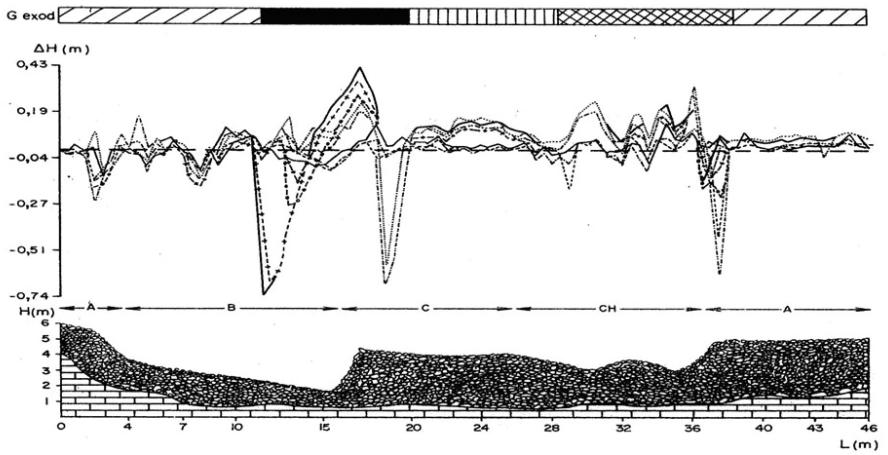
2. Variaciones espaciotemporales de la dinámica de los procesos fluviales de cauce

Las investigaciones instrumentales sobre la dinámica fluvial reciente contemplaron 10 ciclos de nivelaciones geodésicas, a partir de noviembre de 1984 y hasta mayo de 1989, en los sectores estacionarios transversales (Figura 2), programados dos veces al año, con el objetivo de conocer la intensidad y la tendencia general de los procesos de cauce en su contexto temporal climático-hidrológico, es decir, a inicios de mayo (para conocer las manifestaciones acumulativas o erosivas durante el período menos lluvioso) y a principios de noviembre (para reflejar los efectos del período lluvioso).

Una de las tareas iniciales del estudio fue la elaboración del perfil dinámico complejo, indicando detalladamente el corte geólogo-geomorfológico transversal del cauce, reflejando su caracterización morfológica y litofacial, y la granulometría del aluvión, así como del zócalo local; destacando los morfoelementos del cauce y del plano de inundación cada 0,5 m; trazando los gráficos de las magnitudes erosivas y acumulativas, calculadas por la diferencia entre uno y otro ciclo de nivelación repetida; y graficando el gradiente exodinámico (G exod) en función de la intensidad del proceso por unidad lineal de cauce (Figura 4), el cual nos señala los morfoelementos del cauce más dinámicos e inestables y los más pasivos o con menor sensibilidad ante la actividad de los procesos fluviales.

En los perfiles elaborados para cada sector estacionario (Figuras 4, 5, 6, 7, 8 y 9), se establecen las condiciones entre los morfoelementos del valle inferior y la dinámica de los procesos fluviales de cauce cada 0,5 m. Las nivelaciones geodésicas repetidas permitieron calcular la diferencia altimétrica entre ellas y confeccionar las curvas de magnitudes y el carácter erosivo o acumulativo del proceso.

Figura 4. Perfil complejo de la dinámica fluvial reciente en la estación No. 1, en la llanura.



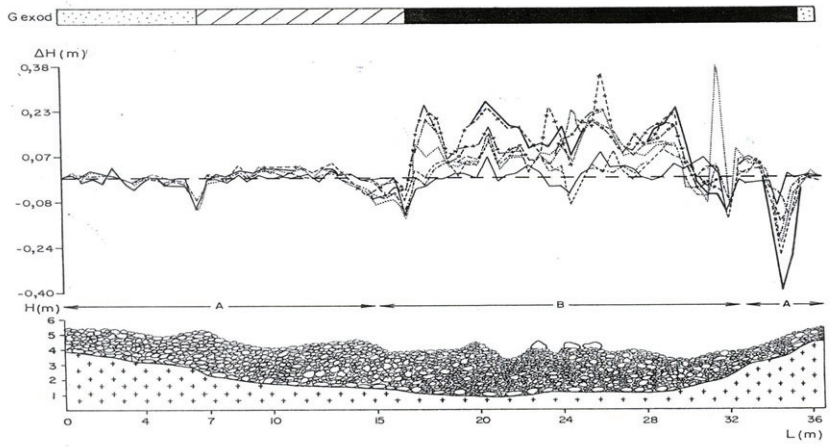
Nota: la leyenda es común para las Figuras 4 a la 9. Fuente: elaboración propia.

Paralelamente a las mediciones geodésicas repetidas, se realizaron observaciones visuales e instrumentales de los distintos elementos morfológicos del plano de inundación y del cauce, con la finalidad de discriminar posibles deformaciones, motivadas por el desarrollo normal de los procesos fluviales de cauce, de aquellas originadas por otros fenómenos hidrometeorológicos extremos.

En la estación No.1, situada en la llanura, se aprecia una clara diferenciación morfológica del valle fluvial bajo, en plano de inundación, sector acumulativo del cauce principal, cauce principal, sector intercauces principal y secundario, cauce secundario y plano de inundación (Figura 4). En los cinco años de observaciones y mediciones, se observa una marcada tendencia a la acumulación en el sector intercauces principal y secundario del orden total de +0.20 a +0.43 m, y en el plano de inundación de +0,02 a +0,09 m. En el cauce principal predominan los procesos erosivos con valores totales de -0,10 a -0,74 m, para una velocidad erosiva promedio de -0,02 a -0,15 m/año, mientras en el cauce secundario los procesos erosivos alcanzaron -0.61 m, para una velocidad promedio de -0.12 m/año. Es válido señalar, que los análisis interestacionales, en ocasiones, reflejan cambios más o menos bruscos en las velocidades, que los promedios referidos anteriormente.

En las estaciones No. 2 y 3, correspondientes a los lomeríos (Figuras 5 y 6), se aprecia una morfología menos compleja, compuesta por un cauce principal y un plano de inundación. El morfoelemento más inestable y geodinámico está representado por el cauce principal, con tendencias acumulativas totales para los cinco años del orden de +0,12 a +0,25 m y, en algunos puntos, hasta +0,50 y +1,00 m, lo cual arroja velocidades acumulativas de +0,02 a +0,05 m/ año, y mayores puntualmente de +0,10 a +0,20 m/ año.

Figura 5. Perfil dinámico en la estación No. 2, en el sector de los lomeríos pequeños

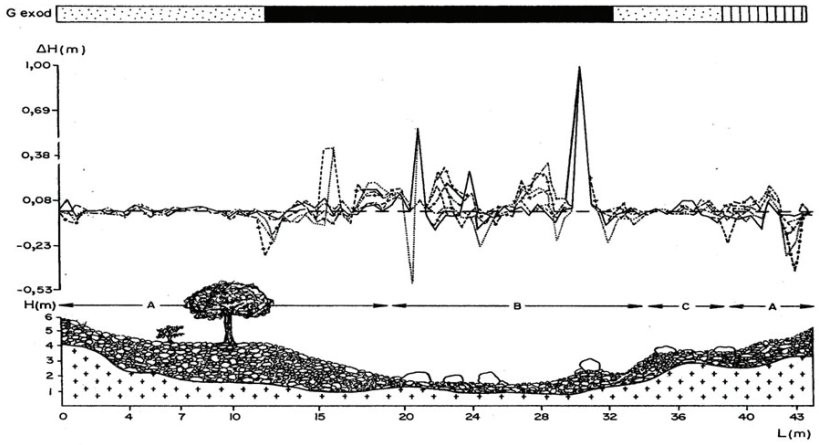


Fuente: elaboración propia.

En los planos de inundación durante estos años, se ha producido una erosión selectiva, de tipo lineal, con valores entre -0,10 a -0,35 m, con máximas de hasta -0,40 m, arrojando velocidades erosivas del orden de -0,02 a -0,07 m/año. En estos sectores predomina la acumulación, debido al flujo fluvial subsuperficial, por debajo de la cobertura aluvial del cauce y aprovechando el intenso fracturamiento existente en el substrato geológico del mismo.

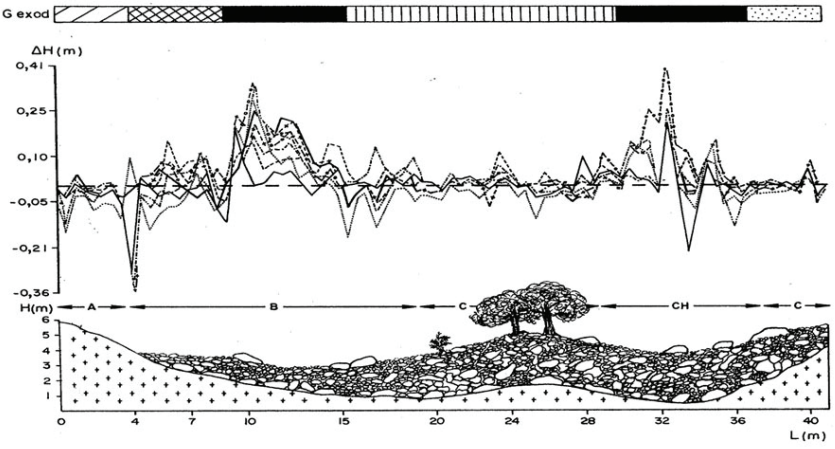
Las mediciones realizadas en las estaciones premontañosas No. 7 y 8 arrojaron variaciones débiles en los planos de inundación alto y bajo, del orden de -0,08 a +0,10 m y, en casos puntuales, hasta +0,25 a +0,30 m, con velocidades erosivas y acumulativas, según el período climático imperante (Figuras 6 y 7). En general, durante los cinco años analizados, la tendencia del proceso fluvial en los cauces tiende a la acumulación con valores de +0,05 a +0,25 y +0,30 m, presentando valores máximos de hasta +0,40 y +1,23 m. Por supuesto, que este cuadro puede estar motivado por múltiples factores, como una tendencia ligera al descenso de las precipitaciones y de la lámina de escurrimiento en el tiempo (Figura 8).

Figura 6. Perfil dinámico en la estación No. 3, de elevaciones en tránsito a las premontañas



Fuente: elaboración propia.

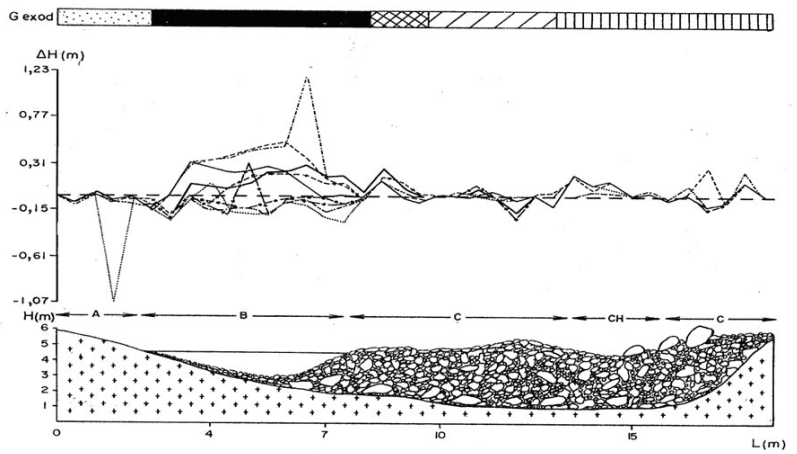
Figura 7. Perfil dinámico en la estación No. 4, indicando el carácter de la actividad de los procesos fluviales de cauce recientes en las premontañas



Fuente: elaboración propia.

No obstante, en áreas puntuales la tendencia dinámica en los cauces fue erosiva con valores de -0,05 a -0,035 m, con máximas de hasta -0,17 m, debido seguramente en estos casos, al desplazamiento de grandes guijarros o bloques durante las observaciones entre los ciclos geodésicos. Estos valores arrojan promedios de -0.01 a -0,07 m/año y, en casos extremos, hasta -0.034 m/año.

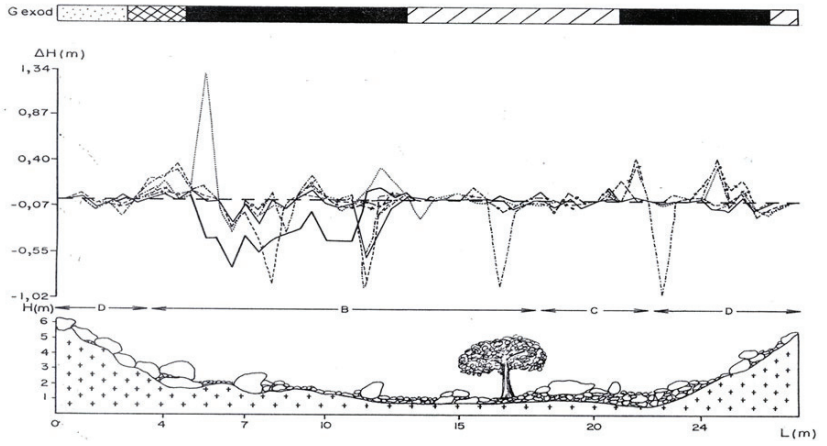
Figura 8. Perfil dinámico de la estación No. 5, en las premontañas altas



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, las mediciones en la estación No. 6 del sector montañoso (Figura 9) arrojaron valores erosivos entre -0,07 y -0,50 m con máximas puntuales de cauce, del orden de -0,80 a -1,02 m, determinando velocidades erosivas de -0,010 a -0,015 m/año y hasta -0,16 a -0,20 m/año, con marcada tendencia a lo largo del año. El sector comprendido entre los cauces principal y secundario mantuvo cambios muy débiles.

Figura 9. Perfil dinámico de la estación No. 6, representativa de los procesos fluviales de cauce recientes en condiciones montañosas



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Las investigaciones geodinámicas sobre las magnitudes y tendencias de los movimientos tectónicos verticales recientes y sus correlaciones con las características de los campos geofísicos y fundamentalmente con la sismicidad y la sismo-estadística, aportan información básica sobre los sitios potenciales con mayor peligrosidad tectónica y sísmica, su posible recurrencia y magnitudes, permitiendo la elaboración de planes de prevención dentro de las acciones de la gestión de riesgos. A su vez, apoyan los trabajos de la planeación urbana, industrial y portuaria, entre muchas acciones de planificación del territorio, así como en la preparación de diseños de infraestructuras y construcciones sismorresistentes, lo que amortigua los efectos de los procesos telúricos regionales o locales.

Para estudios sistemáticos y de prognosis a mediano y largo plazos, el establecimiento de polígonos geodinámicos complejos es una medida que ha arrojado resultados positivos para el conocimiento de las regularidades regionales de la tectogénesis y sus vínculos con la sismicidad. Las investigaciones iniciales deben emprenderse con el levantamiento estructuro-tectónico de la región o localidad, así como de los mapas morfotectónico y morfoestructural del relieve. Esta base geólogo-geomorfológica permite un adecuado diseño de la red geodésica de nivelación y triangulación reiteradas, bajo el criterio del cruce de los bloques morfoestructurales, de manera perpendicular o transverso-diagonal a las estructuras disyuntivas, por cada una de las líneas de nivelación, lo que garantiza un óptimo levantamiento geodésico de las líneas con fines geodinámicos.

Los perfiles geodinámicos complejos aportan características estructurales del substrato geológico: la diferenciación morfoestructural del relieve; el trazado y caracterización de los signos geodésicos, según la evaluación ingeniero-geomorfológica de su nivel de estabilidad; la ubicación de topónimos importantes, como georreferentes; la confección de la curva de las velocidades relativas o absolutas, en mm/año, de los movimientos tectónicos verticales recientes, así como de sus gradientes, en mm/año/km. Adicionalmente, los datos de perfiles sismológicos, hidrológicos y mareográficos complementan los resultados de la interpretación integral.

Nuevas tecnologías como la técnica *Persistent Scatteres Interferometry,* empleando la interferometría de imágenes de radar, aportan mediciones precisas de los movimientos de la superficie terrestre, solo que los resultados deben ser analizados rigurosamente en condiciones de campo, con la finalidad de descartar los desplazamientos originados por los procesos geomórficos del modelado exógeno del relieve de aquellos resultantes de la actividad tectónica local. La práctica de estudios previos de esta naturaleza, dadas las magnitudes de las deformaciones tectónicas recientes, garantizan

una adecuada planeación urbana e incluso territorial, previniendo de agrietamientos y fracturamientos de la infraestructura habitacional, comercial e industrial, que elevan los costos económicos de mantenimiento y, además, como precursor de posibles afectaciones a la población.

Para los morfoelementos del relieve fluvial bajo de las cuencas hidrográficas montañosas es de vital significado conocer los valores del escurrimiento superficial durante las avenidas para diferentes probabilidades, así como calcular su escurrimiento sólido, para poder prevenir y corregir sitios urbanizados ante el peligro de flujos de lodo y rocas, tan impactantes en las llanuras fluviales de inundación bajas. En el caso del río Carpintero, en Cuba oriental, las investigaciones sobre la dinámica de los procesos fluviales de cauce recientes evidenciaron que, durante el año, tanto las precipitaciones como el escurrimiento son característicos para el clima estacionalmente húmedo, formado por dos períodos climático-hidrológicos bien diferenciados, los cuales determinan los cambios en los tipos genéticos de procesos fluviales imperantes, su intensidad y su tendencia en el sector inferior del valle.

El mosaico morfoestructural del relieve se destaca en el desarrollo dinámico fluvial, existiendo diferencias notables de su régimen entre las diferentes morfoestructuras escalonadas. En este sentido, existe una estrecha correspondencia entre los morfoelementos fluviales y el referido plano geoestructural, determinando las características morfológicas del plano de inundación de los cauces principal y secundario y del sector intercauce entre ellos, en condiciones de llanura; plano de inundación y cauce en la franja de lomeríos y cauces principal y secundario, con un sector interfluvial, en las premontañas y montañas.

Las magnitudes y tendencias de los procesos fluviales de cauce recientes alcanzan valores moderados, de acuerdo con las características hidrológicas de la cuenca, alcanzando velocidades acumulativas promedio de +0,04 a +0,09 m/año (sector intercauces en la llanura), de +0,02 a +0,05 m/año (cauce principal en zona de lomeríos pequeños) y de +0,02 a +0,10 m/año (planos de inundación premontañosos); mientras que las tendencias erosivas poseen valores de -0,02 a -0,14 m/año (cauces de llanura), de -0,02 a -0,07 m/año (planos de inundación en los lomeríos) y de -0,015 a -0,10 m/año, en ocasiones de -0,16 a -0.20 m/año (cauces montañosos). Estas magnitudes son pequeñas a moderadas, pero ilustran la importancia de este monitoreo exodinámico, sobre todo en grandes cauces fluviales cercanos a poblados o ciudades, con vistas a tomar medidas preventivas y correctivas, y de corte ingenieril, para reducir el peligro de los flujos de lodo y rocas/detritos, muy comunes en valles intramontanos y cuencas sobre subsuelo de conglomerados deleznables y sedimentario, bajo régimen pluvial estacional intenso.

Bibliografía

Alisov, B. P., 1989. "Zonas climáticas de la Tierra", en Gladstone Oliva Gutiérrez (coord.), *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*, Ed. Instituto Geográfico Nacional de España, Madrid, pp. VI. 1-2.

Argus, D. F. and Gordon, R. G., 2001. "Present tectonic motion across the Coast Ranges and San Andreas Fault system in central California". *Geological Society of America Bulletin* 113(12): 1580-1592.

Barreca, G., Bruno, V., Cocorullo, C., Cultrera, F., Ferranti, L., Guglielmino, F., Guzzetta, L., Matti, M., Monaco, C., Pepe, F., 2014. "Geodetic and geological evidence of active tectonics in southwestern Sicily (Italy)". *Journal of Geodynamics,* 82:138-149.

Batista Silva, J. L., 1974. "Escurrimiento medio anual de los ríos de Cuba", *Voluntad Hidráulica*, núm. 31, pp. 23-28.

Batista Silva, J. L., 1989. "Densidad de la red fluvial", en Gladstone Oliva Gutiérrez (coord.), *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*, Ed. Instituto Geográfico Nacional de España, Madrid, p. VII. 1.2.

Biedenharn, D. S., Copeland, R. R., Thorne, C. R., Soar, P. J., Hey, R. D., 2000. "Effective Discharge Calculation": A Practical Guide. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 49 p.

Cabral, J., Brito Mendes, V., Figueiredo, P., Brum da Silveira, A., Pagarete, J., Ribeiro, A., Días. R., Ressurreição, 2017. "Active tectonics in Southern Portugal (SW Iberia) inferred from GPS data. Implications on the regional geodynamics". *Journal of Geodynamics*, 112(1-11).

Calderhead, A., Martel, A., Alasset, P.J., Rivera, A., Garfias, J., 2010. "Land subsidence induced by groundwater pumping, monitored by D-InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico". *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36 (1), pp. 9-23, http://dx.doi.org/10.5589/j.m.2010.10.024.

Calderhead, A., Therrien, R., Rivera, A., Martel., Garfias, J., 2011. "Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico". *Advances in Water Resources*, 34 (2011) 83-97, http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.09.017.

Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F., 2013. "Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series". *Remote Sensing of Environment*, 140 (2014), 94–106, http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038.

Chorowicz, J., Luxey, P., Rudant, J. P., Lyberis, N., Yürür, T., Gündogdu, N., 1995. "Slip-motion estimation along the Ovacik Fault near Erzincan (Turkey) using ERS-1 radar image: evidence of important deformation inside the Turkish plate". *Remote Sensing of Environment,* 52, pp. 66-70. doi:10.1016/0034-4257(95)00014-R

Crosetto, M., Crippa, B., Biescas, E., Montserrat, O. y Agudo, M., 2005. "Land deformation monitoring using SAR interferometry: State-of-the-art".

Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (6) pp. 497-510. Disponible en: https://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/126-crosetto.pdf

Crosetto, M., Monserrat, O., Devanthéry, N., Cuevas-González, M., Barra, A. y Crippa, B., 2016. "Persistent Scatterer Interferometry Using Sentinel-1 Data". The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 41 (B7), pp. 835-839.

Dávila, H., N., 2011. Modelo de segmentación de depósitos volcánicos superficiales en el Volcán de Colima, México utilizando imágenes ópticas (Terra/Aster y Spot 5) y de radar de alta resolución (TerraSAR-X). Tesis doctoral. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México.

Dávila, N., Madrigal, D., Expósito, J. y Antonio, X., 2014. "Multi-Temporal Analysis of Land Subsidence in Toluca Valley (Mexico) through a Combination of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and Historical Piezometric Data". Advances in Remote Sensing (3), pp. 49-60 http://dx.doi.org/10.4236/ars.2014.32005.

Devanthéry, N., Crosseto, M., Monserrat, O. y Cuevas-González, M., 2016. "Deformation monitoring using Sentinel-1 SAR data". 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Vienna, Austria, 30 de marzo – 1 de abril de 2016. Disponible en: https://www.fig.net/resources/proceedings/2016/index.asp

Díaz Cisneros, L. R., 1985. *Metódica de la regionalización climática de países tropicales en el ejemplo de Cuba*, Tesis de Doctorado, Instituto de Geografía, Academia de Ciencias de Rusia, Moscú, 145 p. (en ruso)

Díaz Cisneros, L. R., 1989. "Regionalización climática general, en Gladstone Oliva Gutiérrez (coord.)", *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*, Ed. Instituto Geográfico Nacional de España, Madrid, p. VI.4.4.

Díaz Cisneros, L. R., Trusov, I. I., Izquierdo Ramos, A., 1989. "Precipitación media anual en el período lluvioso, 1931-1972", en Gladstone Oliva Gutiérrez (coord.), *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*, Ed. Instituto Geográfico Nacional de España, Madrid, p. VI.3.2.

Díaz, J. L., 1986. *Morfoestructuras de Cuba occidental y su geodinámica reciente*. Tesis de Doctorado, Moscú, Academia de Ciencias de la U.R.S.S., 232 p.

Doyle, M. W., Douglas Shields Jr., F., 2000. "Incorporation of bed texture into a channel evolution model", *Geomorphology*, 38:291-309.

Enman, S. V. and A. A., Nikonov, 1993. "A comparative analysis of maps of vertical cristal movements for European Russia". *Journal of Geodynamics*, 18(1-4):33-41.

Espinosa Rodríguez, L. M., J. R., Hernández Santana, A. P., Méndez Linares, 2016. "Evidencia geodésica de movimientos verticales recientes en la zona sismogeneradora de Acambay, México". *Minería y Geología*, 32(4):91-109.

Finko, E. A., 1992. "The relationship of recent vertical movements to the morphostructural pattern of the Kazakn shield". *Journal of Geodynamics* 15(3-4): 209-214.

Garatachía Ramírez, J. C., 2017. *Peligro sísmico en Tijuana, Baja California: una*

evaluación geodinámica mediante tecnologías de la información geográfica. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 214 p.

García, C., Laronne, J. B., Sala, M., 2000. "Continuous monitoring of bedload flux in a mountain gravel-bed river", *Geomorphology*, 34:23-31.

Gabriel, A., K., Goldstein, M. y Zebker, A. 1989. "Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry". *Journal of Geophysical Research* (94) pp. 9183-9191. Disponible en: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JB094iB07p09183/abstract

Geri, G., Perusini, P. and Rossi, A., 1984. "Topografic changes in the Travale-Radicondoli geothermal field during the first ten years of exploitation". 3rd. Int. Symp. On *Land Subsidence.* Venice.

Gorelov, S. K., Taguiev, S.T., Chelpanov, S. S., 1973. "Metódica y resultados de las observaciones instrumentales de los movimientos recientes de la corteza terrestre y del desarrollo de los procesos fluviales en el Kopetdag Central". *Geomorfologuia*, 4: 35-42 (en ruso).

Hernández-Santana, J. R., 1987a. *Geomorfología estructural y geodinámica reciente del relieve de Cuba Suroriental en la zona de interacción de la Microplaca Cubana y lafosa profunda de Bartlett.* Tesis de Doctorado, Moscú, Academia de Ciencias de la U.R.S.S., 264 p.

Hernández-Santana, J. R., González Ortíz, R., Venereo Morales, A., Ávila Hernández, J., 1987b. "Estudio de los procesos fluviales recientes de cauce del Río Carpintero, Cuba, mediante métodos geodésicos". *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 13:39 -55.

Hernández-Santana, J. R., González Ortiz, R., (†), Venéreo Morales, A., Ávila Hernández, J., 1989. "Dinámica de los procesos de cauce recientes", en Gladstone Oliva Gutiérrez (coord.) *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*, Ed. Instituto Geográfico Nacional de España, Madrid, p. IV. 2.4.

Hernández-Santana, J. R., Díaz, J. L., Magaz García, A. R., Lilienberg D. A., 1991. "Evidencias morfoestructuro-geodinámicas del desplazamiento lateral siniestro de la zona de sutura entre placas de Bartlett", en José Ramón Hernández Santana (coord.), *Morfotectónica de Cuba Oriental*, La Habana, Ed. Academia, pp. 5-9.

Hernández Valencia, L., 2011. Manual de operación de la estación total, 77 p. Consultado el 7 de septiembre de 2019 en https://www.abreco.com.mx/manuales_topografia/teodolitos_estaciones/Manual%20de%20Operacion%20de%20Estacion%20Total.pdf

Hu, J., Ding, X.L., Li, Z. W., Zhang, L., Zhu, J. J., Sun, Q., Gao, J., 2016. "Vertical and horizontal displacements of Los Angeles from InSAR and GPS time series analysis: Resolving tectonic and anthropogenic motions". *Journal of Geodynamics*, 99:27-38.

Huggel, D., Schneider, D., Julio, P., Delgado, G. y Kääb, A. 2008. "Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: A case study on lahars from Popocatépetl Volcano, Mexico". *Journal of Volcanology and Geothermal Research,* 170 (2008) pp. 99-110.

Interamerican Geodhetic Service, 1948. *Manual of levelling computation and adjustment*, Special Publication, no. 240, Washington.

Jiang, L., Lin, H. y Liu, F., 2010. "Application of ENVISAT ScanSAR interferometry to long-range fault creep: a case study of the Xianshuihe fault in the eastern Tibetan margin area". *Annals of GIS* 16 (2), pp. 113-119 DOI: 10.1080/19475683.2010.492127.

Jónsson, S., Segall, P., Pedersen, R., Björnsson, G., 2003. "Postearthquake ground movements correlated to pore-pressure transients". *Nature*, 424, pp. 179-183. doi:10.1038/nature01776.

Kasser, M., Ruegg, J. C. and Lopine, J. C., 1987. "Geodetic measurements on the Asal Rift (Djibouti): twelve years of observations". *Journal of Geodynamics* 7(3-4): 221-226.

Kurbanov, M., Gorielov, S. K., Chelpanov, S. Taguiev, S., Voronzova, S., 1973. *Estructura profunda y deformaciones neotectónicas de la zona sismogeneradora de Asjabad*. Asjabad, Ed. Ilim, 158 p. (en ruso).

Lilienberg, D. A. and Setunskaya, L. E., 1980. "Problems of content, typology and methodology of compilation of maps of modern tectonic movements". En *Recent Crustal Movements Theory, Methods, Prognose Crustal Movements*. Moscow, Ed. Nauka, pp. 76-84.

Lilienberg, D. A., Hernández, J. R., Marques, M. E. and Rueda, J., 1988. "General Trends and Regional Differentiation of the Recent Geodynamics of Morphostructures of an Island Interplate Zone: Studies in a Complex Polygon at Santiago de Cuba and in an Eastern Cuba Model Area". *Journal of Geodynamics* 9(2-4): 305-318.

Lilienberg, D. A., J. R. Hernández Santana, M. E., Marques Tablón, J. L., Álvarez Gómez, 1993. *Movimientos tectónicos recientes de Cuba*. La Habana, Editorial Academia, t. I, 453 p.

Lingyun, Ji, Yaxuan, Hu, Qingliang, Wang, Xiaofeng, Xu, Jing, Xu, 2015. "Large-scale deformation caused by dyke intrusion beneath eastern Hainan Island, China observed using InSAR". *Journal of Geodynamics*, 88:52-58.

López-Quiroz, P., Doin, M. P., Tupin, F., Briole, P., & Nicolas, J.M., 2009. "Time-series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry". *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 1–15, http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.02.006.

López, C., A., 2015. *Caracterización de la deformación en las ciudades de Celaya y Salamanca a partir de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) y GPS*. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra: Universidad Nacional Autónoma de México.

Manzo, M., Fialko, Y., Casu, F., Pepe, A. y Lanari, R., 2012. "A Quantitative Assessment of DInSAR Measurements of Interseismic Deformation: The Southern San Andreas Fault Case Study". *Pure and Applied Geophysics*, 169, pp. 1463-1482.

Marchi, L., Arattano, M., Deganutti, A. M., 2002. "Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps)", *Geomorphology*, 46:1-17.

Marques Tablón, M. E. y J., Rueda Pérez, 1993. "Base instrumental del polígono". En

D. A. Lilienberg, J. R. Hernández Santana, M. E., Marques Tablón y L., Álvarez Gómez *Movimientos tectónicos recientes de Cuba I Polígono geodinámico complejo de Santiago de Cuba.* La Habana, Editorial Academia, pp. 155-202.

Marques Tablón, M. E., 1997. *Caracterización de la geodinámica reciente de Cuba oriental, según los datos de la nivelación reiterada*. Tesis de Doctorado, GEOCUBA, La Habana, Cuba.

Méndez Mata, W. J., 2016. "Análisis cuantitativo del relieve en cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo "El Ávila" (estado Vargas, Venezuela) y su significado hidrogeomorfológico". *Investigaciones Geográficas,* 91:25-42.

Milne, John, 1896. "Movements of the Earth's Crust". *The Geographical Journal*, 7(3):229-247.

Molina, L. F., 2006. *Campo de velocidades de la falla Boconó a partir de observaciones GPS*. Tesis de grado. Sartenejas. 39 p.

Nastaran A., Mahdi, M., Abbas, B., Mohammad A. S., Mahmud, H. H., 2014. "Using Envisat InSAR time-series to investigate the surface kinematics of an active salt extrusion near Qum, Iran". *Journal of Geodynamics*, 81:56-66.

Osmanoglu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Jiang, Y., 2010. "Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR". *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 13(2011), 1–12, http://dx.doi.org/10.1016/ j.jag.2010.05.009.

Ozener, H., Arpat, E., Ergintav, S., Dogru, A., Cakmak, R., Turgut, B. and Dogan, U., 2010. "Kinematics of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone". *Journal of Geodynamics* 49(3): 141-150.

Papazachos, C. B., Kiratzi, A. A. and Papazachos, B. C., 1992. "Rates of active crustal deformations in the Aegean and the surrounding area". *Journal of Geodynamics* 16(3): 147-179.

Pedersen, R., Sigmundsson, F., Feigl, K.L., Árnadóttir, T., 2001. "Coseismic interferograms of two Ms=6.6 earthquakes in the South Iceland Seismic Zone, June 2000". *Geophysical Research Letters*, 28 (17), pp. 3341-3344. Disponible en: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001GL013235/pdf

Pinel, V., Hooper, A., De la Cruz-Reyna, S., Reyes-Dávila, G., Doin, M. y Bascou, P. 2011. "The challenging retrieval of the displacement field from InSAR data for andesitic stratovolcanoes: Case study of Popocatepetl and Colima Volcano, Mexico". *Journal of Volcanology anf Geothermal Research* 200 (2011) pp. 49-61.

Reilinger, R., E., Ergintav, S., Bürgmann, S., McClusky, S., Lenk, O., Barka, A., Gurkan, O., Hearn, L., Feigl, K., L., Cakmak, R., Aktub, B., Ozener, H., Töksoz, M., N., 2000. "Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999, M=7.5, Izmit, Turkey earthquake". *Science,* 289 (5484), pp. 1519-1524. DOI: 10.1126/science.289.5484.1519.

Rizza, M., Vernant, P., Ritz, J., F., Peyret, M., Nankali, H., Nazari, H., Djamour, Y., Salamati, R., Tavakoli, F., Chery, J., Mahan, S., A. y Masson, F., 2013.

"Morphotectonic and geodetic evidence for a constant slip-rate over the last 45 kyr along the Tabriz fault (Iran)". *Geophysical Journal International*, 193, pp. 1083-1094 doi: 10.1093/gji/ggt041.

Rontogianni, S., 2010. "Comparison of geodetic and seismic strain rates in Greece by using a uniform processing approach to campaign GPS measurements over the interval 1994-2000". *Journal of Geodynamics* 50(5): 381-399.

Rostom, R. S., 1991. "Monitoring recent crustal movements in the Kenya rift valley by global positioning System (GPS): a (GPS) -a proposal". *Journal of Geodynamics* 14(1-4): 65-72.

Samsonov, S., Tiampo, K., Rundle, J. y Li, Z., 2007. "Aplicattion of DInSAR-GPS optimization for derivation of line-scale surface motion maps of souther California". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 45 (2), pp. 512-521.

Sánchez, F., Vorobiova E., 1992. "Modelo geodinámico del segmento cubano noroeste de la Placa Caribe", *Memorias de la XIII Conferencia Internacional de Geología del Caribe*, p. 111.

Sarychikhina, O., Glowacka, E., Suárez, V., F., Mellors, R. y Ramírez, H., J., 2011. "Aplicación de DInSAR a los estudios de subsidencia en el Valle de Mexicali". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana,* 63 (1), pp. 1-13.

Tooth, S., 2000. "Downstream changes in dryland river channels: The Northern Plains of arid central Australia", *Geomorphology*, 34:33-54.

Völksen, C., Árnadóttirb, T., Geirssonc, H. and Valssond, G., 2009. "Present day geodynamics in Iceland monitored by a permanent network of continuous GPS stations". *Journal of Geodynamics* 48(3): 279-283.

Wei Qu, Zhong Lu, Qin Zhang, Qingliang Wang, Ming Hao, Wu Zhu, Feifei Qu, 2018. "Crustal deformation and strain fields of the Weihe Basin and surrounding area of central China based on GPS observations and kinematic models". *Journal of Geodynamics,* 120:1-10.

Wright, T., Parsons, B., Fielding, E., 2001. "Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry". *Geophysical Research Letters*, 28 (10), pp. 2117-2120. DOI: 10.1029/2000GL012850.

Zeman, A., 1988. "General trends of normal height changes in Czechoslovakia for a period of approximately 33 years". *Journal of Geodynamics* 10(2): 167-174.

2.5. Monitoreo y sistemas de alerta ante la presencia de deslizamientos

José Emilio Baró Suárez
Srahyrlandy Rocío Díaz Sánchez
Luis Miguel Espinosa Rodríguez

Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

El objetivo principal de un estudio de estabilidad de taludes o laderas es el de establecer medidas de prevención y control para reducir los niveles de amenaza y riesgo. Los beneficios más importantes desde el punto de vista de reducción de amenazas y riesgos es la prevención. Schuster y Kockelman (1996) proponen una serie de principios generales y metodologías para la reducción de amenazas de deslizamiento a través de sistemas de prevención, los cuales requieren de políticas del Estado y de colaboración y conciencia de las comunidades. Las situaciones típicas en las cuales se requiere la instrumentación son las siguientes (Suárez, 2009:1-2):

- Determinación de la profundidad y forma de la superficie de falla en un deslizamiento activo.
- Determinación de los movimientos laterales y verticales dentro de la masa deslizada.
- Determinación de la RATA o velocidad de deslizamiento y el establecimiento de mecanismos de alarma.
- Monitoreo de la actividad de cortes o rellenos e identificación de los efectos de una determinada construcción.
- Monitoreo de los niveles de agua subterránea o presiones de poros y su correlación con la actividad del deslizamiento.
- Instrumentación y control.

El instrumento permite comprobar el comportamiento del talud y verificar los modelos y análisis de estabilidad realizados. Los movimientos en el interior del terreno se miden con inclinómetros y extensómetros. Otros métodos para definir los planos de rotura son los pozos de revestimiento discontinuo y la

introducción de testigos en sondeos entubados. Otras técnicas geofísicas también pueden ser de ayuda para la localización de zonas de debilidad y discontinuidad en el interior de los taludes como la medida de movimientos de aperturas de grietas.

Control y evaluación del monitoreo de los desplazamientos

El monitoreo deberá ejecutarse de acuerdo con lineamientos generales como los expresados a continuación (CENAPRED, 2002):

- De considerarse necesario, las mediciones superficiales mediante instrumentos serían con extensómetros en la cima y en el pie de la ladera, y la definición de la profundidad de la superficie de falla mediante inclinómetro, en la parte central del eje longitudinal. En los casos donde el deslizamiento exceda los 150 m de ancho, se requerirá una segunda línea de medición, para ello se colocan en ella arreglos similares a los de aquella línea principal.
- La frecuencia de medición será una vez por semana durante un periodo ordinario, dos a tres veces por semana en una etapa precautoria, y mediciones diarias ante condición de falla inminente.
- La medición debe continuarse por alrededor de un año, una vez que la actividad de un deslizamiento se detenga. Debe reconfirmarse esta situación, para detectar posible reactivación durante y después de la temporada de lluvias y huracanes.
- Los resultados del monitoreo son utilizados para evaluar el tamaño y la etapa del movimiento masivo que conduciría a su falla. Los movimientos de los deslizamientos tienen un proceso que transitan desde un momento temprano en el cual se observa acumulación de movimiento, una etapa secundaria en la que se aprecian grietas y movimiento constante y la fase final caracterizada por aumento en número y el crecimiento de grietas, lo que conduce a la falla. Las medidas a tomar en cada etapa son también diferentes: de monitoreo creciente en la etapa temprana, hasta el cierre y evacuación de las zonas de alto riesgo.

Métodos de mitigación ante deslizamiento

Mediciones topográficas

Los métodos basados en la medición de referencias topográficas permiten conocer con exactitud la velocidad y la magnitud de los movimientos superficiales de una masa de suelo o roca. Estos métodos permiten monitorear un área que haya mostrado algunos indicios de inestabilidad (CENAPRED, 2002: 26) mediante estas técnicas es posible. El monitoreo topográfico se

realiza por nivelación y colimación de referencias superficiales. Este método consiste en colocar referencias o bancos topográficos (testigos) a lo largo de ejes o líneas longitudinales y transversales dentro del área en movimiento. (CENAPRED, 2002:26).

Monitoreo a profundidad

Los movimientos en el interior del terreno se miden con Inclinómetros y extensómetros. Además de ser útiles para la medida de la velocidad y dirección del movimiento, permiten localizar las superficies de rotura. (González de Vallejo, *et al*., 2002: 481).

Inclinómetro: Su utilización permite detectar con precisión la profundidad de los movimientos laterales del terreno respecto a un eje vertical. Esta técnica requiere la perforación de un pozo de 4" de diámetro, a lo largo del cual se instalan tubos de inclinómetro de 3" de diámetro, los cuales cuentan con cuatro guías opuestas por su interior, y perpendiculares entre sí. Al introducir una sonda instrumentada de forma electrónica, es posible registrar las inclinaciones a diferentes profundidades en el plano vertical por donde pasan las guías (CENAPRED, 2002: 33).

Un sistema de inclinómetro estará conformado por 4 componentes principales (Figura 1):

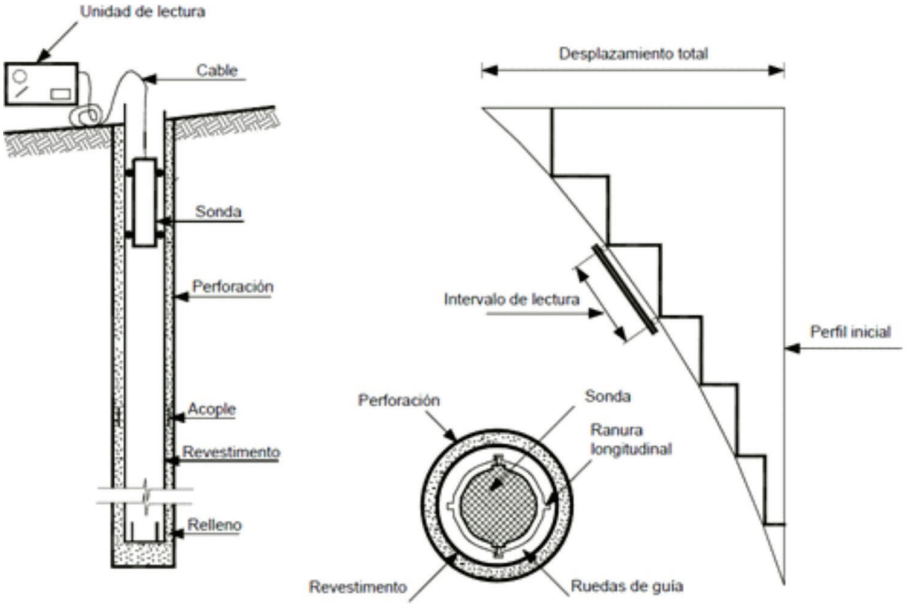
1. Un tubo guía de plástico, acero o aluminio, instalado dentro de una perforación. Este tubo tiene unas guías longitudinales para orientar la unidad sensora. Por lo regular se utilizan diámetros de tubo entre 1.5 y 3.5 pulgadas.
2. Un sensor portátil montado sobre un sistema de ruedas que se mueven sobre la guía del tubo. El inclinómetro incorpora dos servoacelerómetros con fuerzas balanceadas para medir la inclinación del instrumento.
3. Un cable de control que baja y sube el sensor y transmite señales eléctricas a la superficie. Éste se encuentra graduado para el control superficial y tiene un núcleo de acero para minimizar las deformaciones. Los cables eléctricos se encuentran espaciados alrededor y unidos al núcleo. La cubierta exterior es de neopreno y permanece siempre flexible.
4. Un equipo de lectura en la superficie (que sirve de proveedor de energía) recibe las señales eléctricas, presenta las lecturas y, en ocasiones, puede guardar y procesar los datos (Suárez, 2009: 8-9).

Dispositivo TDR de reflectometría

El TDR (*Time Domain Reflectometer*, o Reflectómetro en el Dominio de Tiempo en español) es un dispositivo que se utiliza para monitorear los movimientos laterales a profundidad en laderas inestables. Su instalación requiere de la perforación de un pozo que tenga de 2 a 4 pulgadas de diámetro, a lo largo del cual se inserta un cable coaxial; éste se fija a la base de la perforación por medio de un contrapeso y el pozo se rellena con una lechada pobre de

suelo-cemento (Suárez, 2009:18-19). La medida de movimientos de apertura de grietas y entre bloques rocosos se suele realizar mediante elementos mecánicos (calibre, cinta métrica, hilos) o mediante transductores eléctricos (González de Vallejo, *et al*., 2002: 481) (Figura 2).

Figura 1. Esquema de un inclinómetro



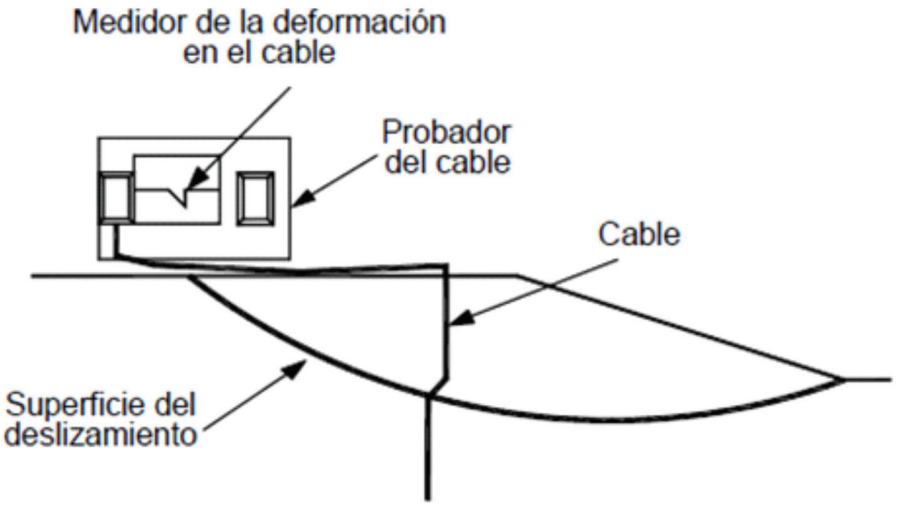
Fuente: Hanna, 1985.

Piezómetros

La presión de poros se puede monitorear a través de excavaciones de observación o piezómetros, los cuales pueden ser de tubo abierto, neumáticos o de cable vibratorio (Suárez, Jaime, 2009:18). De forma común, los piezómetros se colocan dentro de un bulbo poroso confinado en la base y de manera lateral al suelo; el cual posee un sello formado de manera artificial.

Este método de instalación permite que los piezómetros solo respondan a la presión del agua que se trasmite al bulbo poroso en el que se aloja el dispositivo de medición, y no a presiones de agua correspondientes a otras elevaciones. El sello impide la comunicación del dispositivo con el agua que se puede acumular en la perforación realizada para su instalación (CENAPRED, 2002).

Figura 2. Esquema del sistema TDR



Fuente: Abramson, et al., 2002.

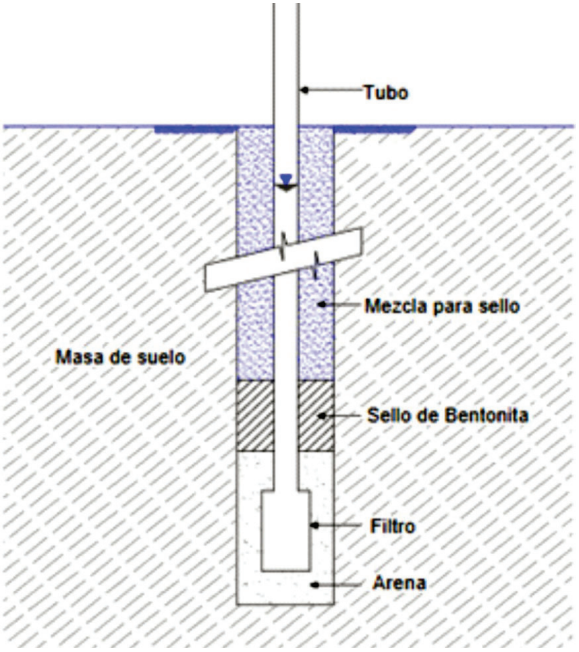
Piezómetros de tubo abierto

Este tipo de piezómetros, conocidos también como piezómetros tipo Casagrande, consisten en un tubo de 1 a 2 pulgadas de diámetro fabricados de PVC, conectado en uno de sus extremos a un elemento poroso (Figura 3) ; el cual puede ser un tramo de tubo multiperforado o un pequeño cilindro poroso de cerámica de escasos 10 cm de longitud (CENAPRED, 2002).

Piezómetros neumáticos

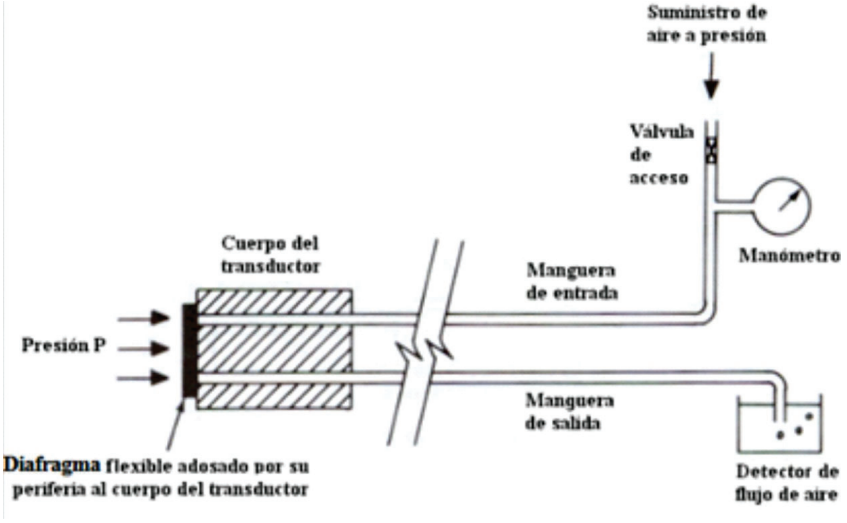
A fin de hacer más rápida la respuesta de los piezómetros a los cambios de presión en el agua, se han desarrollado otros equipos que requieren flujos y cambios volumétricos mucho menores dentro del aparato. Una delgada lámina o diafragma flexible recibe la presión del agua que provoca su deflexión, y con ello la obturación de dos orificios en el lado seco del diafragma (Figura 4). Al aplicar presión neumática controlada por uno de esos orificios, la energía requerida para separar el diafragma corresponde a la que ejerce la presión en el agua, lo que se constata al detectar cierto flujo de aire de retorno por el otro orificio (CENAPRED, 2002).

Figura 3. Esquema de un piezómetro de tubo abierto tipo Casagrande



Fuente: Dumnicliff, 1993.

Figura 4. Principio de medición de un piezómetro neumático



Fuente: Dumnicliff, 1993.

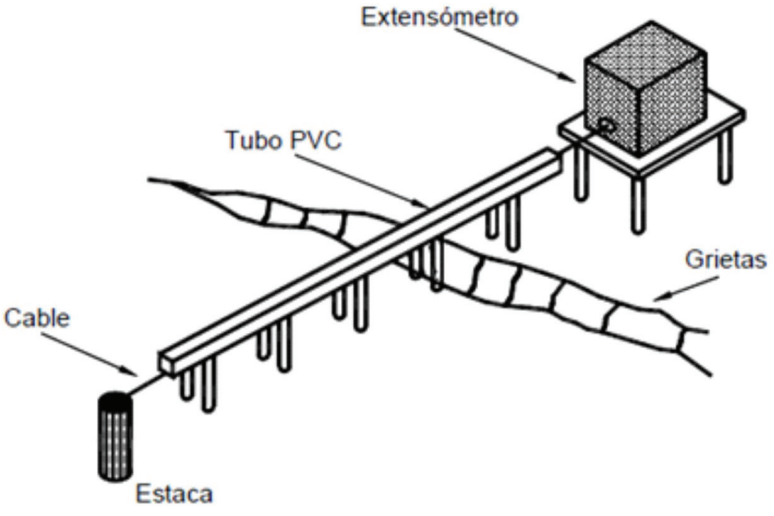
Piezómetros eléctricos

Este tipo de instrumentos guardan cierta similitud con los piezómetros neumáticos. Su diafragma es menos flexible, lo que determina que tengan una respuesta rápida a los cambios de presión en el agua, ya que los cambios volumétricos asociados son despreciables. En vez de los orificios para el sistema neumático, las deformaciones del propio diafragma funcionan como elemento de medición de la presión en el agua. Para ello se colocan o integran *strain gages* al diafragma, ya sea resistivos o de cuerda vibrante. Así pues, las deformaciones del diafragma están relacionadas de forma proporcional con los cambios de la presión que ejerce el agua sobre el diafragma, lo que se conoce mediante la respectiva calibración (CENAPRED, 2002).

Extensómetros Horizontales

Los extensómetros permiten medir los movimientos horizontales relativos y los cambios en la amplitud de las grietas. El extensómetro es utilizado para medir el movimiento relativo que compara la distancia entre dos puntos de una forma manual o automática. Los extensómetros, se instalan a través del escarpe principal o a través de las grietas, para determinar el movimiento (Figura 5). Estos pueden ser láminas plásticas transparentes montadas a lado y lado de la grieta, o placas metálicas. Un medidor sencillo consiste en una tira metálica que se puede deslizar sobre una lámina en la cual se miden las deformaciones. Los movimientos pueden medirse en tres direcciones: dos sobre la lámina y un tercero que mide la separación entre la lámina y la tira metálica, es decir, la separación entre los dos elementos (Suárez, 2009: 4).

Figura 5. Instalación de un extensómetro horizontal

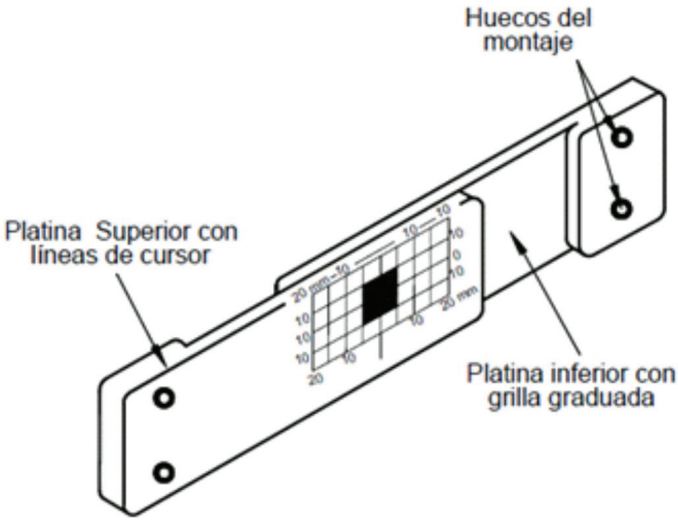


Fuente: Suárez, Jaime, 2009.

Medidores de grilla graduada

Los medidores de grilla graduada también se conocen como medidores calibrados y consisten en dos láminaas transparentes plásticas traslapadas (Figura 6) una a cada lado de la discontinuidad (Suárez, 2009: 4).

Figura 6. Medidor de grilla graduada



Fuente: Suárez, Jaime, 2009.

Deformímetros eléctricos

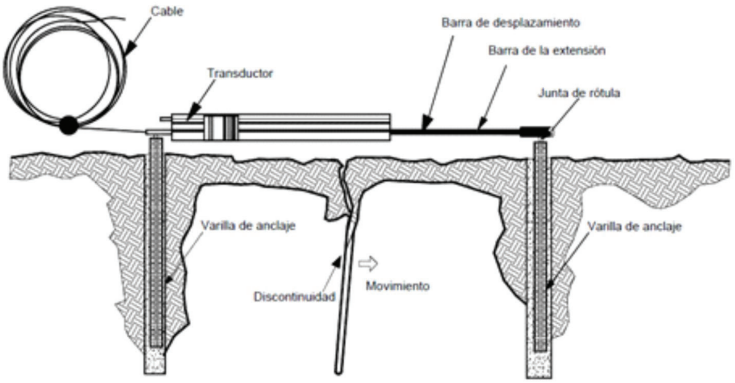
Los deformímetros eléctricos permiten mediciones precisas (Figura 7). Existen diferentes sistemas de medición eléctrica de deformaciones, los cuales utilizan transductores con precisión entre 0.0025 y 0.01 milímetros (Suárez, 2009: 5).

Extensómetros verticales

Los extensómetros verticales (o medidores de deformación vertical) miden el aumento o disminución de la longitud de un cable que conecta varios puntos anclados dentro de una perforación y cuya distancia de separación es conocida de manera aproximada (Figura 8). Por lo general se colocan unos pesos para mantener la tensión en los cables. El fondo del cable debe estar en el suelo o en roca dura y estable.

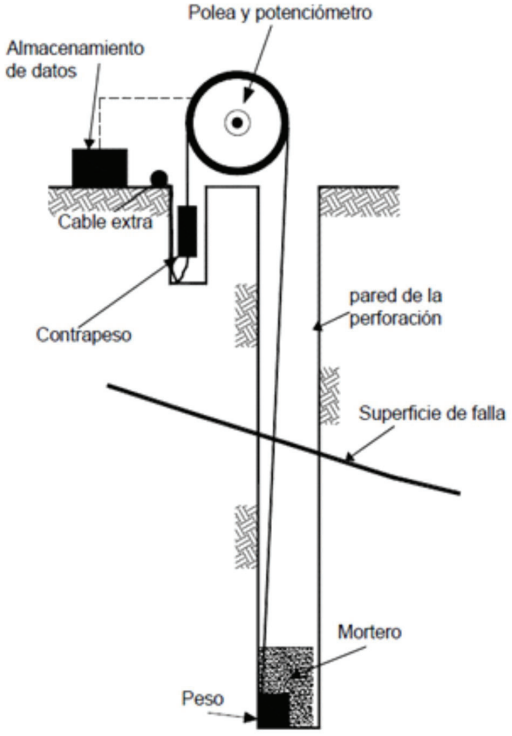
Los extensómetros verticales son útiles para determinar movimientos de la superficie de falla que presenta deformaciones mayores de cinco centímetros, caso en el cual, los inclinómetros no se pueden utilizar por la imposibilidad de la entrada del equipo medidor, al tubo del inclinómetro. El sistema es simple y permite mediciones frecuentes con facilidad.

Figura 7. Medidor eléctrico para deformaciones de grietas



Fuente: Dumncliff, 1988.

Figura 8. Extensómetro vertical sencillo para medir el desplazamiento de la superficie de falla



Fuente: Corominas y otros, 2000.

Monitoreo de Agrietamiento Superficial

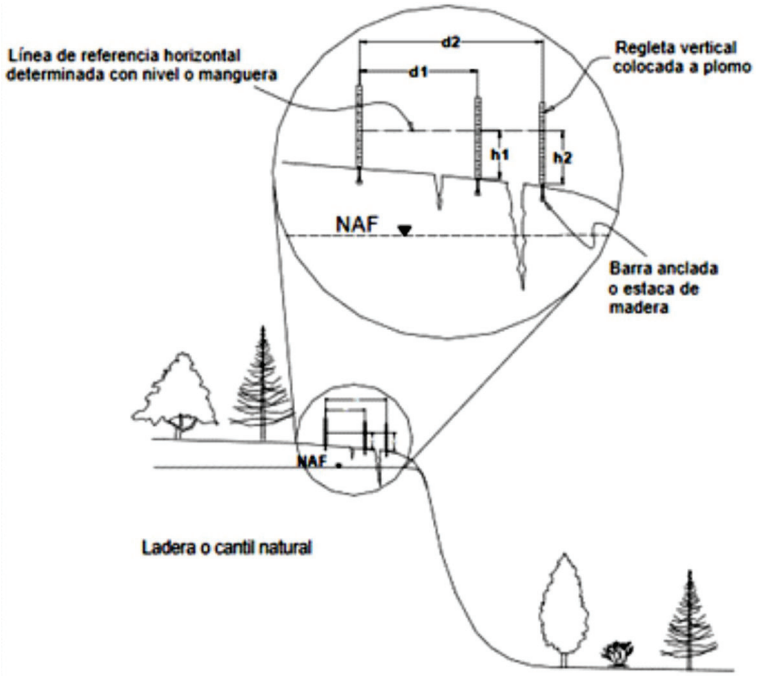
Los diferentes monitoreos que existen para vigilar los agrietamientos superficiales son los siguientes (CENAPRED, 2002: 28-31) (Figura 9):

- Uso de cinta y nivel. El método consiste en colocar puntos de referencia, de preferencia barras de metal ancladas en el terreno, en los que se pueda medir la separación a través del empleo de regletas graduadas o flexómetros.
- Uso de regletas deslizantes. El método consiste en colocar dos regletas de plástico transparente, paralelo entre sí, fijas a dos postes anclados a cada lado de una grieta, de esta manera se puede definir la evolución de su abertura en la superficie, al medir los componentes vertical y horizontal del desplazamiento relativo. En una de las regletas se traza una malla reticular de 20 x 20 cm, la cual puede ser subdividida de forma milimétrica si así se desea para mejorar la precisión de las mediciones. En la otra regleta se traza un cursor que se hace coincidir con el centro o cruce de los ejes principales de la malla, durante su colocación. Los movimientos subsecuentes del cursor indican el desplazamiento relativo del terreno con respecto a una lectura previa.
- Uso de dispositivos basados en poleas y alambres. Consiste en colocar dispositivos basados en alambres y poleas que se pueden integrar en un sistema de alarma, el cual se activa al ser impulsado un desplazamiento en una regleta graduada.
- Uso de dispositivos eléctricos y mecánicos. Otra de las técnicas consiste en colocar dispositivos eléctricos y mecánicos que permitan medir los desplazamientos relativos entre masas en movimiento. La principal ventaja de estos dispositivos consiste en que pueden incorporarse a un sistema de comunicación.

Algunos otros autores como Keller y Edward (2004: 174) plantean que para reducir el riesgo mediante la prevención de deslizamientos naturales con el uso de la ingeniería y las técnicas comunes para ello se reducen en tres:

- Control de Drenaje: el objetivo es desviar el agua para evitar que circule o se infiltre en la ladera, la escorrentía superficial puede ser desviada en la ladera mediante una serie de acequias superficiales.
- Nivelación: en una sola operación de corte y relleno, se elimina el material de la parte superior de una ladera y se coloca cerca de su base, de esta manera se reduce el gradiente total y se elimina material de la parte superior de la ladera donde contribuye a la fuerza impulsora, colocándolo en el pie de la ladera donde aumenta la fuerza de resistencia.
- Estructuras de soporte: uno de los métodos más comunes de estabilización de una ladera es un muro de contención que la sostenga, estos muros pueden construirse de hormigón o ladrillo, mallas de alambre llenas de roca llamadas gaviones o una serie de pilares de largas vigas de hormigón.

Figura 9. Medición de la separación y desnivel entre masas en movimiento



Fuente: CENAPRED, 2002.

Sistemas de alarma y alerta temprana SAT

La predicción de deslizamientos es un proceso complejo debido a la naturaleza del fenómeno, ya que la ocurrencia de estos eventos se presenta en condiciones específicas que pueden variar según el espacio. Las características del terreno no serán las mismas siempre, porque al trasladarnos de un espacio a otro cambian tanto los factores locales del terreno (pendiente, suelo, geología, vegetación, uso del suelo, etc.) como los detonantes (lluvias y sismos) que inciden en la generación del evento.

Según lo anterior el desarrollo de sistemas de alerta y alarma requieren de altos niveles de especificidad, adaptados a escalas locales donde se tenga un conocimiento pleno de los deslizamientos ocurridos con anterioridad como las condiciones que deben ser monitoreadas. Asimismo, es de vital importancia definir el sistema a implementar, ya que no es lo mismo referirse a sistemas de alerta que a sistemas de alarma, los cuales se suelen confundir y/o unificar; no obstante, a ello, son distintos.

Los sistemas de alerta y alarma se diferencian por el objetivo que persiguen. Según la Real Academia Española (2019a) una alarma significa "*Aviso o señal de cualquier tipo que advierte de la proximidad de un peligro*", por lo que los sistemas de alarma son aquellos donde la ocurrencia de un evento catastrófico es inminente, su objetivo principal es el de dar aviso a la población para que actúen en defensa de sus vidas o supervivencia, así como a las entidades para que activen protocolos al momento de que el evento ocurra.

Según la Real Academia Española (2019b) una alerta significa "*Aviso o llamada para ejercer vigilancia.*", en este sentido los sistemas de alerta son aquellos donde existe la posibilidad de que se presente un evento catastrófico, pero no es un hecho de que vaya a ocurrir a diferencia del sistema de alarma donde el evento si ocurrirá. Su objetivo principal es prever que las condiciones de ocurrencia son propicias, para que la población esté atenta y se tomen precauciones. En las entidades se activan protocolos de vigilancia y prevención. De este modo, se busca la disminución de pérdidas de vidas humanas y afectaciones en la medida de que se cuenta con cierta anticipación para actuar frente a la posibilidad de un deslizamiento.

En el presente es común escuchar el término Sistemas de Alerta Temprana (SAT), estos se han desarrollado a partir de las directrices de la oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, estrategias y acuerdos internaciones en los que se invita a que las naciones se comprometan a incorporar políticas para la reducción y prevención del riesgo mediante medidas en las que se incluyen sistemas de alertamiento.

Según el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2019) un sistema de alerta temprana es un conjunto de elementos relacionados entre sí que proveen información oportuna y eficaz a los individuos, a las comunidades y a las autoridades correspondientes para actuar con tiempo suficiente y de una manera apropiada frente a escenarios de amenaza, para reducir el riesgo de daño personal, pérdida de la vida, daño a sus propiedades y al medio ambiente.

Un sistema de alerta temprana se compone de cuatro elementos fundamentales: el conocimiento del riesgo; el seguimiento de cerca (o monitoreo), el análisis y el pronóstico de las amenazas; la comunicación o la difusión de las alertas y los avisos y, por último, las capacidades locales para responder frente a la alerta recibida (UNISDR, 2009). Dichos elementos se interrelacionan, no es posible que se dé un componente sin el otro de tal manera que deben estar sincronizados entre sí para el funcionamiento del sistema.

Cada uno de los elementos se encuentra representados en entidades encargadas de desarrollarlos (Figura 10). De esta manera, los grupos científicos y unidades de gestión del riesgo del Estado son las encargadas del componente conocimiento del riesgo, es aquí donde se llevan a cabo los estudios necesarios para identificar el nivel de riesgo ante un evento.

Asimismo, apoyan la implementación de sistemas de monitoreo y planes de contingencia. Por su parte, los organismos de comunicación y difusión son los encargados de emitir información clara y precisa que active la respuesta de la población, así como los protocolos preestablecidos y operados por las autoridades. En este proceso la población es un eje transversal presente en todos los componentes por lo que su inclusión es vital.

Figura 10. Organismos encargados del desarrollo de los componentes en un SAT

Fuente: CENAPRED, 2019.

Casos de sistemas de alerta temprana en deslizamientos SATD

A pesar del desafío que supone el desarrollo de un SAT para deslizamientos, países como India, China, Italia, Colombia, Costa Rica, Nueva Zelanda, Taiwán, Estados Unidos y Canadá, entre otros, se han enfrentado a este reto, debido a la importancia que supone llevarlos a cabo. Según Pecoraro (2018) los sistemas de alerta temprana de deslizamientos SATD (*Landslide Early Warning Systems* LEWS) se aplican cada vez más en todo el mundo, debido a los costes económicos e impacto ambiental.

Estos sistemas pueden ser de dos tipos: Sistemas de direccionamiento individual de deslizamientos a escala de ladera denominados como locales (Lo-LEWS) y sistemas que operan en áreas amplias a escala regional

como sistemas territoriales (Te-LEWS), es decir, pueden ser empleados en una cuenca, un municipio, una región o una nación (Piciullo *et al.*2018 en Pecoraro, 2018). En ambos casos, el modelamiento de deslizamientos es la base del sistema, seguido de modelos de alerta donde se incluyen procedimientos de decisión junto con definición de niveles de alerta. Por último, se conforma el sistema de alerta temprana a partir de la conjugación de los componentes anteriores que incluyen a la población, medios de difusión, comunicación y educación (Figura 11).

Figura 11. Fases de sistema de alerta temprana de deslizamientos SATD (LEWS por sus siglas en inglés)

Fuente: elaboración propia a partir de Pecoraro, 2018.

Pecoraro (2018) sugiere que los SATD se pueden clasificar en tres categorías principales:

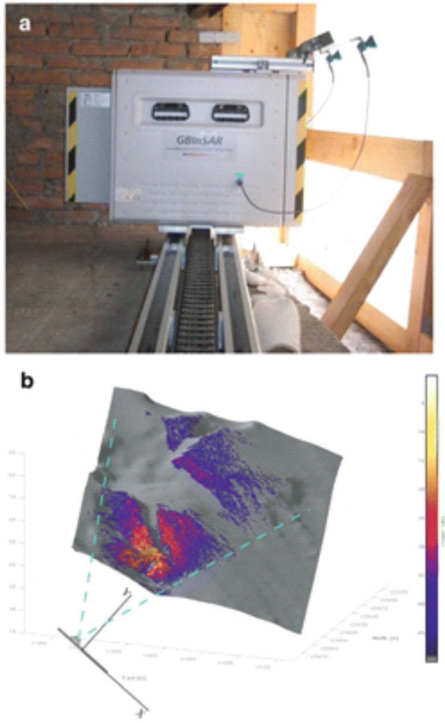
1. Sistemas de alarma: detectan parámetros de proceso (p. ej., emisiones acústicas) de deslizamientos de tierra en curso, por lo tanto, el tiempo de entrega suele ser corto, en el orden de segundos o minutos sistemas de advertencia y sistemas de pronóstico.
2. Sistemas de advertencia y previsión: supervisan los parámetros de activación (p. ej., lluvia) antes de la ocurrencia de los deslizamientos de tierra, lo que garantiza una mayor duración tiempo de entrega; lo habitual corresponde a más de 1 hora para sistemas de advertencia y más de 1 día para sistemas de pronóstico.

SATD Italia

Italia ha avanzado en la implementación de sistemas de SATD a partir de la aplicación de técnicas innovadoras de observación remota. Por ejemplo, con la Interferometría de Radar de Apertura Sintética InSAR se obtienen desplazamientos del terreno en ciertos periodos de tiempo, a partir del dato de distancia recorrida entre el sensor y el objeto (fase) esto es posible debido a que el satélite emite ecos hacia la superficie terrestre los cuales son devueltos al sensor. Este tipo de sistemas de alerta temprana se basan en equipos especializados que usan el mismo principio de los SAR, pero a escala local, son sistemas de vanguardia que permiten obtener altos niveles de precisión, pero se requiere de personal, instituciones especializadas y una inversión monetaria considerable.

Un ejemplo de una aplicación es el uso de instrumentos de interferometría de radar de tierra (*Ground-based radar interferometry GB-InSAR*), el cual consiste en un equipo que usa los mismos principios del SAR, pero no se usan imágenes satelitales, sino que estas provienen de un equipo instalado frente a la ladera a monitorear (Figura 12), en este caso se obtienen imágenes de una pendiente especifica con intervalos de desplazamiento de 10 minutos (Casagli, *et al.* 2010).

Figura 12. a) Instrumento de monitoreo GB-InSAR utilizado en el volcán Stromboli. b) Esquema de adquisición (GB-InSAR), ejemplo de proyección de imagen SAR en un modelo digital de elevación del volcán



Fuente: Casagli *et al.* 2010.

Casagli *et al.* (2010) implementaron este modelo en el monitoreo de una pendiente empinada y activa del volcán Stromboli y un deslizamiento de Ruinon (Valfurva, Italia), actividades dirigidas a la alerta temprana; encontrándose que durante 6 años, la técnica GB-InSAR ha revelado fiabilidad y robustez en un caso operacional real (Casagli *et al.,* 2010).

En el volcán Stromboli, el GB-InSAR se instaló a una altitud de 400 m s. n. m. en una zona estable del flanco norte a una distancia promedio del área objetivo de 600 m, y fue orientado en dirección NE (hacia el cráter). Este sistema requiere 12 minutos para completar una adquisición de imagen SAR. La resolución espacial de las imágenes resultantes es más precisa que la del satélite, con un tamaño de resolución de celda promedio de 2 × 2 m (Casagli *et al.,* 2010).

A partir del análisis interferométrico de las secuencias de imágenes consecutivas, es posible derivar todo el campo de deformación del área observada (900 × 900 m,), con precisión milimétrica en la medición de desplazamiento. Los datos recopilados se utilizan con fines de alerta temprana, ya que proporcionan información sobre un área amplia, con alta precisión y con una frecuencia temporal muy alta (12 min) (Casagli *et al.,* 2010).

La capacidad de la instrumentación GB-InSAR de reproducir el campo de movimiento del terreno en un tiempo casi real y en una escala detallada, permite el monitoreo continuo de la evolución de deformación del flanco del volcán y, en consecuencia, el uso del sistema de alerta temprana (Casagli *et al.,* 2018). En el caso del deslizamiento de Ruiron se hicieron correlaciones de los valores de desplazamiento con datos de lluvia diaria y acumulada, de esta manera se puede identificar con precisión la cantidad de lluvia presente en valores altos de desplazamientos.

SATD Costa Rica

Este tipo de sistemas fue usado por Costa Rica para el estudio de caso de una comunidad tica llamada Jucó de Orosí, donde puede apreciarse la aplicación de la tecnología ante la innovación de sistemas que permitan un monitoreo de las laderas. El sistema de alarma para el caso de estudio consiste en:

- Construcción de una red de sensores integrados en un sistema de monitoreo permanente de las variables críticas que intervienen en los deslizamientos. El sistema propuesto consiste en una red inalámbrica de sensores WSN (Wireless Sensor Network). Con nodos sensores en los sitios que se han seleccionado de forma previa, y un nodo sumidero que recolecta la información de cada nodo sensor. Cada uno puede manejar hasta 4 sensores diferentes; se componen de una unidad de procesamiento, una unidad de radio (transceptor o radio de doble vía), una unidad de manejo energético eficiente (de larga duración y bajo consumo) y una unidad de almacenamiento de datos. De forma habitual, el nodo sumidero tiene menos

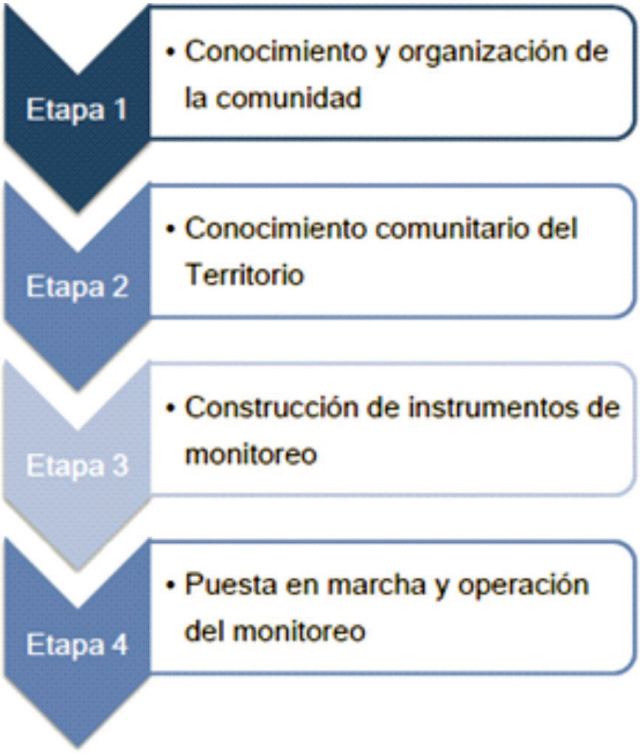
restricciones energéticas porque puede localizarse en un sitio de fácil acceso a fuentes de alimentación tradicionales o contener unidades de recarga por medio de generadores fotovoltaicos o eólicos (Chaves, 2010: 13-15).

Los datos de los sensores son enviados a un computador y en función de los parámetros del modelo de pendiente infinita se generan las alarmas. El computador maneja una sirena y dispositivos visuales; éste puede programar una aplicación para enviar mensajes SMS a teléfonos celulares. De esta manera se puede avisar a los integrantes de los Comités Comunales de Emergencia y a otras personas e instituciones clave para la preparación y respuesta a emergencias (Chaves, 2010: 13-15).

SATD Colombia

En Colombia se presenta un caso particular de sistema de alerta temprana de bajo costo y efectivo en la medida que la población es su eje fundamental. Se desarrolló un SATD enfocado a la participación comunitaria, esto indica que la población hace parte de todas las etapas del sistema, esto es en el monitoreo de deslizamientos, preparación de equipos de monitoreo y su puesta en marcha (Figura 13).

Figura 13. Etapas del SATD Colombia

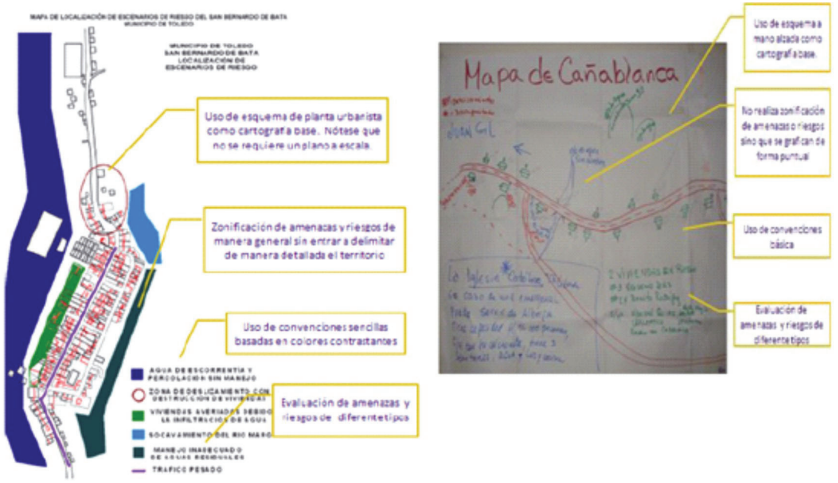


Fuente: UNGRD, 2013.

Cabe resaltar que la metodología planteada por La Unidad Nacional Para la Gestión del Riesgo de Desastres UNGRD (2013) indica que si bien es un proceso que la comunidad puede realizar es necesario contar con la asesoría de profesionales de geociencias y sociales quienes apoyen y den soporte a los procesos para obtener un sistema fiable. El sistema consiste en la organización de un comité coordinador con líderes sociales y grupos de trabajo con personal voluntario que llevarán a cabo el desarrollo de las etapas de acuerdo con sus habilidades.

Por último, se lleva a cabo la etapa de conocimiento del riesgo, aquí la comunidad identificará en campo y mediante elementos, como mapas mentales, las zonas con posibilidad de ocurrencia de deslizamientos o aquellas donde hayan tenido lugar, a partir del conocimiento que tengan su barrio, pueblo, vereda, etcétera, acompañados de un profesional. El producto final es la elaboración de un mapa de riesgo (Figura 14) como apoyo a la selección de los espacios donde serán ubicados los equipos de monitoreo, así como la definición del tipo de instrumento que se debe desarrollar (Cuadro 1).

Figura 14. Ejemplo de construcción de mapa de riesgo. a. Mapa del riesgo de un centro poblado. b. Mapa de riesgo comunitario de una vereda



Fuente: UNGRD, 2013.

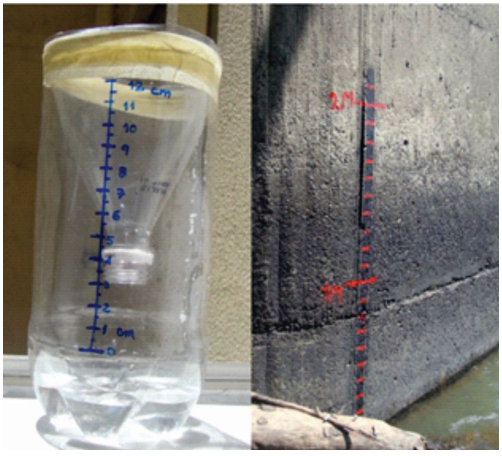
Una vez la comunidad se encuentre organizada y se cuenten con los diagnósticos del territorio se procede a la construcción de equipos de monitoreo, los cuales estarán elaborados con materiales de bajo costo como botellas plásticas, listones de madera, trozos de vidrio, entre otros (Figura 15). Se designa un grupo a la construcción de estos instrumentos ya que son artesanales y otro grupo a su seguimiento, esta última diligencia formatos con datos de desplazamientos en cada visita para la revisión del instrumento; la frecuencia de las visitas dependerá del tipo de movimiento y factor a documentar.

Cuadro 1
Tipos de instrumentos a usar según aspecto a monitorear

Aspecto o proceso a monitorear	Instrumento de bajo costo
Condiciones climáticas.	Pluviómetro. Limnímetro.
Condiciones estructurales.	Testigos en vidrio. fisurómetro.
Desplazamiento relativo en deslizamiento y reptación.	Regleta deslizante o extensómetro. Topografía artesanal por triangulación. Topografía artesanal con estaca y manguera.
Volumen y velocidad de rocas.	Malla de control de caídas.

Fuente: UNGRD, 2013.

Figura 15. Ejemplos de instrumentos de monitoreo artesanal, izquierda Pluviómetro realizado por la comunidad, derecha Limnimetro construido sobre el pilar de un puente



Fuente: UNGRD, 2013.

Por último, se pone en marcha el sistema, esta metodología plantea que las entidades gubernamentales den apoyo a estos procesos mediante recursos y personal calificado que guíe el desarrollo e implementación del SATD.

Conclusión

Como se observó dentro del presente trabajo, resulta importante establecer medidas de prevención y control para reducir los niveles de amenaza y riesgo de deslizamientos, con la finalidad de proponer políticas públicas y concientizar a las localidades afectadas, que permitan mitigar y reducir el riesgo ante desastres.

Bibliografía

Casagli, N., Catani, F., Del Ventisette, C., Luzi, G., 2010. "Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry". *Landslides* 7(3):291-301. https://doi.org/10.1007/s10346-010-0215-y

CENAPRED Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2019. *Sistemas de alerta temprana. Ciudad de México, México.* Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/449072/9._Sistema_de_Alerta_Temprana.pdf

Chaves, J., Hernández, N. and Hernández, M., 2010. *Sistema de monitoreo y alerta ante deslizamientos y deslaves en la comunidad de Jucó de Orosi.* Instituto Tecnológico de Costa Rica, pp.7-67. Disponible en: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/4059/monitoreo_deslizamientos_orosi.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Consultado el 2 de septiembre de 2019.

Dunnicliff J., 1993. *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, John Wiley & Sons, Inc. New York.

Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR), 2009. *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres*. Ginebra, Suiza. Disponible en: https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf

González de Vallejo, L., Ortuño, L. and Ferrer, M., 2002. "Taludes". En: L. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño and C. Oteo, ed., *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación, p.480.

Gutiérrez Elorza, M., 2008. "Laderas y movimientos de masas". In: M. Gutiérrez Elorza, ed., *Geomorfología*. Madrid: Pearson Educación, p.270.

Keller, E. y Blodgett, R., 2004. "Movimientos en masa". En: E. Keller and R. Blodgett, ed., *Riesgos Naturales.* Madrid: Pearson Educación, p.173.

Pecoraro, G., Calvello., y Ciciullo, L., 2018. "Monitoring strategies for local landslide early warning systems". *Landslides* 16(2): 213-231. https://doi.org/10.1007/s10346-018-1068-z

Mendoza, M., Domínguez, L., Noriega, I. and Guevara, E., 2002. *Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento*. 1st ed. [ebook] ciudad de México: CENAPRED, pp.25-36.

Real Academia Española, 2019a. *Diccionario de la lengua española*. Disponible en: https://dle.rae.es/?id=1TaFtWA

Real Academia Española, 2019b. *Diccionario de la lengua española*. Disponible en: https://dle.rae.es/?id=1iWEmUk

Suárez, J., 2009. Instrumentación y monitoreo. In: J. Suárez, ed., *Deslizamientos. Análisis Geotécnico, 1st ed. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander*, pp.497-526. Disponible en: http://file:///E:/MonitoreoLaderasEvaluacionAlertamiento_CENAPRED_Mexico2002.pdf. Consultado el 1° de septiembre de 2019.

Unidad Nacional Para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), 2013. *Cartilla de implementación sistema de monitoreo comunitario de movimientos en masa.* Bogotá D.C, Colombia. p.59. Disponible en: https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/27240/Monito_comun_mov_en_masa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

2.6. Métodos y técnicas tradicionales en campo para el monitoreo de la erosión hídrica

Miguel Ángel Balderas Plata
Luis Miguel Espinosa Rodríguez
Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo

Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

Los procesos de degradación de suelos son dinámicos, crecientes. Han sido ya por mucho tiempo de preocupación mundial, sobre todo por conducir a la población a la pobreza. Por tanto, se ha convertido en uno de los retos para la gestión sostenible en el corto y mediano plazo.

México no escapa a esta realidad, es por ello que ha establecido una serie de compromisos al formar parte desde 1996 de las convenciones internacionales de las Naciones Unidas relacionadas con el Cambio Climático (UNCMCC), la Lucha contra la Desertificación y la Sequía (UNCCD) y la Diversidad Biológica (CDB). Todas estas establecen y promueven las medidas adecuadas para la conservación de los recursos naturales, la utilización sostenible de los mismos y mitigar los efectos adversos en beneficio de las generaciones presentes y futuras (CONAFOR-UACh. 2013).

Al llevar a cabo el proceso de revisión de una gran cantidad de estudios sobre degradación de suelos por erosión, como los de Morgan (1980), Miller (1994), Loftaf (1995), Oldeman y Hakkeling (1990), Diagnóstico Ambiental del Estado de México del 2000, FAO (2001), SEMARNAT-CP (2001-2002); FAO (2008), OEI (2008), CONAFOR-UACh. (2013), entre otros, fue posible reconocer que a nivel país la información acerca del tema puede resultar escaza, mostrando además una falta de rigor científico y normativo al presentar cada uno de ellos diferentes niveles de información, coberturas territoriales, terminología y sobre todo metodologías de evaluación. Este tipo de discrepancias impiden el análisis y diagnóstico adecuado sobre la evolución acerca de la

degradación o su seguimiento. Esto es un claro indicador de la necesidad de unificar los procedimientos, metodologías, normatividad y conceptos para un diagnóstico, confiable y actualizado, del grado de degradación de los suelos en el país, que permitan tomar las acciones pertinentes para la mitigación de los procesos que la generan, o su remediación, y conduzcan al mantenimiento del equilibrio ambiental y sostenibilidad económica y social.

Este documento tiene como propósito reconocer, de inicio, las técnicas o métodos tradicionales para el monitoreo del proceso por erosión hídrica directamente en campo, siendo para México el tipo de erosión dominante por las características fisiográficas que prevalecen, en su gran mayoría el de contener terrenos escarpados, con fuertes pendientes en laderas de grandes cadenas montañosas.

Una visión global sobre la degradación y erosión del suelo

La Comisión Nacional Forestal, en cumplimiento de los compromisos adquiridos a nivel nacional e internacional en materia de Lucha contra la Desertificación, tanto con el Programa de Acción para el Combatir la Desertificación en México, como con el Sistema Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales (SINADES) y con la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), ha realizado el primer estudio nacional que integra los indicadores de la degradación de las tierras y la desertificación, conforme a los estándares nacionales e internacionales legalmente aceptados

Los procesos de degradación del suelo son muy variados, pueden ser resultado de procesos naturales y antropogénicos los cuales actúan como catalizadores. Los más importantes son la erosión por el viento y por el agua, el deterioro químico y el deterioro físico. La erosión hídrica transforma muy lentamente, pero en forma continua, la corteza terrestre; la rapidez con la que se presenta este fenómeno depende de las características geológicas, edafológicas, hidrológicas y climáticas de cada región. Al mismo tiempo, el hombre contribuye al proceso, cambiando las condiciones naturales del territorio sin tomar en cuenta la importancia de los recursos naturales dentro de los ecosistemas. Debido a que resulta difícil y costoso recuperarlo, más aún, mejorar sus propiedades después de haberlas alterado, se debe considerar al suelo como un recurso natural no renovable.

Los fenómenos erosivos constituyen una tarea fundamental del quehacer edáfico, ya que el producto es la representación del fenómeno sobre mapas, los cuales contienen información de hidrología, edafología, relieve, vegetación y uso de suelo lo que proporciona una mayor perspectiva de la situación del problema para lograr abordarlo de manera integral.

Este problema, a escala global, ha despertado interés de varias organizaciones en desarrollar programas que evalúen de alguna manera la

degradación del suelo provocada por el hombre, llevándola a escalas y niveles más detallado particularmente en un ámbito nacional o regional en México.

Al estudiar el comportamiento de la erosión hídrica resulta fundamental, para así lograr implementar las técnicas más apropiadas y enfocadas a la corrección del proceso una vez detectado; pero antes de entrar en detalle se deben conocer algunos conceptos sobre el objeto de estudio que es el suelo, tierra y degradación:

- Suelo: es un cuerpo natural que comprende a sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en la superficie de las tierras, que ocupa un espacio y que se caracteriza por uno o ambos: horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o por la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural (Soil Survey Staff, 1999).

La degradación del suelo se define como un cambio en la salud del suelo resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios. Los suelos degradados contienen un estado de salud que no pueden proporcionar los bienes y servicios normales del suelo en cuestión en su ecosistema (FAO 2019). Esta degradación se refiere a los procesos inducidos por las actividades humanas que disminuyen su productividad biológica, así como su capacidad actual y/o futura para sostener la vida humana (SEMARNAT, 2012).

La degradación química y física ocasiona el deterioro interno del suelo. La primera conduce a la disminución o eliminación de su productividad biológica, mientras que la física modifica su estructura, lo que se manifiesta, por ejemplo, en la pérdida o disminución de su capacidad para absorber o almacenar agua (SEMARNAT, 2012).

Las definiciones, las cuales siguen en gran medida la enunciación de LADA de degradación de tierras, éstas son importantes para capturar la complejidad de los procesos de degradación y su evaluación subjetiva de los diferentes actores en el suelo y la tierra (FAO, 2019).

Por su parte, la degradación de la tierra abarca un alcance más amplio que la erosión y degradación de suelos en conjunto, ya que cubre todos los cambios negativos en la capacidad del ecosistema para prestar bienes y servicios (incluso biológicos o servicios y bienes relacionados con el agua –en visión de LADA– y también su relación con bienes y servicios sociales y económicos) (FAO, 2019).

La erosión del suelo es un término común que a menudo se confunde con la degradación del suelo, ya que realmente se refiere a las pérdidas absolutas de suelo de la capa superficial y nutrientes, que es, de hecho, el efecto más visible, pero no cubre totalmente todos sus aspectos. La erosión del suelo se refiere a un proceso natural en zonas montañosas, pero con frecuencia se empeora mediante las malas prácticas de manejo (FAO 2019).

Los asentamientos humanos, la explotación de zonas agrícolas, el sobrepastoreo en zonas ganaderas, la explotación forestal da como resultado procesos erosivos en el suelo, constituyendo uno de los problemas ambientales más relevantes que están afectando a la mayoría de los países de América Latina. Como resultado, se han desarrollado una gran cantidad de estudios enfocados a estimar la pérdida del suelo, así como las causas que la originan.

La erosión del suelo es un fenómeno natural que ha sucedido durante milenios como parte de los procesos geológicos y cambios climáticos; sin embargo, desde mediados del siglo pasado se le considera mucho más grave. Este proceso de degradación, con magnitud mediano a grave, afecta en el mundo a casi 2000 millones de hectáreas de tierra arable y pastoreo, superficie mayor que conjuntamente representan Estados Unidos y México (Loftaf, 1995). La cantidad estimada de suelo superficial arrastrado por agua y viento hasta ríos, lagos o mares cada año, podría llenar un tren de carga lo bastante largo como para dar la vuelta al planeta 150 veces (Miller, 1994). Los principales factores erosivos han sido el agua y el viento, más del 55% de este deterioro se debe a la erosión hídrica y un 33% a la erosión eólica (Loftaf, 1995).

El proceso de la erosión hídrica, por lo general, ha sido evaluado de forma cuantitativa determinando las cantidades de suelo perdido, pero sin considerar a los materiales que lo componen. Este tipo de erosión de los suelos es uno de los principales problemas de degradación que se tienen en la actualidad, proceso acelerado por diferentes acciones humanas, provocando que las zonas con suelos fértiles sean cada vez menores en la superficie terrestre.

En el caso de México, por iniciativa del Gobierno Federal, se ha tratado de conocer la problemática de sus suelos. Se consideraba que para el año 2000, posiblemente haya sido el único país, al menos dentro de los llamados en vías de desarrollo, que había realizado una evaluación a escala 1:1,000,000 bajo la responsabilidad de la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2000).

La SEMARNAT (1999) estimó que el principal proceso de degradación en el territorio nacional era la erosión hídrica, que ocasionaba la pérdida de la capa superficial (495,668.85 km^2), seguida por la deformación del terreno -cárcavas- (227,760.40 km^2) y por último la sedimentación (1,222.19 km) (Cuadro 1).

La erosión hídrica en México ha provocado la pérdida de un total de 365 millones ton/año de suelo productivo, de los cuales 113 millones t se quedan en los cuerpos de agua y 252 millones t descargan al mar; así entonces, la erosión del suelo representa un alto costo para la riqueza del país y su control se vuelve un gran reto a resolver (Porta y Acevedo 2008).

Es importante destacar que debido a las condiciones geográficas del país (latitud, altitud, y continentalidad), los suelos resultan más susceptibles a procesos erosivos. Del relieve accidentado presente en múltiples serranías, 60% presenta pendientes de más de 10 grados y el 28% superior a los 25

grados. Además de precipitación pluvial de distribución irregular en tiempo y espacio, aunado a un elevado porcentaje de aridez y actividades humanas mal orientadas. En su conjunto han propiciado que el relieve mexicano sea uno de los más afectados del mundo por la erosión (Velázquez y Orozco, 1989; Mass y García, 1990).

De los estudios desarrollados en el 2002, que evalúan el proceso de degradación por erosión hídrica en la República Mexicana, está el realizado por UACH-SEMARNAT (2002), con su representación a escala 1: 1 000 000. En esta se evaluó a través de los principios de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS), el cual consistió en términos generales en trabajo cartográfico que incluyó reconocimiento en campo y apoyo de datos cuantitativos. El resultado confirmo que el 42% del territorio nacional se encuentra afectado en algún nivel de significancia por la erosión hídrica.

Cuadro 1
Superficie afectada por tipos de degradación

Tipos de degradación	Subtipo de degradación	Superficie afectada km^2
Erosión hídrica		724,651.44
	Pérdida de la capa superficial	495,668.85
	Deformación del terreno	227,760.40
	Sedimentaciones	1,222.19
Erosión eólica		291,711.40
	Pérdida de la capa superficial	285,856.25
	Deforestación del terreno	5,855.15
Degradación química		132,549.50
	Pérdida de nutrientes	31,171.98
	Gleyzación	12,989.26
	Salinidad	62,421.15
	Contaminación	25,967.18
Degradación física		34,877.66
	Urbanización	7,469.16
	Acidificación	10,789.66
	Compostaje	5,473.20
	Inundaciones	11,145.69
Degradación biológica		70,817.45
	Total	1,254,607.45

Fuente: elaboración propia.
Nota: la superficie total afectada representa el 64% de la superficie continental del país, estimado en 1, 959,254 km2.
Fuente: SEMARNAP (1999).

En la evaluación más reciente desarrollada por la CONAFOR-UACh (2013) en su Indicador de Recursos Edáficos consideró la fragilidad de los suelos de acuerdo con su espesor y la pérdida del suelo por: 1) erosión hídrica, 2) erosión eólica, además de 3) degradación física expresada principalmente por la compactación y 4) la degradación química expresada fundamentalmente por la declinación de la fertilidad. Los resultados muestran que la degradación de los suelos nacionales está presente en 111.472 millones de hectáreas, o bien, el 63.02% del total nacional. La categoría de degradación ligera representa el 24.21% (47.433 millones de hectáreas), la moderada el 27.2% (53.291 millones de hectáreas), la severa el 10.01% (19.612 millones de hectáreas) y la degradación extrema el 1.59% (3.115 millones de hectáreas).

Determinación de la erosión hídrica del suelo

Las técnicas y métodos actualmente empleadas para realizar la cuantificación de suelos que año tras año se pierden por la erosión hídrica son múltiples, además pueden realizarse directamente en campo entre las más usuales tenemos:

a) Método de clavos y rondanas.
b)Ecuación de pérdida del suelo.
c) Lotes de Escurrimiento.
d) Modelos hídricos.
e) Captura de sedimentos.
f) Métodos Cartográficos.
g) Otros.

El conocimiento de la tasa de erosión en un sitio es fundamental para decidir el manejo y las medidas de conservación de suelo más adecuadas. Por ello, es importante obtener datos confiables acerca del proceso y la velocidad a la que se está perdiendo el suelo.

Los métodos directos para la evaluación de la erosión hídrica suelen proporcionar datos precisos, pero requieren mucho tiempo y son costosos. Los métodos indirectos para evaluar la tasa de erosión son relativamente fáciles de aplicar, pero su precisión no ha sido ampliamente probada para los diferentes usos de suelo.

Como el proceso erosivo puede ser considerado complejo, al intervenir múltiples factores y mecanismos, es difícil pensar que un solo método de medida es capaz de proporcionar resultados globales exactos. Se puede establecer con base en la literatura revisada que existen muchos métodos para cuantificar la erosión del suelo con propósitos, objetivos, metodologías y con la generación de resultados con diversa fiabilidad, por lo que en este trabajo se tratará de proporcionar la información básica suficiente para establecer algunos criterios que sirvan al lector para decidir sobre el uso de algún método con base en sus necesidades de estudio de caso.

En términos generales se pueden agrupar los métodos de evaluación hídrica en: de campo, de laboratorio y de gabinete. En este documento nos concentraremos en presentar una visión global de los métodos más conocidos para determinar la erosión hídrica en campo, mostrando en términos generales el principio en el que se basan y algunas consideraciones que consideramos importantes para el lector en caso de que llegar a decidir hacer uso de estos.

Métodos de Evaluación de la erosión hídrica en Campo

Estos en realidad consisten en identificar signos de la presencia de la erosión en el ambiente:

- Parcelas con signos de erosión laminar: es el tipo de erosión más difícil de determinar y por tanto para muchos, imposible de cuantificar.
- Parcelas con signos de erosión en surcos: se puede valorar la densidad de los surcos, extendiendo una cinta métrica y midiendo la cantidad de centímetros ocupados por los surcos frente al total de centímetros de la cinta métrica. De esta manera se establece el porcentaje de la superficie del terreno con erosión por surcos (le), le = (centímetros ocupados por los surcos / Longitud total en cm de la cita) * 100
- Perfiles decapitados: este consiste en llevar a cabo la reconstrucción de un perfil del suelo o tomar un sitio de referencia de la zona sin afectación y comparándolo con el sitio que se presume erosinado, de esta manera se puede estimar la cantidad de suelo erosionado. Se debe de considerar, con base en la reconstrucción, la profundidad de la capa perdida o erosionada, la densidad aparente del suelo, así como la superficie afectada para hacer la estimación de la cantidad o volumen erosionado.

A nivel microscópico, observar rasgos pedogenéticos en el horizonte superficial en contacto con la atmosfera, propios de horizontes subsuperficiales, identificados a través del microscopio petrográfico: iluviación de arcillas, iluviación de humus, concreciones, sesquióxidos, etc.

A nivel paisaje, observar el suelo de la superficie de un terreno desde una zona alta. Un suelo no erosionado presentara un color homogéneo, característico del horizonte superficial; pero cuando el terreno presenta rasgos de procesos erosivos, mostrara cambios de coloración en algunas partes de su superficie, esto será el resultado de que el horizonte superficial se ha perdido y el color o la variación de color que se muestra se debe a los colores propios del horizonte subsuperficial, en algunos caso pueden ser tonos más claros que el horizonte superficial, colores rojos o pardo amarillos. Cuando los materiales de los horizontes subsuperficiales están expuestos a la atmosfera y se localizan en zonas más elevadas, los materiales de este pueden ser desplazados hacia partes más bajas depositándose sobre los suelos primitivos enterrándolos.Así entonces la coloración de los suelos superficiales puede cambiar por los procesos de decapitación o enterramiento siendo indicativos del proceso de erosión:

- Los registros pasados de las descripciones de los suelos, sobre todo de los horizontes superficiales pueden tomar gran relevancia, sobre todo si el proceso erosivo ha sido tan intenso que ha provocado la eliminación completa del suelo. En este caso se puede observar una coloración nuevamente homogénea de la capa superficial en contacto con la atmosfera, pero corresponderá al color del material parental u original.
- Control del nivel de superficie: otra forma de demostrar el proceso erosivo en campo es comprender que en el proceso se arrastran partículas de la superficie, lo que se evidenciara con la disminución de la superficie del suelo, aquí la observación y reconocimiento utilizando cierto tipo de referencias naturales serán el mejor indicador del proceso de degradación que se está llevando a cabo.
- Árboles, arbustos y magueyes: la presencia de las raíces en la superficie y a la periferia del tronco o del follaje de la planta. Las áreas protegidas por el follaje y sobre todo las cercanas a la base del tronco o tallo serán superficies protegidas y menos erosionadas, llegando a conservar la mayor cantidad de suelo, formando el denominado pedestal. No es extraño observar que el pedestal solo está presente en árboles o plantas viejas.

Los árboles, arbustos o magueyes también pueden actuar como barreras físicas –muro- reteniendo el material que es arrastrado de una zona más alta hacia una baja, generando un micro relieve escalonado.

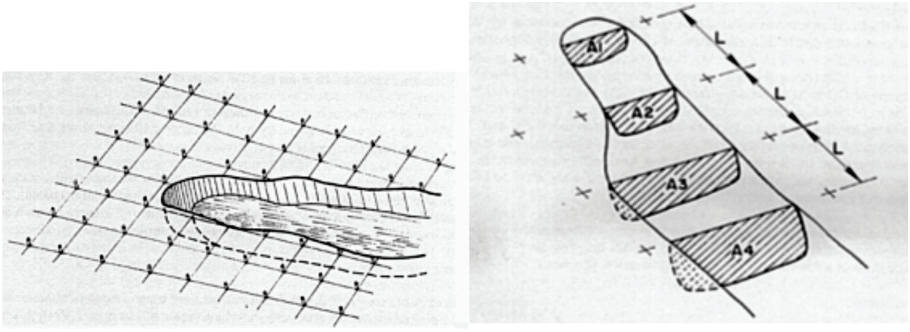
Otros métodos que permite monitorear la pérdida de suelo en campo son a través de referencias artificiales, la ventaja de estos procedimientos que se puede saber con precisión el momento de su colocación, elegir el sitio y su distribución. Entre ellos se tiene el método de la varilla o su equivalente de clavos y rondanas, la varilla o el clavo con la rondana alcanzan una longitud de hasta 30 cm de largo, estos se entierran una determinad longitud, dejando al descubierto una pequeña parte, en el caso del uso de la rondana esta descansara sobre la superficie del suelo, apenas tocando en su otra cara la cabeza del clavo. Así entonces cada determinado tiempo se mide la parte del clavo o la varilla que va siendo descubierta como resultado de la perdida de partículas del suelo (CP, 1991). Si se estima con antelación la densidad aparente del suelo, además de calcular la profundidad del suelo perdido, también sería posible determinar el volumen en toneladas por unidad de superficie (CP, 1991; Pando *et al.*, 2003).

• Monitoreo de la escorrentía: este procedimiento consiste determinar el desplazamiento después de una lluvia o tormenta de las partículas de distintos tamaños que han sido marcadas previamente. El marcaje puede hacerse con el coloreo de las partículas o radiándolas. En el caso de las partículas que han sido pintadas solo es posible observar su desplazamiento sobre la superficie del suelo. Pero para las partículas que fueron sometidas a una solución radiactiva. Con la medición de la radiación y su distribución es posible determinar su movimiento lateral, así como al interior del suelo. Un radio marcador potencialmente utilizable es el cesio -137 (Walling y Quine, 1990).

•Mediciones volumétricas de surcos y/o cárcavas: para ello es necesario establecer sobre el terreno donde se localiza el surco o cárcava una red o malla de puntos equidistantes con estacas para señalar los puntos de interacción y de pendiente (Figura 1). Así se determina la profundidad de la punta A y B y la distancia entre ellos, determinando el volumen de esa sección, de cada sección que cae el surco o cárcava se debería calcular su volumen y al final sumar el volumen de todas las secciones (Alutin, 1937). Evans y Boardman (1994) después de diversas estimaciones sugirieron que puede ocurrir que las estimaciones efectuadas por medio de mediciones de los surcos estén en un rango comprendido entre el doble y la mitad del valor real. En términos generales se ha llegado a la conclusión evidente de que las cifras expresadas en t/ha, resultantes de estos métodos, no se deben considerar mediciones exactas, pero pueden ser útiles para efectuar una rápida comparación sencilla del efecto de diversas prácticas agrícolas (FAO, 1997) (Figura 1). Como se presenta en la siguiente formula:

$$W= \Sigma ((A1+A2) /2 *L) + ((A2+A3) /2 *L) + \ldots.$$

Figura 1. Cálculo de las secciones transversales en una cárcava

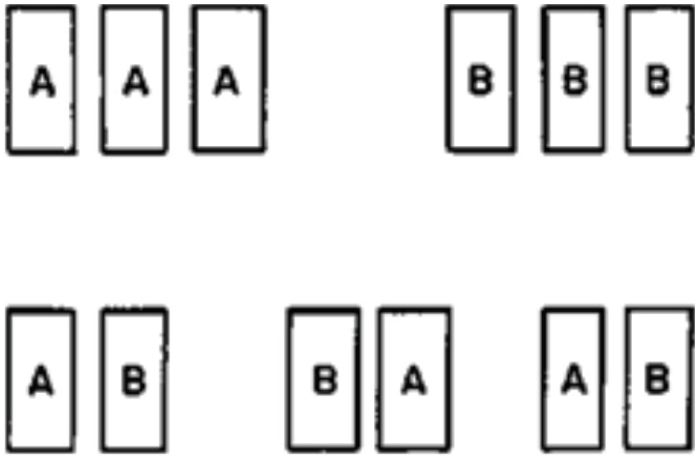


Fuente: Morgan, 1984.

•Parcelas de erosión: Este es un procedimiento que se considera proporciona resultados más reales determinados directamente en campo. Sin embargo, Las parcelas para los estudios de escorrentía son caras, suelen ser ineficaces y la inmensa mayoría de las que se han implantado en todo el mundo han aportado una información escasa o poco válida. Este juicio puede parecer duro, pero es la opinión ponderada de los que han dedicado una vida al trabajo con estas, o estudiando los trabajos de otras personas, cometiendo errores y observando los cometidos por otros (FAO, 1997). Se ha denominado de esta manera debido a que se delimitan pequeñas parcelas cercadas por obras de mampostería con ladrillos o concreto, o laminas metálicas que contienen en la parte más baja de la pendiente un depósito colector. De acuerdo con los criterios establecidos

por la USDA (1991) (Servicio de Conservación de Estados Unidos), las parcelas estándar utilizadas en la determinación tienen una dimensión de 22 m de largo por 1.8 m de ancho y una inclinación promedio de 9%. El tamaño de los depósitos colectores ha ido variando durante las últimas décadas, de capturar el total del material y agua, escurrido y depositado, se ha optimizado para solo recoger de 1/8 a 1/25 del total. Por lo general, los datos obtenidos de la recolección de las parcelas son correlacionados con la cantidad de precipitación determinada por estaciones meteorológicas en el mismo sitio o la más cercana. Para demostrar el efecto que tiene la vegetación sobre la disminución en el proceso erosivo, es común que se coloquen distintos tipos de cultivos, para demostrar la confiabilidad de estas pruebas experimentales se deben realizar varias repeticiones por cada tipo de cultivo (Figura 2).

Figura 2. Disposición de las parcelas experimentales para evitar desviaciones causadas por la variación del suelo



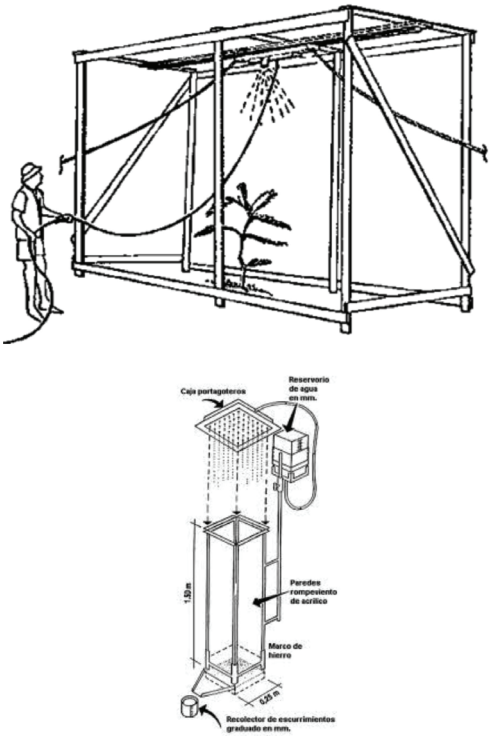
Fuente: FAO, 1997.

Además de calcular la cantidad que es arrastrado y depositado, en algunas parcelas a través de ciertos rasgos observados en la superficie de las parcelas de erosión es posible determinar el tipo de erosión potencial que se genera. Cuando sobre una superficie muy lisa sobresalen grabas y se puede determinar sobre algún indicador indirecto como un clavo o estaca la cantidad que se pierde, uno puede suponer una erosión laminar. En otros casos, se puede llegar a formar surcos de erosión.

•Simuladores de lluvia: son equipos que se diseñan con el propósito de simular la lluvia en un tiempo programado y determinar el impacto que genera el agua, el tamaño de la gota de lluvia simulada y la intensidad con la que se deposita el

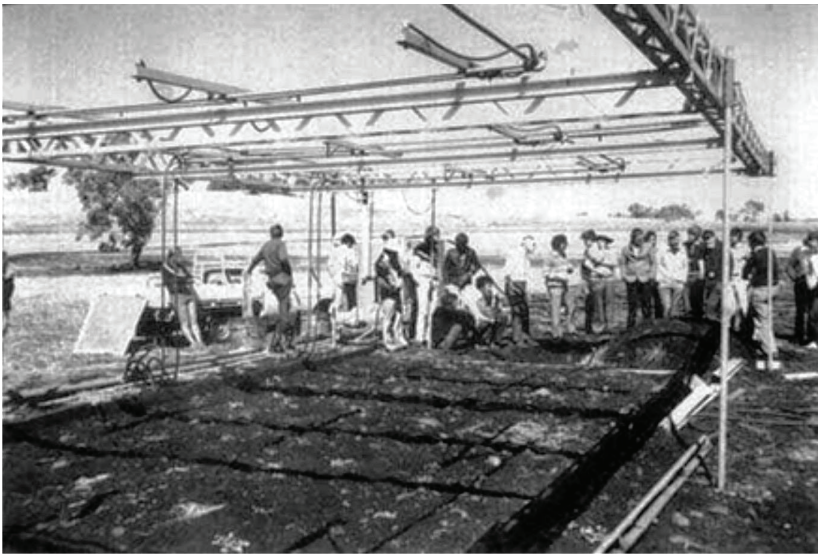
agua sobre la superficie de un suelo, así como recoger en un depósito colector la escorrentía producida y el suelo arrastrado (Figura 3). Una de las desventajas de este tipo de experimentos es que no deja de ser una prueba simulada de lluvia para conocer el potencial efecto del agua al golpear al suelo. Se considera que para que el impacto de las gotas de agua tuviera un efecto parecido al de una lluvia real, estas deberían de caer desde una altura de al menos de 9 m. Sin embargo, el estandarizar el procedimiento aun sin alcanzar la altura recomendada, que se estima es en la cual la gota de lluvia alcanza la trayectoria a la cual la velocidad de caída se estabiliza, el replicar el experimento en diferentes sitios o suelos, el error experimental siempre será el mismo, por lo que el impacto o efecto de las gotas de lluvia simulada serán comparables y confiables (Fotografía 1). Otra de las ventajas es que el hecho de poder montar el equipo en cualquier sitio y momento permite obtener una gran cantidad de datos para su análisis, sin esperar o requerir la temporada de lluvia.

Figura 3. Simuladores de lluvia para monitorear el impacto de las gotas de lluvia artificial y estimar la pérdida de suelo



Fuente: Aoki y Serrano, 2006.

Fotografía 1. Simuladores de lluvia para monitorear el impacto de las gotas de lluvia artificial y estimar la pérdida de suelo en parcelas experimentales



Fuente: FAO, 1997.

Conclusiones

Las técnicas o métodos tradicionales para la estimación de la pérdida del suelo por la erosión hídrica son diversas, con grados de confiabilidad de precisión y exactitud muy variada.

La elección del usuario de alguna de estas técnicas o métodos tradicionales deberá basarse en su disponibilidad de tiempo, del personal, los recursos económicos que posea y, sobre todo, del nivel de confiabilidad que desee obtener en su proceso de determinación de la erosión hídrica.

El investigador puede optar por la aplicación de diversos métodos en diferentes momentos. Esto también dependerá de las circunstancias del momento, ya que algo que no se puede dejar de considerar, en ningún momento, es que, en el caso de algunos métodos, para que se pueda hacer la determinación de la pérdida de suelo por erosión hídrica, se requiere de la presencia del factor principal de perturbación: el agua presente a través de la precipitación pluvial.

También es importante señalar que los métodos presentados solo representan aquellos que son casi en su totalidad determinados a través del trabajo de campo, ya que existen otros métodos que pueden ser determinados en gabinete o laboratorio y que pueden ser verificados posteriormente en campo.

Bibliografía

Aoki, A. M. y R. Sereno, 2006. "Evaluation of infiltration as soil quality indicator by a micro rainfall simulator". Agriscientia XXIII (1): 23-31.

CONAFOR-UACh. 2013. "Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación". *Informe final*. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma de Chapingo, Zapopan Jalisco. Pp. 80.

CONAGUA, 2016. *Convención de Lucha contra la Desertificación (UNCCD). Tratados y acuerdos internacionales celebrados por México.* GOBIERNO DE MEXICO. www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/convencion-de-lucha-contra-la-desertificacion-unccd. [2019].

Colegio de Postgraduados, (1991. *Manual de conservación del suelo y del agua,* UACH, Chapingo, México.

Evans R. y Boardmann J., 1994. Assessment of water erosion in farmers' fields. En: *Proceedings of 1st International European Society for Soil Conversation Congress.* J. Rickson (ed.), Silsoe, Reino Unido, abril de 1992. Catena-Verlag, Crentingen, Alemania.

FAO, 1997. "Métodos de reconocimiento. Capítulo 2. Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía". *Boletín de Suelos de la FAO - 68.* FAO. ROMA, Italia.

FAO, 2001. *Agricultura, tierras y desertificación. Naciones Unidas*. Consejo Económico y Social. ROMA, Italia. 9 pág.

FAO, 2008. *La desertificación y el cambio climático: Un reto mundial. Día Mundial de lucha contra la desertificación y la sequía*. *http://www.un.org/spanish/events/desertification/2008/index.shtml. 2009*

FAO, 2019. *Degradación de suelos. Portal de suelos de la FAO*. FAO. http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/es/. [2019].

Loftaf, T., 1995. *Necesidades y recursos: geografía de la agricultura y la alimentación*. Ed. Food & Agriculture Org. Roma, Italia.127 pág.

Mass, J.M. y F. García O, 1990. *La conservación de suelos en zonas tropicales: el caso de México.* Ciencia y Desarrollo.87 pág.

Miller, T., 1994. *Ecología y medio ambiente*. Grupo Editorial Iberoamericana. DF, México, 230p.

Morgan R, P., 1980 *Erosión de suelos*, Edit.LIMUSA. Méx, D.F.

Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A. y Sombroek, W.G. 1990. *World map of the status of human-induc soil degradation*. 34 págs. ISRIC, Wageningen, Países Bajos y PNUMA, Nairobi, Kenya.34 pág.

OEI, 2008. *FAO-Aumenta la degradación del suelo. Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación la ciencia y la cultura* (OEI). Disponible en: *www.oei.es/noticias/spip.php?article2965*(2009).

Pando M., M., M. Gutiérrez G., A. Maldonado H., J. L. Palacio P. y E. Estrada Castillón. 2003. "Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica". *Investigaciones Geográficas. Boletín del instituto de Geografía.* UNAM. No. 15. Pp. 26-36.

Porta, J. M López-Acevedo, 2008. *Introducción a la Edafología, uso y protección del suelo*. Ed Mundi-Prensa.384págs.

Núñez S., J., 2001. *Manejo y conservación de suelos. EUNED. San José, Costa Rica*. 288 p.

SEMARNAT, 2005. "Informe de la situación del medio ambiente en México compendio de estadísticas ambientales, capitulo 3": *Suelos*, México.

SEMARNAT-CP, 2001-2002. *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana. Escala 1:250 000. Memoria Nacional.* SEMARNAT-CP. México. 68p.

Soil Survey Staff. 1999. "Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys". *2nd edition. Natural Resources Conservation Service*. U.S. Department of Agriculture Handbook. 436.

USDA, 1991. *Predicting Soil Erosion by Water - A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).* Draft Handbook for limited circulation, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Washington DC.

Velázquez y Orozco, A., 1989. *La destrucción de la naturaleza y la ciencia desde México*. FCE, México. D F.190p.

Walling, D.E. and T.A. Quine, 1990. "Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data", *Land Degrad. Rehabilitat*. 2: 161-175.

2.7. Riesgos geotécnicos inducidos en asentamientos humanos

Alexis Ordaz Hernández

Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

José Ramón Hernández Santana

Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

José Emilio Baró Suárez

Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

Las pérdidas materiales y humanas vinculadas a fenómenos geotécnicos es una realidad con la que inevitablemente la sociedad tiene que convivir. La comprensión de algunos sucesos fatídicos en escenarios urbanos, encuentran en no pocas ocasiones, la explicación en las características geotécnicas sobre las cuales se cimientan las viviendas, hospitales, autopistas o las plazas comerciales a las que cotidianamente frecuenta la población.

Para el diseño de una obra civil en particular, o para una urbanización de cualquier tipo, se deben realizar estudios geotécnicos que garanticen su estabilidad en el tiempo. Sin embargo, sistemáticamente se perciben en los medios de difusión noticias que tratan sucesos dramáticos de génesis geotécnica en escenarios urbanos. Por ejemplo, el 6 de septiembre del 2018 se publicó en varios medios la caída de una camioneta en un socavón en ciudad Juárez, Chihuahua (Fotografía 1). En este caso, ocurrió una combinación de factores. El primero: condicionante, es decir, seguramente la presencia de suelos susceptibles a la erosión interna (sifonamiento); el segundo factor sería el desencadenante, que se trató, en este caso particular, de precipitaciones mayores a 30 mm en 24 horas. Esta conjunción

de factores permitió el arrastre subterráneo de partículas de suelo, que conformaba la base de la carretera, fenómeno conocido como sifonamiento o erosión interna, provocando el colapso de la vía.

Fotografía 1. Colapso de una carretera en ciudad Juárez, Chihuahua

Fuente: fotografía tomada de https://www.milenio.com/estados/camioneta-pipa-caen-socavones-cd-juarez. Publicada el 06.09.2018 a las 20:29:17.

El sifonamiento, los cambios volumétricos de las arcillas y la sobre consolidación de los suelos son peligros netamente geotécnicos. Aparte de estos, existen otros peligros, como los terremotos (de génesis tectónica), cuyos fenómenos inducidos dependen principalmente de las condiciones geotécnicas de los materiales geológicos. Este es el caso de la licuefacción, un fenómeno que afecta especialmente a las arenas saturadas, que frente a solicitudes sísmicas comienzan a fluir, con la consecuente pérdida de la capacidad portante y derrumbe de los edificios. Este es el caso de los daños por licuefacción provocados por el sismo del 11 de marzo del 2011, en Japón, con magnitud 9.0 en la escala de Richter, donde se reportaron daños importantes por licuación especialmente en la ciudad de Fukushima.

Una de las imágenes de licuefacción más difundidas para el público general corresponde a los edificios volteados, debido a la pérdida de cohesión entre las partículas de suelos, durante el terremoto de 7.6 grados de magnitud, en Niigata, Japón; o en Kobe, el 17 de enero de 1995, donde un sismo de 7.2 grados de magnitud estremeció la ciudad (Fotografía 2).

Otro problema de génesis geotécnica, que afecta en especial a las urbanizaciones, son los cambios volumétricos que experimentan algunos suelos, especialmente las arcillas. En México se ha identificado la presencia de suelos expansivos en Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Tamaulipas, Morelos, Baja California Norte, Veracruz, Chiapas, Campeche, Sonora y

Sinaloa (Comisión Nacional del Agua, 2007). Los efectos de este fenómeno, en escasas ocasiones ocurren de forma súbita, sus daños se van acumulando, hasta dejar inhabilitado el edificio.

Fotografía 2. Daños por licuefacción del terremoto del 17 de enero de 1995 en la ciudad portuaria de Kobe, Japón

Fuente: fotografía tomada de http://www.lis.ucr.ac.cr/1798.

En general, para la adecuada interpretación de los fenómenos geotécnicos, se debe comprender que el medio físico, y en particular, el urbano, está compuesto por una componente natural y otra artificial u antrópica; donde las componentes naturales los conforman el agua y su dinámica, los suelos o rocas que forman la base de las cimentaciones, la vegetación, la topografía, entre otros aspectos. Mientras que los componentes artificiales del medio físico de una ciudad son aquellos construidos por el hombre, como redes de instalaciones, calles, plazas, edificios, etc. (Schjetnan, Calvillo y Peniche, 2004). De acuerdo con lo anterior, debe existir un conocimiento robusto de los componentes naturales, para que los diseños de los componentes artificiales sean poco vulnerables estructuralmente. En función de lo anterior, se afirma que lo riesgos geotécnicos pueden reducirse.

Vigilancia y predicción de los riesgos geotécnicos

La vigilancia y predicción de los riesgos geotécnicos, principalmente se pueden determinar mediante el conocimiento, casi siempre cartografiable, de los factores condicionantes y desencadenantes que rigen su ocurrencia. Este capítulo aborda los riesgos geotécnicos más recurrentes en México. Antes, se ubicarán los peligros geotécnicos dentro de la clasificación de Procesos geológicos y meteorológicos que pueden causar riesgos. Según Ayala y Olcina (2002), existen siete criterios para la clasificación de los peligros: 1. Génesis y tipología; 2. Vector de daño; 3. Previsibilidad; 4. Radio de acción; 5. Nivel de actividad; 6. Ambiente de localización y 7. Duración. Para el caso específico de los riesgos geotécnicos, se aplica el criterio "Génesis y Tipología"; aplicando este razonamiento, Ayala y Olcina (2002) ubican jerárquicamente a los fenómenos geotécnicos de la siguiente manera: Terrestres Físico Químicos. En la litosfera predominantemente geológicos y geomorfológicos. Inducidos o Naturales (Cuadro 1).

En el Cuadro 1 se ofrece solo un segmento de la clasificación general de los peligros naturales realizada por Ayala y Olcina (2002). En este caso, solo se le agregaron ligeras modificaciones. De aquí se puede arribar a algunas conclusiones fundamentales. Por ejemplo, que existen peligros geotécnicos directamente reconocidos como tal, es el caso del sifonamiento, así como el colapso y la expansividad de los suelos. Pese a ello, existen otros, generalmente reconocidos en la literatura como geomorfológicos, incluso como tectónicos, que su forma de ocurrencia solo puede ser explicada mediante las propiedades físicas o mecánicas de los materiales geológicos que conforman el subsuelo.

Lo anterior se puede ilustrar con el caso de los deslizamientos. Son fenómenos evidentemente geomorfológicos, donde las características geométricas de la ladera o talud objeto de análisis, juegan quizás el rol fundamental. Pero el análisis de estabilidad de una ladera solo se puede completar con el conocimiento preciso de la densidad de los materiales que la componen, su cohesión, saturación, entre otras características netamente geotécnicas. Asimismo, ocurre con la erosión de los suelos, en su caso la geometría de la ladera y la energía de los agentes erosivos son fundamentales. Sin embargo, el tipo de matriz del suelo y la cohesión entre sus partículas, son elementos también a tomar en consideración.

Con una ubicación clara de los peligros geotécnicos, como procesos seguramente generadores de riesgos geológicos, ya se está en condiciones de abundar en algunos peligros de forma detallada. En este trabajo, el foco estará colocado en tres fenómenos geotécnicos identificados como relevantes: compresibilidad, inestabilidad de laderas y la licuefacción (inducido por terremotos).

Cuadro 1
Fragmento de la clasificación general de los peligros naturales

Terrestres	Físico-Químicos	*En la litosfera (predominantemente geológicos y geomorfológicos)*	*Naturales*	A) *Internos* : - Terremotos: · Intraplaca · De borde de placa: convergente, divergente y deslizante · De falla oculta · Volcánicos - Erupciones volcánicas · Hawaianas · Strombolianas · Vulcanianas · Peleanas - Diapiros - Rebrote isostático - Cambio de polaridad - Tempestades magnéticas B) *Externos (geomorfológicos)* : - Movimientos de ladera: Con trayectoria aérea Con trayectoria terrestre (Rodaduras, deslizamientos, flujos secos y húmedos) - Terremotos por deslizamientos o hundimientos kársticos - Dunas vivas - Karst - Expansión por helada C) *Geoquímicos* : - Aguas subterráneas y suelos peligrosos - Radiactividad natural
			Inducidos	- Terremotos por flujo de fluidos, explosiones y embalses - Expansividad - Colapso - Subsidencia (por minería o extracción de fluidos) - Karst inducido - Sifonamiento - Geoquímico: Gases explosivos o nocivos - Asbestos - Suelos contaminados - Erosión del suelo - Regresión de deltas por sedimentación en embalses - Inducidos por sismos: · Movimientos vibratorios en suelos · Movimientos de ladera · Licuefacción

Fuente: modificado de Ayala y Olcina (2002). Nota:(□) indica peligros geotécnicos.

Compresibilidad

Para tener un acercamiento a este fenómeno, se toma como ejemplo a la ciudad de México. Garrido (2006), Díaz-Rodríguez (2016), Romero (2017), entre otros trabajos, que han abordado el problema de la compresibilidad de los suelos de la capital mexicana. En este caso, se debe partir de las características geológicas de los materiales presentes. Según Mooser (1963), la cuenca de México tuvo un comportamiento exorreico hasta hace 700,000 años, cuando una gran actividad volcánica formó una enorme cortina natural (la sierra de Chichinautzin), que cerró la cuenca y obstruyó el drenaje que iba al río Balsas. En estas condiciones, se almacenó agua y dio origen a varios lagos. Los ríos que descendían de las sierras circundantes depositaron en potentes conos de deyección, materiales muy diversos al confluir a dichos lagos. De acuerdo con los apuntes de Díaz-Rodríguez (2006), la parte central de la cuenca se fue llenando con acarreos limo-arenosos, limo-arcillosos y emisiones de cenizas y pómez provenientes de los volcanes del sur. Al pie de las sierras y por el brusco cambio de pendiente de los ríos, se localizan grandes depósitos aluviales de composición muy variable y estratificación cruzada o lenticular, evidencia de una dinámica erosiva debido a periodos de lluvia intensa.

Díaz-Rodríguez (2006), cataloga al subsuelo de la ciudad de México, como materiales de propiedades únicas. El contenido de agua es mayor a 400%, el índice de plasticidad excede 300% y el índice de compresión Cc puede llegar a un valor de 10, cuando en la mayoría de los suelos es menor a 1. Lo anterior, según este autor, ubica a los sedimentos lacustres de la ciudad de México como altamente compresibles, lo que ha dado lugar a importantes problemas de cimentación para la construcción de edificios elevados y de gran peso.

Entonces, ya esclarecidas las características geólogo-geotécnicas de los materiales, se deben aclarar dos de las definiciones estrechamente relacionadas: "Compresibilidad" y "Consolidación".

La compresibilidad es la propiedad que tiene un suelo de reducir su volumen cuando es sometido a un incremento de esfuerzos y se puede analizar parcialmente mediante el proceso de consolidación. Mientras que la consolidación se refiere al proceso de cambio de esfuerzos efectivos que se produce por la disipación de presión de poro, debido a la expulsión del agua contenida en los poros del suelo (Díaz Rodríguez, 2014); la expulsión de agua produce una reducción en el volumen del suelo, y se presenta en función del tiempo. Visto esto, es evidente que gran parte de los suelos ya descritos que conforman la ciudad de México, experimentan compresibilidad, donde la expresión palpable son los asentamientos. Tales son los casos de monumentos emblemáticos como el Palacio de Bellas Artes, la Catedral Metropolitana y la Basílica de la Virgen de Guadalupe. Teóricamente, el asentamiento es dividido en tres atapas: 1. asentamiento elástico o inicial; 2. asentamiento por consolidación primaria y 3. asentamiento por consolidación secundaria (Cuadro 2).

Cuadro 2
Etapas de los asentamientos y su dinámica

Etapas del asentamiento	Dinámica
Asentamiento elástico o inicial	Ocurre una reducción de volumen del suelo, pero no ocurre desplazamientos entre las partículas. Los asentamientos en esta etapa, son los menos peligrosos, y alcanzan unos pocos milímetros.
Asentamiento por consolidación primaria	La columna de suelo es sometida a cargas, debido a la construcción en particular, en inicio las cargas son equilibradas debido a la presión que ejerce el agua contenida en los poros (presión intersticial), pero en el transcurso del tiempo esta presión se disipa. En este caso, los asientos pueden ser estimados por el ensayo edométrico, usando la teoría de consolidación de Terzaghi.
Asentamiento por consolidación secundaria	Ocurre un reacomodo de las partículas de suelos, por tanto, ocurre una transformación importante en la estructura del mismo. Los suelos con acomodamiento de partículas más abiertas, que posibilitan el drenaje y los suelos orgánicos, son los más afectados.

Fuente: elaboración propia.

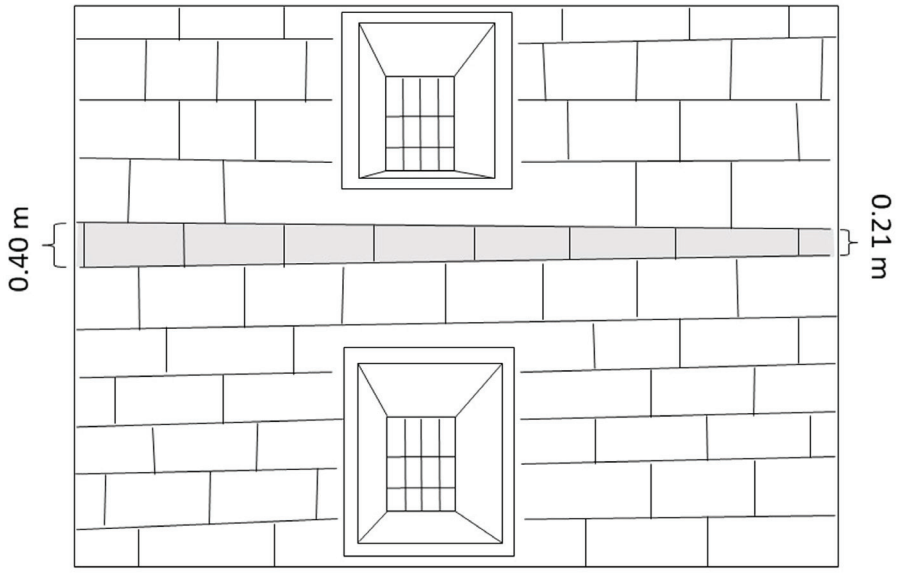
El análisis de cada una de las etapas de un asentamiento permite inferir que las alteraciones de las condiciones hidrogeológicas juegan un rol importante, especialmente debido a la extracción de agua, como es el caso de la ciudad de México. Las consecuencias de los asentamientos pueden agudizarse cuando se presentan de forma diferencial, como es el caso de la Catedral Metropolitana (Figura 1). El hundimiento diferencial ocurre cuando algunas partes del edificio se hunden a un ritmo más acelerado que otras, provocando, en muchos casos, la pérdida total del inmueble.

Por otro lado, cuando el asentamiento es homogéneo para toda la estructura, los daños son menos dramáticos. Salvo algunas excepciones, como la infraestructura de apoyo al edificio (tuberías de agua, gas, alcantarillado y otras) que sí pueden sufrir daños. Es el caso del Ángel de la Independencia, el cual aparentemente no se ha hundido, debido a su cimentación en pilotes unos 30 metros de profundidad, aproximadamente. Sin embargo, la infraestructura adyacente sí ha experimentado asentamientos de unos 3 metros.

Se puede concluir este apartado indicando que la compresibilidad de los suelos es un fenómeno diagnosticable aplicando la Teoría de la Consolidación de Terzaghi. Mientras que, para el aprovechamiento de espacios, con suelos proclives a este fenómeno, deben aplicar los denominados "criterios de cimentación en condiciones geológicas complejas" (Gonzales de Vallejo, 2002). En general, algunas medidas para mitigar el fenómeno son: 1. no deprimir las presiones de los fluidos en el corte estratigráfico donde se emplazarán

las construcciones; 2. aplicar soluciones de cimentación, por ejemplo, pilotes que rebasen el estrado susceptible a la compresibilidad y 3. la compactación dinámica de los materiales, aumentando considerablemente su consolidación.

Figura 1. Pared exterior de la Catedral Metropolitana, donde se observa la diferencia de espesor de la hilada de bloques, para absorber los desniveles, originados por los hundimientos diferenciales



Fuente: figura basada en fotografía tomada por Aguilera, 2013.

Inestabilidad de laderas

El crecimiento de los perímetros urbanos en México ha dado lugar a la ocupación de territorios de condiciones geomorfológicas complejas, como zonas altamente diseccionadas y con pendientes abruptas sometidas a urbanizaciones no planeadas con rigor técnico, que han desencadenado desastres en escenarios de riesgos muy predecibles. Generalmente el término ladera es empleado para indicar una pendiente más o menos en su estado natural; talud hace referencia a una ladera donde su geometría fue modificada por la acción del hombre. Ambos (ladera y talud), en determinadas condiciones geométricas y geotécnicas, pueden ser susceptibles a fallar. En este caso, la predicción de este tipo de eventos radica en conocer el coeficiente de estabilidad.

Pero es importante diferenciar el factor de escala. Evidentemente, es muy diferente el enfoque metodológico para el estudio de un área inestable de pendientes abruptas, respecto al análisis de una ladera en específico González De Vallejo (2002) así lo plasma, dejando establecidos dos ámbitos: investigaciones de áreas inestables e investigación de deslizamientos particulares (Cuadro 3).

Cuadro 3
Investigación de deslizamientos

Ámbito	Fases	Métodos y técnicas	Finalidad
(1) Investigación de áreas inestables	Estudios preliminares	Revisión de información y cartografías existentes.	
		Interpretación de fotos aéreas y teledetección.	Identificación de los procesos y tipos de movimiento. Identificación de los factores condicionantes.
		Observaciones de campo.	Evaluación general de la estabilidad de la zona.
	Reconocimientos generales.	Cartografía de los procesos.	
		Cartografía de los factores.	
	Estudio de los factores que los causan	Reconocimiento de campo.	Descripción y clasificación de los procesos y de los materiales.
		Investigación preliminar del subsuelo: geofísica	Análisis de la susceptibilidad con base en la presencia de procesos y concurrencia de factores condicionantes.
(2) Investigación de deslizamientos particulares	Investigaciones en detalle	Observaciones y medidas en afloramientos.	Descripción y clasificación de los movimientos. Datos morfológicos, hidrogeológicos y geomecánicas.
		Sondeos geofísicos, ensayos de campo, toma de muestras.	
		Ensayos de laboratorio.	
	Instrumentación	Inclinómetros, extensómetros, piezómetros.	Datos de velocidad, dirección, situación de planos de rotura y presiones de agua.
	Análisis de estabilidad	Equilibrio límite. Modelos matemáticos tenso-deformacionales.	Definición de los modelos y mecanismos de rotura. Evaluación de la estabilidad. Diseño de medidas correctoras.

Fuente: González De Vallejo, 2002.

1. Investigación para áreas inestables (Cuadro 3)

En la actualidad, los análisis de "áreas inestables" se soportan sobre SIG, debido al volumen considerable de información georreferenciada que manejan. Deben transitar, primero, por un inventario detallado de los movimientos de ladera activos e históricos. El levantamiento de campo permite definir con claridad en qué condiciones físicas y ambientales ocurrió cada evento para, de esta forma, establecer modelos de frecuencia de deslizamientos para cada condición.

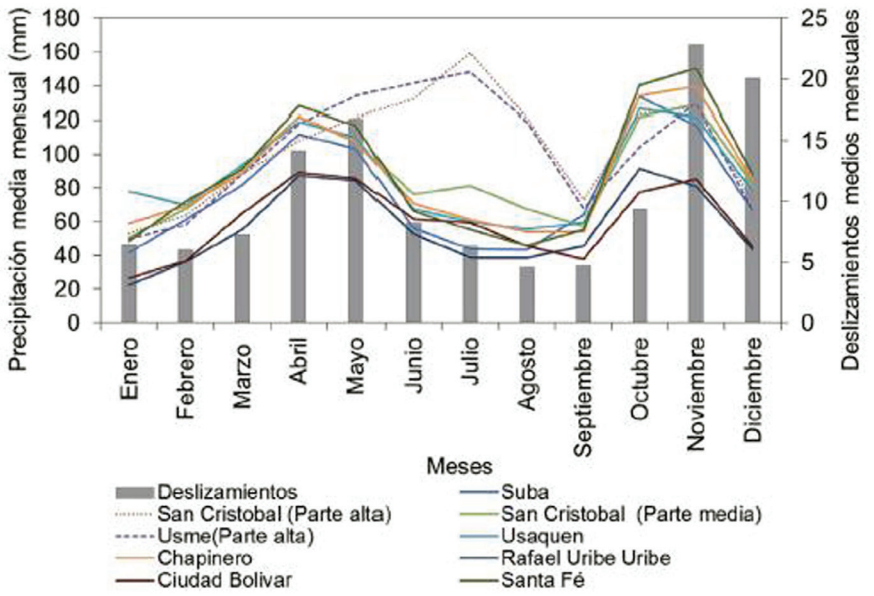
Posteriormente, se deben establecer los factores condicionantes. Las guías metodológicas y los trabajos más recientes (Galindo y Alcántara-Ayala, 2015; Quirá, 2017; Paz-Tenorio *et al.,* 2017; Cueto-Gil, 2019), apuntan a la necesidad de al menos

contemplar: geomorfología (pendientes y disección vertical), geología (tipos de materiales consolidados o no consolidados y sus características geotécnicas), elementos tectónicos (densidad de fallas u otras discontinuidades estructurales por unidad de área), densidad de drenaje, condiciones hidrogeológicas (niveles freáticos) y vegetación y uso de la superficie.

Los factores condicionantes solo indican la susceptibilidad o predisposición del escenario geográfico, a la ocurrencia de los deslizamientos. Por tanto, el periodo de retorno seguramente estaría vinculado o los factores desencadenantes. En este caso, los más extensivos son las lluvias y los sismos. Aunque pueden existir otros de impacto más local, como las explosiones por actividad minera. En cualquier caso, es imprescindible partir del registro histórico de deslizamientos del caso de estudio que se desee abordar (inventario). Por ejemplo, si consideramos las lluvias como detonante, no es conveniente extrapolar umbrales de lluvias y su relación con los deslizamientos de otro sitio, pues dos laderas en igualdad de condiciones geométricas, pero con características litológicas diferentes, responderán de forma distinta a iguales niveles de precipitaciones.

La correlación lluvia-deslizamientos es una herramienta significativa en la gestión local del riesgo, especialmente para el establecimiento de los sistemas de alerta temprana. En la Figura 2 se muestra un ejemplo para la ciudad de Bogotá.

Figura 2. Precipitación media mensual multianual para nueve localidades de Bogotá y deslizamientos promedio mensuales multianuales



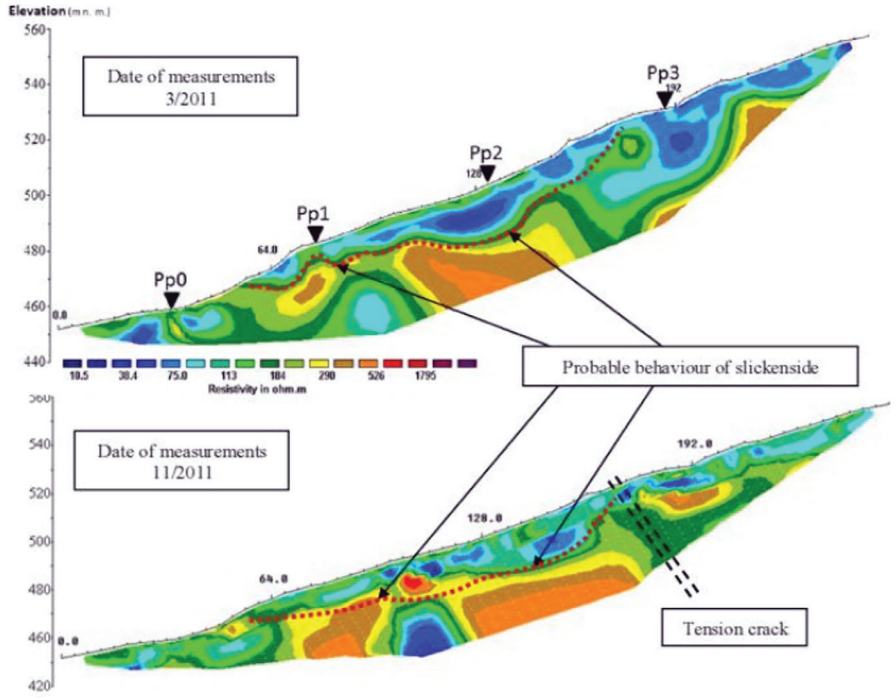
Fuente: tomado de Ramos *et al.*, 2015.

2. *Investigación para una ladera o talud en particular (Cuadro 3)*

En estos casos, la información geométrica de la ladera o talud investigado debe ser de alta precisión. De forma general, al menos debe estimarse la altura y la inclinación. El segundo grupo de datos a develarse, son los geotécnicos. De estos, los principales son la densidad (γ), cohesión (c), ángulo de rozamiento (Φ) y la saturación (S). La posición del nivel freático es clave, pues incide en la determinación de las presiones intersticiales (presión del agua contenida en los poros).

Para la obtención de los datos antes mencionados, generalmente se utilizan combinaciones de métodos, entre los directos e indirectos. El principal método directo, es la perforación, con la toma de muestra e identificación de materiales. Entre los métodos indirectos, se ubican los geofísicos, donde los más empleados son los métodos geoeléctricos (Figura 3).

Figura 3. Aplicación de la tomografía eléctrica al estudio de una ladera



Nota: la línea discontinua roja marca un mínimo de resistividad eléctrica rodeado de un máximo, reflejando una superficie muy saturada, que probablemente constituya una potencial superficie de deslizamiento. Fuente: tomado de Quintana y Teixidó, 2013.

Finalmente, los estudios de una ladera o un talud concluyen con el cálculo del coeficiente de seguridad o factor de seguridad. El coeficiente de seguridad indica la relación entre las fuerzas que se resisten al movimiento, respecto a las fuerzas que lo favorecen. Un coeficiente de seguridad mayor que 1.0 indica una ladera estable, mientras que un coeficiente de seguridad por debajo de 1.0 revela una ladera inestable. Por motivos de seguridad, para obras permanentes (autopistas, edificios, canales, presas), se sugieren adoptar coeficientes de seguridad superiores a 1.3. En el Cuadro 4, se muestra un resumen de los métodos de cálculos más empleados para determinar un coeficiente de seguridad.

Cuadro 4
Metodologías utilizadas en los análisis convencionales de estabilidad de taludes

Método	Parámetros utilizados	Ventajas	Limitaciones
Límite de equilibrio	Topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas.	Existe una gran cantidad de paquetes de software. Se obtiene un número de factor de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua.	Genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. No incluye análisis de las deformaciones.
Esfuerzo-deformación continuos	Geometría del talud, propiedades del material, propiedades elasto-plásticas y de "creep". Niveles freáticos, resistencia.	Permite simular procesos de deformación. Permite determinar la deformación del talud y el proceso de falla. Existen programas para trabajar en dos y tres dimensiones. Se puede incluir análisis dinámico y análisis de "creep".	Es complejo y no lineal. Comúnmente no se tiene conocimiento de los valores reales a utilizar en la modelación. Se presentan varios grados de libertad. No permite modelar rocas muy fracturadas.
Discontinuos Esfuerzo-deformación elementos discretos	Geometría del talud, propiedades del material, rigidez discontinuidades, resistencia y niveles freáticos.	Permite analizar la deformación y el movimiento relativo de bloques.	Existe poca información disponible sobre las propiedades de las juntas. Se presentan problemas de escala, especialmente en los taludes en roca.
Cinemáticos estereográficos para taludes en roca	Geometría y características de las discontinuidades. Resistencia a las discontinuidades.	Es relativamente fácil de utilizar. Permite la identificación y análisis de bloques críticos, utilizando teoría de bloques. Pueden combinarse con técnicas estadísticas.	Útiles para el diseño preliminar. Se requiere criterio de ingeniería para determinar cuáles son las discontinuidades críticas. Evalúa las juntas.
Dinámica de caídos de roca	Geometría del talud, tamaño y forma de los bloques y coeficiente de restitución.	Permite analizar la dinámica de los bloques. Existen programas en dos y tres dimensiones.	Existe muy poca experiencia de su uso en los países tropicales.
Dinámica de flujos	Relieve del terreno. Concentración de sedimentos, viscosidad y propiedades de la mezcla suelo-agua.	Se puede predecir el comportamiento, velocidades, distancia de recorrido y sedimentación de los flujos.	Se requiere calibrar los modelos para los materiales de cada región. Los resultados varían de acuerdo con modelo utilizado.

Fuente: Ortiz, 2012.

Licuefacción

Las oscilaciones del terreno, las rupturas de fallas en superficie, los deslizamientos, las caídas de rocas, los tsunamis y la licuefacción de los suelos son de los principales fenómenos inducidos durante un terremoto. Este capítulo, dedicado a los riesgos geotécnicos inducidos en asentamientos humanos, dedicará un espacio para la licuefacción.

La licuefacción se produce cuando determinados tipos de suelos afectados por movimientos tangenciales desarrollan elevadas presiones intersticiales. Esto ocurre de forma rápida (sin drenaje), dando lugar a una pérdida de la resistencia al corte y a la rotura del suelo, el que se comportaría como un líquido. Rodríguez (2011), en su trabajo "Análisis y mejoramiento de suelos potencialmente licuables", hace una detallada descripción de algunos eventos relacionados con la licuefacción en México. De forma específica, Shelley y Vieitez (1997), abordan las características geotécnicas de los suelos que experimentaron la licuefacción en la costa de Manzanillo, Cihuatlán y Puerto Vallarta, durante el sismo de 8.0 grados magnitud Richter del 9 de octubre de 1995 (Fotografía 3).

Fotografía 3. Fisuramiento por licuefacción

Fuente: Shelley y Vieitez, 1997.

Desde el punto de vista metodológico, los análisis de susceptibilidad a la licuefacción constituyen trabajos a escala de detalle, habitualmente son trabajos que transitan desde el estudio de un predio en particular (1:500) a

escalas 1:5 000 o 1:10000, como máximo. Es un fenómeno que ocurre en la parte más superficial del corte geológico (primeros 15.0 m), precisamente en la zona de interacción suelo-cimiento. Los inventarios realizados en México y en el resto del mundo, indican que la licuefacción generalmente ocurre para eventos sísmicos de energía superior a los 5.5 grados en la escala de Richter, y siempre relacionados con materiales poco consolidados y saturados.

Gonzales de Vallejo (2002), hace un resumen de las principales condiciones geotécnicas e hidráulicas que presenta un suelo susceptible a licuar, entre las principales características ubica:

- Nivel freático muy cerca de la superficie, generalmente inferiores a 5.0 m, lo que garantiza muchas veces una saturación del 100%.
- Diámetro medio de las partículas de suelo (D_{50}) entre 0.05 y 1.0 mm.
- Coeficiente de uniformidad (Cu) inferior a 15.
- El contenido de la fracción fina (Arcilla+Limos) inferior al 10%.
- Bajo grado de compactación del suelo, definido por el número de golpes del ensayo de penetración estándar (N). Para los primeros 10.0 m del corte estratigráfico, en un suelo susceptible a la licuación, N<10. Y para profundidades sobre los 10.0 m, N<20.

Hasta aquí, es evidente que la zonación de suelos susceptibles a la licuefacción es viable con un mínimo de conocimiento de las condiciones geotécnicas. Los estudios sobre licuefacción han evolucionado de forma importante, y en la actualidad se reconocen cuatro grupos de métodos dirigidos a evaluar la predisposición de un escenario geográfico a la ocurrencia de este fenómeno:

1) Métodos que evalúan la resistencia a la licuefacción y la comparan con el esfuerzo cíclico del sismo (Seed e Idriss, 1971, revisado y actualizado por Youd e Idriss, 2001), estos incorporan en sus análisis la evaluación de parámetros dependientes del terreno (densidad, N, niveles de agua someros, etc.) y del terremoto (aceleración máxima, magnitud, distancia al epicentro, etc.).

2) Criterios para la evaluación de la relación de resistencia cíclica basados en el ensayo de penetración estándar (SPT) (Kramer y Stewart, 2004).

3) Métodos basados en la aceleración máxima en superficie (Armijo, 1995).

4) Métodos basados en las propiedades de la fracción fina del suelo (Brandes, 2003).

El primer grupo es uno de los más completos, el método involucra parámetros intrínsecos del suelo (densidad de los suelos, profundidad de yacencia, presencia de agua) y de la energía del potencial evento sísmico (aceleración horizontal). Según el método, el suelo licuará si la razón de tensión tangencial cíclica (CSR), producida por un sismo, es mayor que la resistencia tangencial del suelo:

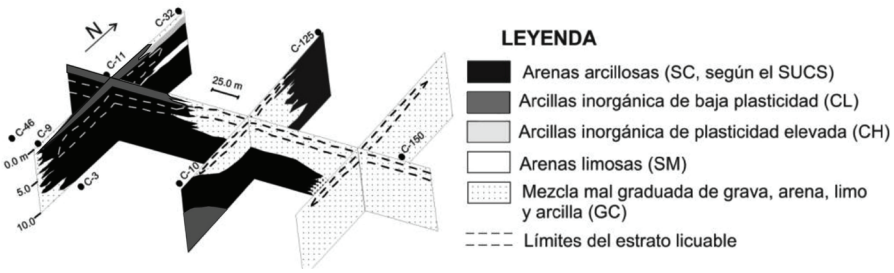
$$CSR = \frac{\tau_{cm}}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{\max}}{g} r_d$$

Donde:

τ_{cm} = esfuerzo cortante cíclico medio
σ_v = tensión total
σ'_v = tensión efectiva
a_{max} = aceleración máxima horizontal.

Conocido internacionalmente como método de Seed e Idriss, ha sido aplicado en diferentes partes del mundo para definir la predisposición del suelo a licuar en escenarios urbanos (Zapata, 2005; García, 2007; Alfaro, 2013 y Ordaz *et al.*, 2013) (Figura 4).

Figura 4. Delimitación de suelos licuefactables para un predio, empleando el método Seed e Idriss



Fuente: Ordaz *et al.*, 2013.

Si bien, el método de Seed e Idriss es muy completo, también es comprensible la necesidad de un volumen importante de datos para su puesta en práctica. Muchas veces inviables en fases iniciales de un estudio de ordenamiento del territorio, o en el diseño de una urbanización pequeña o mediana. Es estos casos, donde se requieran hacer zonificaciones aproximadas para la toma de decisiones, se han desarrollado técnicas menos robustas, como los métodos basados en las propiedades de la fracción fina del suelo. Estos parten de la hipótesis de que suelos empobrecidos en la fracción fina tienen menos capacidad de generación de presión de poros, por tanto, serían menos susceptibles a licuar (Cuadro 5).

Cuadro 5
Ejemplo de criterio para la evaluación de licuefacción de suelos con presencia de finos propuesto

	Límite líquido < 32	Límite líquido ≥ 32
Fracción de arcilla < 10%	Susceptible (a)	Pudiera ser susceptible (b) (se recomienda ensayos adicionales)
Fracción de arcilla ≥ 10%	Pudiera ser susceptible (b) (se recomienda ensayos adicionales)	No susceptible (c)

(a) Susceptible, (b) Medianamente susceptible y (c) No susceptible.

Fuente: Brandes, 2003.

Conclusiones

El capítulo coloca en perspectiva la relevancia de los estudios geotécnicos, especialmente en entornos urbanos, donde se concentran la mayor cantidad de elementos expuestos. Especialmente se hace énfasis en tres fenómenos, la compresibilidad, la inestabilidad de laderas y la licuefacción.

En el caso de la compresibilidad, los materiales geológicos más susceptibles, son los suelos orgánicos, comúnmente presentes en zonas de antiguos lagos y en zonas costeras. Pero existen otros materiales con alta posibilidades de experimentar una reducción considerable de su volumen de poros, en este grupo se ubican los suelos finos (arcillas y limos). En todos los casos se puede concluir que la compresibilidad es un fenómeno diagnosticable aplicando la Teoría de la Consolidación de Terzaghi.

De igual forma, se hace un breve recorrido por las metodologías empleadas en el análisis de estabilidad de laderas, describiendo los dos enfoques más frecuentes: "investigaciones de áreas inestables" e "investigación de deslizamientos particulares" y se precisa con claridad la secuencia que se debe seguir en cada caso.

Finalmente, el capítulo aborda la licuefacción, uno de los fenómenos inducidos por sismos de mayor relevancia. Su posible ocurrencia puede ser diagnosticada en las etapas iniciales de un proyecto urbanístico o de un simple edificio. El diagnóstico temprano, es decir, previo a la fase constructiva de un proyecto, permitiría diseñar medidas preventivas.

Las medidas para prevenir los efectos de la licuefacción sobre una estructura pueden ser clasificadas en dos categorías:

1) Medidas orientadas a prevenir la ocurrencia del fenómeno. Métodos: Vibro-flotación, vibro-sustitución, compactación dinámica clásica, compactación dinámica rápida, premezclado y rebajamiento del nivel freático.

2) Medidas orientadas a contrarrestar sus consecuencias en obras ya existentes. Métodos: Recalce con micropilotes, inyecciones de impregnación, inyecciones de fracturación.

Bibliografía

Aguilera, P., 2013. *Catedral Metropolitana. Hundimiento y Rescate*. Universidad Nacional Autónoma de México. 65 p.

Alfaro, F. A., 2013. *Comparación entre la metodología para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en Concepción*. Proyecto de título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el Título de Ingeniero Civil. Universidad del Bio-Bio Facultad de Ingeniería. 120p.

Armijo, G., 1995. *Influencia de los métodos de mejora del terreno en la resistencia de suelos flojos frente a terremotos*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

Ayala, F.J. y Olcina, J., 2002. *Riesgos Naturales*. Editorial Ariel, Barcelona, 1511 p.

Brandes, H. G. 2003. *Geotechnical and Foundation Aspects.* University of Haway, Honolulu [Handbook], 61 p.

Comisión Nacional del Agua, 2007. *Geotecnia en suelos inestables. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Comisión Nacional del Agua. ciudad de México, 195 p.

Cueto Gil, C. J., Estévez Cruz, E., & Ordaz Hernández, A., 2019. "Zonificación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la Cordillera de Guaniguanico, Cuba. Un aporte al ordenamiento del territorio". *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 39(1), 11-38.

Díaz Rodríguez, J. A., 2014. *Mecánica de suelos: naturaleza y propiedades*. Ed. Trillas, México, D.F.

Díaz-Rodríguez J. A., 2006. "Los suelos lacustres de la ciudad de México". Rev. Int. de *Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 6(2). 20p.

Díaz-Rodríguez, J., 2016. "El subsuelo de la ciudad de México*". XXVIIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica.*

Galindo S., J. A., e I. Alcántara-Ayala, 2015. "Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México", *Investigaciones Geográficas*, Boletín, núm. 88, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 122-145, dx.doi.org/10.14350/rig.43790.

García, J.R., 2007. *Análisis comparativo del fenómeno de licuación en arenas. Aplicación a Tumaco* (Colombia). Tesis Doctoral. Universitat Politécnica de Catalunya. 101p.

Garrido, S., 2006. *La consolidación de los suelos: una revisión.* Facultad de ingeniería. Maestro en ingeniería. Universidad nacional autónoma de México. 96 p.

González De Vallejo, L., 2002." Ingeniería Geológica". Pearson Educación. 744 págs.

Kramer, S.; J. Stewart, 2004. *Geotechnical Aspects of Seismic Hazards*. En: BOZORGNIA, Y.; V. BERTERO, eds. Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering. London. Taylor and Francis Group.

Mooser, F., 1963. "La cuenca lacustre del Valle de México". *Mesas Redondas sobre Problemas del Valle de México*. Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, A. C. México., pp. 12-16.

Ordaz-Hernández, A.; Hernández-Santana, J. R.; Chuy, T. J. & García, J. A., 2013. "La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental". *Minería y Geología* 29(2): 115.

Ortiz, C. E., 2012. *Presentación del Curso: Estabilidad de Taludes*. Universidad Privada de Tacna. Perú. Consultado el 7 de Julio del 2019.

Paz Tenorio, J., González Herrera, R., Gómez Ramírez, M., & Velasco Herrera, J.,

2017. “Metodología para elaborar Mapas de Amenazas por Procesos de Remoción en Masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas”. *Investigaciones Geográficas*, 0(92). doi: http://dx.doi.org/10.14350/rig.52822

Quintana, A.R. y Teixidó, M.T., 2013. *Aplicación en la caracterización del deslizamiento de Doña Mencía (Córdoba).* Universidad de Granada e instituto Andaluz de Geofísica, 55p.

Quirá, Y. S., 2017. *Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la cuenca del Rio Patía – Departamento del Cauca Medina*. Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Especialización en Sistemas de Información Geográfica, 88p.

Ramos, C, Alfonso M, Trujillo-Vela, Mario Germán, & Prada S, Luis Felipe, 2015. “Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá”. *Obras y proyectos*, (18), 63-75. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132015000200006

Rodríguez, I., 2011. *Análisis y mejoramiento de Suelos potencialmente licuables*. Tesis para optar por el grado de Ingeniero Civil. Facultad de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 70 p.

Romero, W., 2017. *Compresibilidad del subsuelo de la ciudad de México mediante ensayes de velocidad de deformación constante*. Facultad de Ingeniería. Tesis para optar por el grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 100 p.

Schjetnan, M., Calvillo, J. y Peniche, M., 2004. *Principios de Diseño Urbano/Ambiental*. Editorial PAX MÉXICO, 155 p.

Seed, H. B. & Idriss, I. M., 1971. *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential.* Jl. Soil Mech. F. Div. ASCE vol. 97, SM 7.

Shelley, E.O. y Vieitez, L., 1997. “Geotecnia”. En *El Macrosismo de Manzanillo* del 9 de octubre de 1995. Universidad de Colima. 358p.

Sowers, B. y Sowers, F., 1990. *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. Limusa (ed.) México, D.F., 677 p.

Youd, T. L. &Idriss, I. M., 2001. “Liquefaction Resistance of Soils: Summary Reportfromthe 1996”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127: 297-313.

Zapata, J.C., 2005. *Licuación de arenas en la refinería General Lázaro Cárdenas.* Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería (geotecnia). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería. 199 p.

2.8. Evaluación de Riesgo Volcánico en la Región del volcán Jocotitlán, Estado de México

Miguel Martínez Tapia
José Luis Escalona Hernández
Rubén López del Campo

Facultad de Arquitectura y Diseño
Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

Los peligros naturales como los riesgos volcánicos son parte de nuestro entorno. En todo sentido, los peligros de origen natural forman un elemento de importancia en el campo de estudio de la geografía y que actualmente han tenido expectación por parte de las autoridades y de la población en general, ya que alteran a los ecosistemas naturales y en ocasiones los modifican por completo. Asimismo, incrementan la degradación del espacio geográfico, reflejando las perturbaciones hechas por el hombre hacia su entorno.

El presente estudio se elaboró con la finalidad de aportar información y desarrollar una metodología aplicable a nuestro ámbito cultural y económico de ordenación del territorio ante procesos naturales, relacionada al riesgo volcánico en la región del volcán Jocotitlán, Estado de México, debido a la relación que guarda la zona con el entorno geográfico de la región, al ubicarse en el Sistema Volcánico Transversal (SVT), zona altamente propensa al peligro volcánico. Pretende registrar una de las manifestaciones más peligrosas en cuanto a actividad eruptiva se refiere (avalancha de escombros) y la alta población asentada alrededor del volcán. Por lo tanto, es importante que se preparen y elaboren mapas de riesgo volcánico, para tener resultados más confiables en la definición de criterios de política del uso del suelo en cuanto al crecimiento urbano y mitigar al máximo la pérdida de vidas humanas, bienes económicos y recursos naturales en el momento de ocurrir un desastre de origen volcánico.

La evaluación del riesgo volcánico, parte de la metodología propuesta por Fournier D'Albe (1979) en donde define *riesgo* como la posibilidad de pérdida, tanto en vidas humanas como en bienes o en capacidad de producción. Esta definición involucra tres aspectos relacionados por la siguiente fórmula: $R = P \times Vu \times S$. Dónde: (P) es el Peligro o Amenaza, definida como la probabilidad de que un área determinada sea afectada por procesos potencialmente destructivos en un intervalo dado de tiempo; (Vu) es la vulnerabilidad considerada como una medida de la proporción (0 al 100%) del valor susceptible a ser perdido en un evento peligroso; (S) es el valor que puede incluir el número de vidas humanas, las propiedades, las obras de infraestructura, la capacidad productiva amenazadas (Tilling, 1993). A estos aspectos considerados en la fórmula anterior, se incorporó un parámetro más, el cual reducirá el riesgo por medio de una respuesta social o preparación (Q), que involucra una serie de medidas para reducir la vulnerabilidad y el valor vulnerable y con ella el riesgo (De la Cruz-Reyna, 1995).

La metodología utilizada en la valoración de los componentes del riesgo en la región de Jocotitlán puede ser aplicable a otros volcanes con distintos grados de peligro o amenaza, debido a que considera las condiciones de infraestructura, equipamiento urbano, uso de suelo y vegetación, los antecedentes del volcán, la caracterización morfológica del volcán y la geología. Esta misma información permitió realizar la zonificación del peligro en la región del volcán Jocotitlán, con base en los escenarios derivados de manifestaciones volcánicas tales como: avalancha de escombros, flujos y oleadas piroclásticas, flujos de lava, caída de tefra (cenizas) y lahares. Así como efectos encadenados a condiciones coeruptivas o posteruptivas del edificio volcánico, es el caso de inundaciones y desbordamientos de río.

En el desarrollo de este trabajo se emplearon las tecnologías de la información geográfica mediante los Sistemas de Información Geográfica que permitió la representación y el análisis espacial de la información de los bienes expuestos en el área de estudio. Las técnicas de análisis espacial permiten interrelacionar variables estadísticas con un posicionamiento espacial para desenmarañar el complejo sistema territorial, porque el territorio es el espacio donde se establecen las relaciones causales y de intercambio entre los diferentes subsistemas. (Lagar Timón. 2016). Esta herramienta permitió incorporar las variables consideradas para la evaluación del riesgo volcánico las cuales servirán para la planeación ambiental del territorio en el área del volcán Jocotitlán.

La evaluación del peligro volcánico

El vulcanismo es un fenómeno natural que representa uno de los problemas no del todo resueltos de las ciencias de la Tierra. La complejidad de este proceso no es sorprendente, pues por medio de ese proceso, la

Tierra ha generado gran parte de su corteza y de su atmósfera, ofreciendo también evidencias de su dinámica interna. Por otro lado, el vulcanismo tiene impacto en las actividades humanas, tanto por sus efectos destructivos, como por sus aspectos benéficos. Los procesos volcánicos constituyen objeto de consideración científica y, por la importancia social de sus efectos, adquieren especial interés los casos destructivos, como las erupciones volcánicas del tipo explosivo (Espíndola *et al.*, 1991).

La ocurrencia de varios desastres volcánicos en el circumpacífico demuestra la importancia de una evaluación del riesgo antes de la erupción, así como el monitoreo del volcán para la mitigación de los peligros. Una mitigación efectiva de los peligros requiere que los responsables de la seguridad pública dispongan de predicciones oportunas y mapas de zonificación de riesgo de los volcanes potencialmente peligrosos antes de una crisis (Tilling, 1984).

El Sistema Volcánico Transversal (SVT) es una zona abundante en este tipo de fenómeno desde el Pleistoceno y en algunos casos desde el Terciario. Sin duda, es una gran extensión (1500 km de largo) en donde existe una alta densidad de población y actividad económica vulnerables, que aumentan el riesgo ante la posibilidad de una erupción. El volcán de Colima, el Popocatépetl y los campos monogenéticos de Michoacán-Guanajuato, son algunos ejemplos de volcanes activos localizados en el SVT que representan un riesgo (De la Cruz-Reyna, 1994, en comunicación personal).

La evaluación de riesgo y la toma de decisiones en caso de emergencia eruptiva son problemas complejos que requieren un entrenamiento especial y conocimiento de los procesos volcánicos (De la Cruz-Reyna y Ramos-Jiménez., 1992). Los trabajos más importantes han sido aquéllos en los que se obtuvieron los mapas de peligros de los volcanes Popocatépetl (Macías *et al.*, 1995), de Colima (Martin del Pozzo *et al.*, 1995) y Pico de Orizaba (Sheridan *et al.*, 2001).

El volcán Jocotitlán, por pertenecer al Cinturón Volcánico Transversal (SVT), es una zona propensa al peligro volcánico. Debido a que ha registrado una de las manifestaciones más peligrosas en cuanto a actividad eruptiva se refiere (avalancha de escombros) y por la cantidad de población que se encuentra asentada alrededor del volcán, son elementos que justifican un estudio de este tipo. El depósito de avalancha de escombros en el flanco NE del volcán tiene una edad histórica datada por C14 de 680 ± 80 años bP (AD $1270^{\pm}80$) (Siebe *et al.*, 1992). La naturaleza destructiva de su última actividad, la población considerable que habita en la zona circundante, que dependen de la agricultura y de una ligera industrialización en varios poblados, localizados dentro de un radio de 10 km del volcán y demás actividades económicas allí desarrolladas, son algunas agravantes que motivan a evaluar el riesgo en esta zona. Además, su proximidad a la ciudad de México (72.5 km) en dirección W-NW, considerada el área más densamente poblada del país, y 50

Km en línea recta al norte de la ciudad de Toluca, hacen que una reactivación pudiera generar efectos dignos de consideración, lo cual no implica que el peligro sea necesariamente inmediato. Por lo tanto, el volcán Jocotitlán podría ser considerado potencialmente activo (Siebe *et al.*, 1992), de ahí el interés de realizar una evaluación de los componentes del riesgo en esta zona

La evaluación del riesgo permitirá enriquecer las metodologías que se han desarrollado en otros edificios volcánicos, para la toma de decisiones en caso de una reactivación. En el caso particular de la zona de estudio, la evaluación del riesgo volcánico, parte de la metodología propuesta por Fournier D'Albe (1979) en donde define al Riesgo como la posibilidad de pérdida, tanto en vidas humanas como en bienes o en capacidad de producción. Esta definición involucra tres aspectos relacionados por la siguiente fórmula:

$$R = P \times Vu \times V$$

Dónde: P es el Peligro o Amenaza, definida como la probabilidad de que un área determinada sea afectada por procesos potencialmente destructivos en un intervalo dado de tiempo; Vu es la vulnerabilidad considerada como una medida de la proporción (0 al 100%) del valor susceptible a ser perdido en un evento peligroso; V es el valor que puede incluir el número de vidas humanas, las propiedades, las obras de infraestructura, la capacidad productiva amenazadas (Tilling, 1993).

A estos aspectos considerados en la fórmula anterior, se le agregó un parámetro más, el cual reducirá el riesgo por medio de una respuesta social o preparación (Q), que involucra una serie de medidas para reducir la vulnerabilidad y el valor vulnerable y con ella el riesgo (De la Cruz-Reyna, 1995).

En la preparación se incluyen aspectos considerados a largo plazo entendiéndose por esta la que constituye escenarios de peligro, con base en información geológico-histórica. Esto nos lleva a disminuir considerablemente el riesgo de una posible actividad eruptiva, por medio de acciones que reduzcan la vulnerabilidad a través de planes operativos: rutas de evacuación, integración de grupos de protección civil y participación de los diferentes grupos de gobierno, por mencionar algunas.

En la región del volcán Jocotitlán, es importante la vulnerabilidad, el valor y la preparación, más que el peligro, ya que este se asocia al estado interno del volcán, si bien el Jocotitlán no presenta señales premonitorias que sugieran la posibilidad de una crisis inmediata. En caso de que el volcán Jocotitlán llegase a entrar en una etapa de actividad, se contaría con la información necesaria para actuar de acuerdo con los posibles escenarios de peligro planteados y el mapa resultante de riesgo volcánico que representa las localidades afectadas de acuerdo con grado de riesgo y las posibles zonas que serían afectadas de acuerdo con peligro, vulnerabilidad y valor. Con esto se contaría con elementos

para tomar las medidas necesarias, lo cual se reflejaría en la variable agregada Q refiriéndose a la preparación (De la Cruz-Reyna, comunicación personal, 1994). De esta manera la fórmula sería:

$$Riesgo = \frac{P \; x \; Vu \; x \; S}{Q}$$

El trabajo se concentró en la evaluación de los componentes de riesgo y en una zonificación del área de acuerdo con planteamiento de escenarios. De especial interés es evaluar la vulnerabilidad y el valor en aspectos como el análisis costo-beneficio, infraestructura urbana, vías de comunicación, servicios, líneas de conducción, población, actividades productivas e infraestructura hidrológica, así como los aspectos de preparación como lo son: la educación pública y de las autoridades, el monitoreo y los planes de contingencia. Esto implica que el grado de Preparación (Q) puede efectivamente disminuir el riesgo por medio de una reducción de la vulnerabilidad o del valor expuesto (De la Cruz-Reyna, 1995).

Para efectos de esta investigación se llevaron a cabo dos fases primordiales. En primer término, se recopiló la información bibliográfica, con el objeto de fundamentar los elementos teóricos y metodológicos del trabajo, que son necesarios en la evaluación de los componentes del riesgo volcánico y trabajo de campo, donde que se hizo un reconocimiento del material geológico, geomorfología e infraestructura del área de estudio, análisis de pH y temperatura de los manantiales cercanos al volcán.

La elaboración de cartografía previa es importante. Para llegar finalmente a un mapa de riesgo, se tomaron en cuenta cinco tipos generales de naturaleza de los productos (caídas de tefra o ceniza, flujos de lava, flujos piroclásticos y oleadas, avalanchas de escombros, además de efectos encadenados a estas actividades, como lo son los lahares y flujos de lodo, los desbordes de presas y ríos e inundaciones), los cuales han sido tomados del *Source Book for Volcanic Hazards Zonation* de Crandell *et al.* (1984), en el cual se dictan sugerencias para la elaboración de mapas de zonificación de peligros volcánicos. La cartografía consistió en la elaboración del mapa base (topografía e hidrología), densidad de disección, profundidad de disección, pendientes y energía del relieve, esto permitió identificar los sitios probables de afectación por productos volcánicos de acuerdo con el tipo de evento.

Para el caso de afectación de zonas por caídas de tefra o ceniza según Crandell, (1980), se tomaron en cuenta dirección y velocidad del viento, datos que fueron obtenidos de las estaciones meteorológicas más cercanas al volcán, ya que determinan las áreas hacia donde se dirigirán las mayores cantidades de estos productos.

El área cartografiada se eligió de acuerdo con criterios de morfología, en donde las barreras topográficas marcaron límites, en los que probablemente pudieran ser detenidos o disminuidos los productos de la avalancha de escombros, los flujos y oleadas piroclásticas, los flujos de lava y los lahares; no así la caída de tefra o ceniza, la cual no respeta la topografía existente. La carta geológico-minera de la ciudad de México E14-2 escala 1:250000, editado por el Servicio Geológico Mexicano, permitió localizar los productos de erupciones anteriores y definir la posible área de afectación. La evaluación general de la población expuesta al peligro volcánico en la región del Jocotitlán se realizó a partir de los escenarios derivados de su historia geológica, con el apoyo de las tecnologías de la información geográfica en particular con el programa QGIS.

La evaluación del peligro volcánico en la región se realizó a partir del análisis de la distribución de los eventos en términos de su tamaño (magnitud e intensidad) y su tiempo de recurrencia. Es así como el primer paso a realizar es asignar el tamaño de los últimos eventos y después construir una distribución del número de eventos para las diferentes magnitudes de categoría en un intervalo de tiempo dado (De la Cruz Reyna, *et al.*, 2002). Se entiende como tamaño a la magnitud e intensidad de las erupciones definida por la escala del Índice de Explosividad Volcánica (VEI, por sus siglas en inglés) como una de las formas de cuantificar las erupciones explosivas (forma que no es válida para las erupciones efusivas) que fue definida por Newhall y Self (1982). El resultado obtenido se clasificó porcentualmente de la siguiente manera: Bajo de 0 a 33; Medio de 33 a 66 y Alto de 66 a 100.

La vulnerabilidad de las localidades se obtuvo utilizando las siguientes variables: grado de peligro planteado en los escenarios; la distancia al cráter de las localidades; la morfometría del edificio y las barreras topográficas naturales. Por medio del programa QGIS se realizó la intersección de las localidades con las actividades volcánicas considerando el grado de peligro asignado en los escenarios; la sobreposición de información de pendiente, energía del relieve, densidad de disección, profundidad de disección y la topografía; asignación de la distancia al cráter de las localidades, tomando como referencia el punto de mayor altitud del edificio y clasificándolas en tres rangos: de 0 a 9 Km., 9 a 12 Km., más 12 Km; reclasificación del grado de vulnerabilidad considerando la avalancha de escombros, la morfometría y barreras topográficas. El grado de vulnerabilidad se clasificó de la siguiente manera: Bajo de 0 a 33%; Medio de 33 a 66% y Alto de 66 a 100%.

La evaluación del valor se realizó a través de la información por localidad de acuerdo con las cartas topográficas, uso del suelo y vegetación escala 1:50000 (INEGI), así como las localidades urbanas (INEGI), información de población total, viviendas habitadas, viviendas con servicio eléctrico, viviendas con servicio de agua potable y total de viviendas con drenaje. Los datos geográficos se clasificaron en los siguientes grupos: población total, viviendas habitadas,

viviendas con servicio eléctrico, viviendas con servicio de agua potable, total de viviendas con drenaje, infraestructura urbana, actividades productivas, caminos, telecomunicación, líneas de conducción, hidrología, infraestructura hidrológica. La sistematización y agrupación de la información por localidad se realizó en una base de datos, de esta manera, la información agrupada, permitió calcular el grado de valor que tienen los bienes expuestos por cada localidad. La estimación del valor total de las localidades expuestas en la región se hizo a partir de la del número de elementos localizados por localidad, de acuerdo con la categoría de las variables. Finalmente, el resultado obtenido se clasificó en: Bajo de 0 a 33%; Medio de 33 a 66% y Alto de 66 a 100%.

La evaluación del riesgo se obtiene a partir de relacionar el peligro, con la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos para cada localidad que se encuentra en la región del volcán Jocotitlán. Al igual que las otras variables, se realizó la clasificación del riesgo volcánico de manera porcentual de 0 a 33 para un riesgo bajo, de 33 a 66 medio y 66 a 100 alto. La variable de preparación ingresa al modelo como divisor. Cuanto mayor sea la preparación, menor será el riesgo producido por un fenómeno de origen volcánico. Este parámetro reducirá o aumentará el grado de riesgo, teniendo en cuenta en la región del volcán Jocotitlán una serie de medidas de carácter preventivo como son: la preparación de los mapas de peligro, programa de monitoreo y vigilancia del edificio volcánico, programas de educación pública, plan de contingencia y emergencia.

Para este trabajo se tomó como base el estudio y los resultados que obtuvieron Siebe y colaboradores (1992), Salinas *et al.*, (2010), para el volcán Jocotitlán, con la finalidad de realizar un análisis de riesgo volcánico en la región. Es necesario e importante en este análisis de componentes, describir a detalle la geología y morfología del volcán y sus alrededores, para así poder plantear, escenarios de peligro que ayuden a una planeación y ordenamiento del territorio, por lo cual se señalan las siguientes características de la distribución y morfología superficial del depósito de la avalancha de escombros: 1. el colapso catastrófico del flanco noreste, propició la formación de un cráter brechado en forma de herradura con una abertura de 90° hacia el sector noreste, lugar hacia donde se depositó la mayor parte de la avalancha de escombros; 2. el depósito cubrió un área de aproximadamente 80 Km^2, una distancia máxima L de alrededor de 12 Km y una altura máxima del declive H de 1150 m, la cual corresponde a un radio de coeficiente de fricción H/L = 0.11 (Cuadro 1). Este resultado se encuentra entre el radio promedio de 0.09 para depósitos de avalancha mayores a 1 Km^3 y el radio promedio de 0.13, para depósitos menores de 1 Km^3 (Siebert *et al.*, 1987); 3. El deslizamiento de las partes norte y noreste del volcán, produjeron un depósito de avalancha de escombros, reconocida por la topografía de cerros y lomas "mogóticas" y la gran abundancia de bloques angulosos de todos tamaños (Siebe *et al.*, 1992). La parte más alejada de este depósito o distal, se emplazó en su gran mayoría en el sector este, donde

los materiales componentes de la avalancha fueron detenidos por barreras topográficas, siendo la más significativa la sierra de Timilpan (Cuadro 1 y Figura 1).

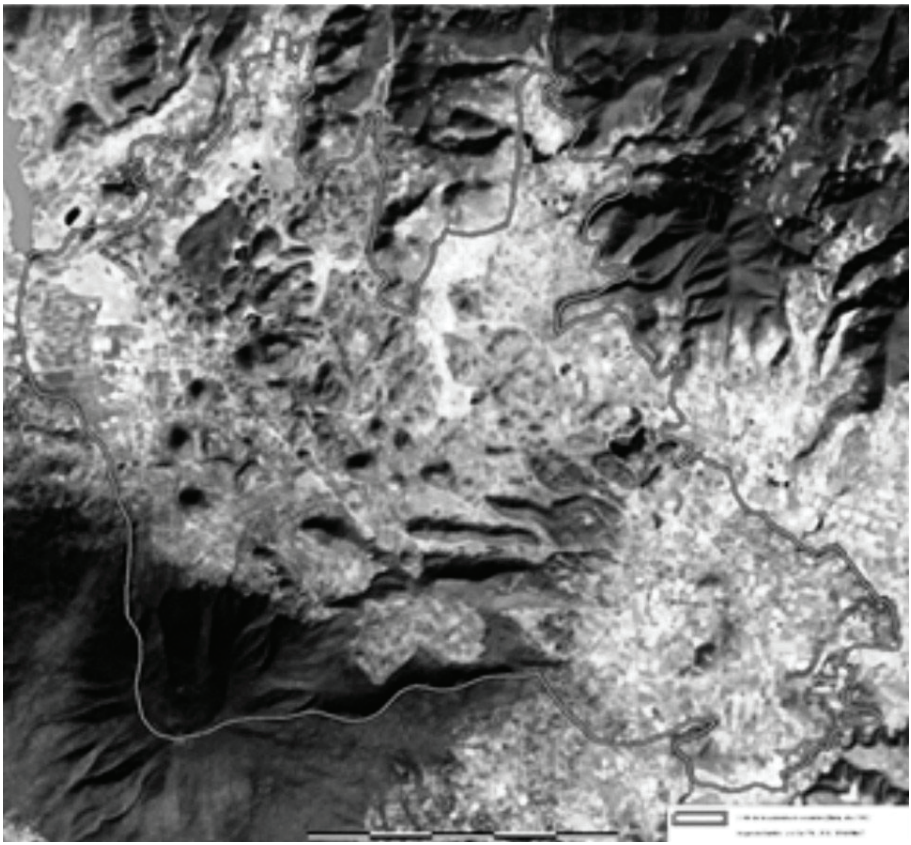
Cuadro 1
Resumen de características morfológicas del depósito de avalancha de escombros del volcán Jocotitlán

Elevación del edificio desde la base (m)	Elevación máxima de bajada □H (m)	Distancia del frente de la avalancha L (km)	□H/l	Superficie cubierta por el depósito (km^2)	Volúmen estimado (km^3)	Espesor promedio del escarpe terminal (m)	Número de hummocks cartografiados	Ángulo de cobertura del escenario de avalancha (0)
1	2	3	4	5	6	6		
1300	1150	12	0.11	80	2.8	35	235	90

1. La base se definió desde los 2650 m, correspondientes al poblado de Jocotitlán, la cima actual es de 3950 m.
2. Diferencia de altura entre el actual borde del cráter de la avalancha (3950 m) y la parte distal del depósito de avalancha (2800 m) en Yondejé.
3. Distancia horizontal máxima del frente del depósito cartografiado. Excluyendo la posible extensión del área ahora ocupada por la Presa Trinidad Fabela.
4. Parámetro propuesto por Siebert et al., 1987.
5. Excluye la posible extensión de la avalancha en el área ahora ocupada por la Presa Trinidad Fabela, así como las porciones erosionadas del noreste del frente de la avalancha.
6. Ver texto para más detalles. Tomado de Siebe, et al., 1992.

Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Delimitación de la avalancha de escombros en la imagen de satélite



Fuente: Siebe, *et al.,* 1992 y Salinas, *et al.*, 2010.

El registro de las erupciones pasadas y la naturaleza de sus productos e impactos proporcionan la base para elaborar los pronósticos a largo plazo (años, décadas o más tiempo). Los datos obtenidos por el monitoreo volcánico describen el comportamiento actual del volcán y proporcionan la información indispensable para hacer pronósticos a corto plazo (meses, semanas, días u horas) de acuerdo con Tilling, R.I., 1993. Existen varias formas de determinar la actividad o no de un volcán, una de esas formas y que formó parte del trabajo de campo es la obtención del pH y temperatura de los manantiales, pozos y cajas de agua que están alrededor del volcán ubicándolos cartográficamente. Esto se hizo para determinar algún indicio de reactivación, ya que el aumento de temperatura y disminución del pH (valores entre 0 y 7), son indicadores o precursores de la actividad volcánica, así como lo es la deformación del terreno o la presencia de fumarolas y sismicidad local, mismos que no tienen evidencia documentada reciente (De la Cruz Reyna, comunicación personal 1994).

De esta manera, el pozo de Santa María del Llano en el municipio de Ixtlahuaca, con pH de 7.59 y temperatura de 41.5°C y el manantial de Pueblo Nuevo en el municipio de Atlacomulco, registró una temperatura de 13.9°C y un pH de 6.67, localizado a 1 Km de distancia del cráter (Cuadro 1); fueron seleccionados para un segundo muestreo y realizar un análisis químico en laboratorio, con la finalidad de obtener datos que muestren alguna alteración en su composición química, ya que constituye un elemento importante para el estudio de la evolución volcánica según Legget (1982).

Considerando que los cambios en composición química pudieran estar relacionados directamente con el movimiento constante de magma en el interior del volcán. Según investigadores, el calentamiento de las aguas de los manantiales cercanos a un volcán pudiera estar ligado por el contacto con alguna cámara magmática, razón por la cual se justificaría la alteración de los elementos contenidos en las aguas de los manantiales, así como su elevada temperatura, la cual indicaría que el volcán estaría activo. Tal es el caso del Volcán Tacaná, en el cual se utilizó el mismo método (De la Cruz Reyna, *et al.*, 1989) (Cuadro 2).

Cuadro 2
Resultados del análisis químico del manantial de Pueblo Nuevo y el pozo de Santa María del Llano

Manantial o pozo	pH	Conductividad	Alcalinidad	Amarillo de Metilo	Total											
			CaCO3	CaCO3	CaCO3	HCO3	CO3=	Ca++	Mg++	Cl-	F-	Na+	K+	SiO2	SiO1=	B	Balance
Pueblo Nuevo	7.67	53	0	30.4	30.4	37.1	0	5.21	1.7	1.23	0.46	3.92	2.35	33.8	n.d		-0.89
Santa María del Llano	8.2	242	8	118	126	134	9.6	7.21	2.67	3.32	0.15	47.7	9.53	90.8	n.d		5.16

Fuente: elaboración propia.

En abril de 1998 se procedió a medir nuevamente el pH y temperatura del agua del pozo de Santa María del Llano y la caja Huerejé, en el municipio de Ixtlahuaca, con la finalidad de realizar un nuevo análisis químico y hacer una comparación con la medida en 1994 y determinar de acuerdo con los resultados, cual es el comportamiento interno de esa zona en específico (Cuadro 3).

Cuadro 3
Resultados de un segundo análisis químico de los pozos y cajas de agua con resultados anteriores de consideración

Pozo y/o caja de agua	pH	Conductividad	Alcalinidad	Amarillo de Metilo	Total												
			CaCO3	CaCO3	CaCO3	HCO3	CO3=	Ca++	Mg++	Cl-	Fe	Na+	K+	F-	Silice	SO_4	B	Balance
Huereje	7.13	253	0	118.68	118.68	144.79	0	11.96	8.71	5.52	0.14	25.48	5.20	0.178	69.21	2.14	Nd	0.62
Santa María del Llano (1)	7.79	238	6.31	109.85	116.16	126.31	7.57	4.38	2.17	4.15	0.11	45.23	6.96	0.439	87.04	Nd	Nd	0.33
Santa María del Llano (2)	7.88	240	6.31	108.58	114.89	124.76	7.57	3.98	1.93	4.02	0.11	46.05	6.98	0.441	87.40	Nd	Nd	1.69

Fuente: elaboración propia.

Zonificación de los peligros para varios tipos de eventos

A) Caídas de tefra o cenizas

La zonificación del peligro por caída de tefra se basa en la frecuencia y magnitud (expresada en volumen total de tefra, o más a menudo, en la expresión espesor versus distancia del centro de emisión) de anteriores caídas de tefra y en los modelos regionales de circulación de los vientos. La forma de las zonas de peligro toma en cuenta la dirección dominante de los vientos y sus velocidades. Otros autores, han definido zonas circulares a varias distancias y han identificado los sectores hacia los cuales el viento sopla con mayor frecuencia (Beget, 1983), el cual se retoma en este trabajo. La forma de representación de las zonas afectadas por caída de tefra en el volcán Jocotitlán están definidas por zonas circulares que van de 0 a 5; 5 a 10 y 10 a 15 Km del edificio volcánico, con lo cual no se quiere decir que las cenizas no puedan alcanzar mayor distancia. Asimismo, se presenta la rosa de vientos por época y anual. Estas últimas, se utilizaron como auxiliares para determinar la dirección de los productos de este tipo.

Las localidades que se asientan en la zona de 0 a 5 kilómetros de distancia al cráter del volcán Jocotitlán son las siguientes: Barrio de Enguido (Los Tecolotes), Barrio de la Luz, Barrio del Progreso, Barrio El Lindero, Barrio la Venta, Estación de Microondas Ignacio Galindo, Huemetla, Los Javieres, Jocotitlán, La Providencia, Puenroo, San Felipe Pueblo Nuevo (Pueblo Nuevo), San José Boqui, Santiago Acutzilapan.

Los depósitos de erupciones anteriores revelan que las lluvias de ceniza han sido registradas con mayor intensidad en dirección NE. Sin embargo, de acuerdo con los datos obtenidos de la dirección del viento, de presentarse una erupción en la estación de primavera la zona de mayor afectación por cenizas en caída libre sería en dirección NW, NNW afectando las localidades de: Pueblo Nuevo, Santiago Acutzilapan, San Pedro de Rosal, San Francisco Chalchihuapan, San Luis Boro, San Pablo Atotonilco, Atlacomulco de Fabela y otras localidades pequeñas.

En esta zona se disminuiría el peligro de posibles flujos de lodo posteruptivos por la ausencia de corrientes de agua permanentes. Sin embargo, cabe señalar que disminuiría el peligro en forma temporal ya que

los depósitos de ceniza se concentrarían en las laderas del volcán que tienen una pendiente de 20º a 45º, produciendo en la temporada de lluvias flujos de lodo, los cuales se canalizarían por el sistema de drenaje desplazándose hacia los valles, afectando principalmente a los poblados de Pueblo Nuevo, Santiago Acutzilapan, San Pedro del Rosal, San Francisco Chalchihuapan y algunas otras localidades más pequeñas.

De presentarse la lluvia de ceniza en la estación de verano afectaría la zona NW y N del volcán, de acuerdo con la dirección predominante de los vientos y de la velocidad de los mismos, podrían desplazarse a distancias mayores lo cual podría afectar poblaciones importantes tales como la cabecera municipal de Atlacomulco, localidad donde se concentra la mayor cantidad de población e industrialización, además de otras como San Pedro del Rosal, San Antonio Enchisi, San Francisco Chalchihuapan, San José del Tunal y San Ignacio de Loyola. El depósito del material en las laderas del volcán con pendiente de 15º a 45º, provocaría en esta temporada la formación de flujos de lodo, ya que la precipitación se presenta con mayor intensidad, las localidades que serían afectadas por los flujos de lodos son: San Antonio Enchisi, San Pedro del Rosal, Pueblo Nuevo y Santiago Acutzilapan.

Si la erupción se presentara en la estación de otoño, la zona de mayor riesgo se presentaría en la dirección W y NW debido a que los vientos predominantes llegan del SSE y E, por lo tanto, las localidades directamente afectadas debido a la velocidad y dirección del viento serían: San Antonio Enchisi, San Francisco Chalchihuapan, San Pedro del Rosal, Jocotitlán y Atlacomulco de Fabela. El material emitido se depositaría en las laderas del volcán con una pendiente de 20º a 45º; durante esta temporada la formación de flujos de lodo solo podría presentarse en un evento extraordinario de lluvia, por la presencia de huracanes en la República Mexicana.

Si se presentara una erupción en la temporada de invierno, la zona de mayor afectación a este tipo de manifestación sería en dirección NW. Los efectos ocasionados por la propagación de cenizas debido a los vientos que vienen del norte, sería directamente sobre las poblaciones de Santa María Nativitas, San Francisco Chalchihuapan, San Pablo Atotonilco, San Ignacio de Loyola y algunas otras localidades más pequeñas ubicadas en esa dirección.

B) Flujos de lava

Las zonas de peligro por flujos de lava se establecen con base en la frecuencia en áreas que han sido cubiertas en el pasado geológico reciente, a los centros de emisión más probables para futuros flujos de lava, a las longitudes y áreas de los flujos de lava típicos para un volcán o tipo de volcán, y condiciones topográficas que convierten a una zona con mayor probabilidad de ser inundadas por un flujo de lava. Aquellos modelos de alimentación desde la cámara magmática, al sistema volcánico al que están

debidamente limitados por datos geológicos, petrológicos, cronológicos y geofísicos, también pueden ayudar en pronósticos a largo plazo, especialmente si estos ilustran un comportamiento cíclico (Kuntz *et al.*, 1986). La extensión de las coladas de lava dependerá de su volumen, movilidad, viscosidad y velocidad que lleve consigo (Tilling, 1984). Las coladas lávicas suman a su poder destructiv, el carácter de la permanencia e irreversibilidad de sus efectos. Sin embargo, salvo en contadas excepciones, el peligro solo concierne al cauce de la colada, cuyo progreso, es, además, muy lento en cuanto disminuye la pendiente y se aleja de la boca eruptiva. Indirectamente, las coladas pueden desencadenar otros peligros al cerrar puertos naturales o interceptar ríos que se desbordan o cambian su cauce (Araña y Ortiz, 1984).

Para el volcán Jocotitlán se tomó en cuenta los depósitos de lava que están en los flancos Este y Oeste del edificio volcánico, la orientación del cráter producto de su última erupción, los mapas de pendiente, energía del relieve. En particular, la estructura y forma que ahora tiene el volcán Jocotitlán, son producto de emanaciones de lava andesítica y dacítica de gran viscosidad y poca extensión. El domo que ahora sirve como tapón del cráter, se formó después de la avalancha y está constituido por lavas dacíticas.

Se plantean tres gradaciones para el flujo lávico, todas en relación directa con la topografía, tomando en cuenta las pendientes que están en el volcán, estas últimas participan como móvil para la dirección que tomen. La topografía actual del Jocotitlán, constituida por hummocks proximales, podrían constituir obstáculos para el paso de las coladas, tienen suficiente altura como para bifurcarlos alrededor de ellos (100 metros o más), debido a que no existen indicios en los estudios realizados hasta el momento de lavas en cantidades considerables de no ser las que le dieron formación al edificio, siendo estas muy viscosas, masivas y de corto alcance. De similar composición es el domo que obstruyó la parte central del cráter y que se considera la actividad volcánica más reciente del Jocotitlán.

La localidad que en gran medida podría ser afectada es Pueblo Nuevo, se encuentra a 3 km del cráter, y la infraestructura de comunicación instalada en el edificio volcánico. La dirección de los flujos se determinó con base en la orientación del cráter y la altura del escarpe de este (70 m), que sería difícil de rebasar si la emanación de material se comportará y tuviera la misma composición que las anteriores.

C) Flujos y oleadas piroclásticas

Las zonas de peligro por flujos y oleadas piroclásticas varían ampliamente de un volcán a otro, debido al alto rango de energía de tales eventos. Eventos modelo desarrollados para un volcán, pueden ser aplicados a la zonificación de los peligros en otros volcanes comparables, tomando en cuenta diferencias en la ubicación de los centros de emisión, topografía y otros factores.

Las relaciones de altura a distancia pueden ser utilizados para estimar las distancias potenciales máximas y de esta manera determinar las dimensiones de zonas de peligro por flujos piroclásticos y oleadas (Miller, 1980). Modelos más sofisticados y asistidos por computadora que utilizan las relaciones altura-distancia (métodos de la línea o cono de energía), pueden generar mapas de la extensión potencial de varios tipos de eventos, los cuales pueden servir como mapas de zonificación del peligro (Malin & Sheridan, 1982).

La extensión de una corriente de densidad piroclástica, al igual que en los flujos de lava, depende de variables como el volumen, movilidad, velocidad y transformaciones de flujo. Todas las cuales son difíciles de predecir. Por lo tanto, los límites entre zonas de peligro en los mapas especializados son gradacionales y tiene una ubicación aproximada (Tilling, 1993).

Para el caso de la región del Jocotitlán, el escenario planteado tiene una dirección noreste. Su configuración se basó en la topografía y densidad de disección de la zona, así como las pendientes. Las laderas del volcán no presentan barreras topográficas significativas, por lo que su flujo sería rápido. Según Siebe y colaboradores (1992), registros de depósitos de material pumítico inmediatamente después de la avalancha de escombros avalan la posibilidad de este tipo de actividad en el área. En caso de presentarse, la distribución podría alcanzar grandes dimensiones y solo las alturas de la Sierra de Timilpan (mayores a 3000 m s. n. m.) podrían quedar al margen de la actividad. La altura de las otras formas del relieve, como los hummocks y lomas, alcanza apenas los 2700 m s. n. m. y podrían verse afectadas.

Si este tipo de actividad fuera de dimensiones considerables es probable que rebasen la pared del cráter, que de alguna manera protege a las laderas Sur y Oeste, dándose inmediatamente una afectación a todo tipo de actividad que se presente en esa dirección que ningún tipo de no presentan obstáculo topográfico (por lo menos no a 21 Km de distancia al cráter), lo que se traduciría en una gran pérdida, tanto en población, como en bienes e infraestructura. Es importante señalar que una gran parte del área está ocupada por actividad agrícola y asentamientos humanos importantes como Jocotitlán, Los Reyes, Santiago Yeche, Santa María del Llano, San Bartolo del Llano e Ixtlahuaca de Rayón, así como numerosas localidades más pequeñas.

Las localidades que se encuentran con un grado de peligro alto ante una eventualidad de este tipo son las siguientes: Barrio Cuarto (La Loma), Barrio Cuarto (La Trampa), Barrio Quinto De Maxda (Enzda), Barrio Tercero, La Cañada (San Marcos Tlazalpan), La Cofradía, Colonia Francisco I. Madero (Colonia Nueva Francisco I. Madero), Ejido De San Antonio, Ejido De Santa Cruz, Ejido El Calvario Santiago Acutzilapan, Ejido La Malinche, La Finca, Laguna Seca, Loma De Chivati, La Palma, Puenroo, Rancho San Antonio Trojes (Rancho Trojes), San Bartolo Morelos, San Marcos Tlazalpan, Santiago Acutzilapan, Santiaguito Maxda, Xhinté de Lagos.

D) Avalanchas de escombros

Una avalancha de escombros iniciada por el colapso de un sector significativo del volcán, lleva a la formación de un cráter en forma de herradura, con un diámetro significativo y con una apertura amplia que apunta en dirección del movimiento de la avalancha (Siebert, 1984), como se observa en el Jocotitlán al igual que lo es la actividad post avalancha de construcción de un cono que puede rellenar, cubrir cicatrices, y en diversas ocasiones, funcionar como tapón al cráter (Tilling, 1989).

Este escenario se planteó de acuerdo con la forma en que quedó ubicada la avalancha descrita por Siebe y colaboradores (1992), Salinas, *et al*., (2010), las condiciones morfométricas y topográficas que facilitan y controlan el evento. El ángulo que del cráter se desprende se determinó por la falla normal y escarpe del cráter, que hace suponer que servirá como guía y barrera (respectivamente) para dirigirse en dirección noreste. La falla normal, en dirección E a O, podría servir como zona de deslizamiento en caso de explosión, al ser una zona estructuralmente débil y que, a su vez, amplía en forma significativa una posible afectación en la ladera este. La Sierra de Timilpan, localizada al norte del volcán y descrita por Soler-Arrechalde (1990) como Andesita Yondejé del Terciario, con alturas de más de 3000 m s. n. m., sirvieron de barrera a la avalancha anterior y que, a su vez, sugiere un funcionamiento similar, en caso de una actividad de este tipo.

El análisis de la infraestructura y servicios que se encuentran en las zonas delimitadas en el escenario hacen que la zona aumente su vulnerabilidad, si asumimos que la vulnerabilidad es del 100% ante el efecto destructivo que causa una avalancha de escombros. Las localidades que se encuentran expuestas a un peligro alto, de acuerdo con el escenario planteado, son las siguientes: Barrio Cuarto (La Loma), Barrio Primero (La Calavera), Barrio Quinto de Maxda (Enzda), La Cofradía, Colonia Beltrán (Barrio La Beltran), Colonia Francisco I. Madero (Col. Nueva Francisco I. Madero), Ejido El Calvario Santiago Acutzilapan, La Finca, La Isla de las Aves (La Presa), Laguna Seca, Loma de Chivati, La Palma, Puenroo, San Antonio Yondejé (Yondejé), San Bartolo Morelos, San Felipe Pueblo Nuevo (Pueblo Nuevo), San Marcos Tlazalpan, Santiago Acutzilapan, Santiaguito Maxda, Xhinté de Lagos.

E) Lahares

Los lahares pueden ser contemporáneos a una erupción volcánica (sin-eruptivos) o bien ocurrir unos días o meses después (post eruptivos), o inclusive durante una etapa de quietud de un volcán (intra eruptivos) (Manville *et al*., 2009). No obstante, para que cualquiera de estos se genere, requiere de: 1) una fuente de agua; 2) abundantes escombros no consolidados; 3) pendientes empinadas (Vallance, 2005). El agua puede provenir de la fusión

rápida de nieve o hielo, del agua subglacial, de los lagos cratéricos u otros cuerpos de agua confinada, o bien del agua de lluvia. El origen más común se asocia a lluvias y, en volcanes activos con casquete glaciar, al derretimiento del hielo o nieves. En el caso de lluvias, se requiere de la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos que promuevan la acumulación de un gran volumen de agua. En particular las lluvias que más comúnmente disparan lahares son las de corta duración, pero de elevada intensidad (lluvias orográficas); o lluvias prolongadas por varias horas (lluvias tropicales o huracanes) (Lavigne *et al.*, 2000; Capra *et al.,* 2010). Un estudio detallado realizado en el volcán de Colima demuestra que lluvias con intensidades de 80-100 mm/h pueden disparar lahares después de haber acumulado tan solo 15-20 mm de lluvia (Capra *et al.*, 2010). Por el contrario, en caso de lluvias de moderada intensidad (50 mm/h) pero de larga duración, los lahares se generan después de las 2 o 3 primeras horas de iniciado el evento hidrometeorológico (Martin del Pozo *et al.,* 2016)

En el caso de la zona de estudio, los lahares se verían activados si se da una conjugación entre una erupción de caídas de tefra o cenizas, con las estaciones más lluviosas, que están representadas por el verano, otoño, y probablemente se extienda a el invierno, ya que las pendientes de las laderas del volcán son de entre 35º a 50º, provocando que el material no consolidado se encuentre inestable. Los cauces servirían como guía para el desplazamiento de material, que se encuentran alrededor del volcán, y que en varios de los casos fluirían hasta el cauce del Río Lerma, afectando a su paso a un número considerable de localidades, actividades económicas e infraestructura. Además, existen algunas zonas que están propensas a desbordamientos de los cauces e inundación de terrenos, que en su mayoría son de agricultura de temporal, y en pocos casos de riego.

En verano, es probable que se presenten lahares o flujos de lodo debido a la ceniza depositada en las laderas del volcán, afectando directamente a las zonas de mayor vulnerabilidad: los poblados de Pueblo Nuevo, Santiago Acutzilapan, Santiaguito Maxda y probablemente San Pedro del Rosal ya que no existen barreras topográficas que pudieran desviar dichos flujos.

En otoño, es probable que se formen, afectando directamente a los poblados que se encuentran en la zona de piedemonte del volcán. Posiblemente la distribución de las cenizas tenga un mayor alcance por la presencia de fuertes vientos debido a la influencia de los huracanes que azotan las costas del Golfo de México y el Pacífico.

En el caso de una erupción de ceniza en invierno, es probable que se presente este tipo de proceso, debido a la inestabilidad de las cenizas depositadas en las laderas del volcán y aunado a precipitaciones ocasionadas por la entrada de los frentes fríos propiciados por los nortes. Los poblados que se verían afectados son Pueblo Nuevo, Santiago Acutzilapan, San Antonio Enchisi, San Pedro del Rosal, San Francisco Chalchihuapan, por mencionar los más importantes.

Es importante señalar que los ciudadanos pueden utilizar un mapa de zonificación del peligro para juzgar por sí mismos la relación entre áreas de peligro y sus actividades diarias, así como para identificar sitios que pueden brindar refugio durante una erupción. Para numerosos volcanes se han preparado mapas con variado grado de detalle tanto de información como de escala, lo cual ha significado el correcto entendimiento por los diversos niveles de la población, facilitando las cosas en materia de toma de decisiones, sobre todo en lugares donde la cultura de la protección civil es tomada con seriedad dando como resultado una sociedad con mayor preparación ante este tipo de eventos.

Evaluación del Riesgo, Análisis de los Componentes

La evaluación de los componentes del riesgo en el entorno del volcán Jocotitlán, se realizó a través de la zonificación derivada en los escenarios resultantes de posibles formas de actividad que puede presentar el Jocotitlán. Este análisis se realizó para cada una de las localidades que conforman el área de estudio. Los aspectos utilizados en la evaluación de la vulnerabilidad y el valor en la región del Jocotitlán fueron básicamente las actividades económicas que se desarrollan en el área, el tipo de vivienda y la población total. Para el caso de la preparación se consideraron los aspectos de educación pública, autoridades y planes de contingencia. Esto implica que el grado de Preparación (Q) puede efectivamente reducir el riesgo, por medio de una reducción de la vulnerabilidad o del valor expuesto (De la Cruz-Reyna, 1995).

Para la evaluación de los componentes del riesgo en el área del Jocotitlán se diseñó una base de datos, la cual contiene información sistematizada y almacenada de los elementos expuestos por localidad. Esta base de datos permite la valoración de las variables de riesgo de manera dinámica conforme las condiciones de las actividades económicas, población, servicios e infraestructura cambien en el tiempo, y que se actualicen los datos de fechamientos y caracterización de los depósitos de los materiales volcánicos presentes en la región del Jocotitlán. Los resultados que se obtienen en esta base de datos se representan gráficamente en un mapa a través de las tecnologías de la información geográfica a nivel de localidad y por medio del análisis de interpolación espacial de los componentes del riesgo. Su representación final es un mapa de riesgo con las áreas de afectación de acuerdo con los rangos definidos para cada uno de los componentes.

Análisis general de la población expuesta

La evaluación general de la población expuesta al peligro volcánico en la región del Jocotitlán se realizó a partir de los escenarios derivados de su historia geológica, en donde se definieron rangos de peligro para cada evento volcánico: avalancha de escombros, caída de tefra, flujos piroclásticos, flujos

de lava y lahares. A partir de los procesos de intersección y análisis de las capas de información cartográfica de las localidades, actividades volcánicas y límites municipales en el programa QGIS, se obtuvo una capa de información cartográfica de las localidades con el grado de peligro definido en los escenarios y el municipio al que pertenece.

Los municipios que integran la región considerada para el análisis de las variables del riesgo en el volcán Jocotitlán son: Acambay, Atlacomulco, Chapa de Mota, Ixtlahuaca, Jiquipilco, Jocotitlán, Morelos, San Felipe del Progreso, Timilpan y Villa del Carbón. La población expuesta al peligro volcánico que se encuentra asentada en estos municipios, según INEGI 2010, es alrededor de 230,971 habitantes distribuidas en 208 localidades. La población en localidades urbanas afectada es de alrededor de 129,779 habitantes y la población en localidades rurales es de 101,192 habitantes. Los municipios que tiene mayor población expuesta a un peligro volcánico son Ixtlahuaca y Atlacomulco, con más de 60,000 habitantes cada uno.

La evaluación y análisis del peligro volcánico, de acuerdo con la clasificación planteada en la región del Jocotitlán y representados en los mapas de escenarios, sugiere que los eventos que presentan un mayor peligro a las localidades expuestas son: flujos piroclásticos y avalancha de escombros en 23 y 20 localidades afectadas respectivamente. Las actividades de caída de tefra y lahares representan un peligro medio de acuerdo con las localidades expuestas a este tipo de eventos volcánicos. La actividad que presenta un grado de peligro bajo son los flujos de lava (Cuadro 4).

Cuadro 4
Total de localidades afectadas por tipo de actividad y grado de peligro que presentan de acuerdo con los escenarios planteados

Grado de peligro	Tipo de actividad				
	Avalancha de escombros	Caída de tefra	Flujos piroclásticos	Flujos de lava	Lahares
Bajo	82	55	22	2	0
Medio	0	139	0	0	67
Alto	20	14	23	1	12
S/A	106	0	163	205	129
Total	208	208	208	208	208

Nota: (S/A. Sin actividad: Localidades ubicadas fuera de la delimitación de los escenarios establecidos).

Fuente: elaboración propia.

Análisis del peligro

La diferencia fundamental entre peligro o amenaza y el riesgo está en que el peligro se relaciona con la probabilidad de que se manifieste un evento volcánico, mientras que el riesgo está relacionado con la probabilidad de que se manifiesten ciertas consecuencias, las cuales están íntimamente relacionadas no solo con el grado de exposición de los elementos sometidos, sino con la vulnerabilidad que tienen dichos elementos a ser afectados por el evento (Fournier de Albe, 1985).

Una apropiada evaluación de la probabilidad del peligro se realiza a partir del análisis de la distribución de los eventos, en términos de su tamaño (magnitud e intensidad). Es así que un primer paso a realizar es asignar el tamaño de los últimos eventos y después construir una distribución del número de eventos para las diferentes magnitudes de categoría en un intervalo de tiempo dado (De la Cruz Reyna, *et al.*, 2002). Para determinar la magnitud e intensidad de las erupciones se utiliza la escala del Índice de Explosividad Volcánica (VEI), como una de las formas de cuantificar las erupciones explosivas. Esta escala fue definida por Newhall y Self en 1982, es una escala compuesta donde se toman en cuenta diversas características de una erupción: el volumen de magma emitido, la energía térmica liberada, el alcance de los productos fragmentados, el grado de destrucción causada, la altura de la columna eruptiva y la duración de la erupción. La actividad histórica del volcán Jocotitlán reportada por Siebe y colaboradores (1992), de los materiales depositados alrededor del volcán, reportan tres eventos registrados de depósitos freatomagmáticos y uno de avalancha de escombros. Con estos eventos de la historia geológica del volcán Jocotitlán, se realizó la valoración de la probabilidad del peligro de las actividades (Cuadro 5).

Cuadro 5
Datos de la historia geológica del volcán Jocotitlán

Fecha	Descripción	Fuente
680±80	Depósito freatomagmático	Siebe, 1992.
890±70	Depósito freatomagmático	Siebe, 1992.
1100±70	Depósito freatomagmático	Siebe, 1992.
9690	Avalancha de escombros	Siebe, 1992.

Fuente: elaboración propia.

Con estos registros y de acuerdo con la escala del índice de explosividad volcánica se propone para el volcán Jocotitlán que las erupciones reportadas tuvieron un VEI de tipo 3 en un periodo 1170 años con base en los volúmenes estimados de los depósitos. Respecto a avalancha de escombros se asigna un evento en un periodo de 10,000 años.

Por lo tanto, para determinar la tasa eruptiva de las actividades freatomagmáticas se utiliza la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{Eupciones}{año}$$

Donde:

Erupciones: Eventos reportados
Año: periodo estimado de acuerdo con los depósitos

$$\lambda 3 = \frac{3}{1170}$$

Para el caso de la avalancha de escombros es una estimación aproximada por los registros reportados para el Jocotitlán.

$$\lambda a = \frac{1}{10000}$$

Resultado de la tasa eruptiva de acuerdo con VEI en el volcán Jocotitlán.

VEI	□i (erupciones / año)
3	0.0025
A	0.0001

Para estimar la valoración del peligro de una secuencia de eruptiva volcánica, se utiliza el proceso de Bernoulli. Esto significa, que una sucesión de los intervalos de tiempo (medidos en años, décadas o cualquier otra escala apropiada), se puede considerar como secuencia de ensayos que pueden o no incluir una secuencia eruptiva (De la Cruz Reyna, 1996). Este proceso de Bernoulli está definido por las siguientes consideraciones: Cada ensayo tiene solamente dos resultados posibles: ocurrencia o no ocurrencia de una erupción explosiva (los eventos efusivos de larga duración no se consideran, debido a su duración excede en el intervalo del tiempo). La probabilidad de la ocurrencia de un evento en cada ensayo es una constante. Los ensayos son independientes.

Dado una probabilidad de éxito *p* (y una probabilidad de la no ocurrencia *1- p*), el número de éxitos en un número dado de los ensayos de *n* Bernoulli, es dado por una distribución binomial. La probabilidad de las ocurrencias de *x* en ensayos *n* está dada por la siguiente expresión.

$$B(n, x) = n\,Cxpx(1-p)n-x,$$

Donde ${}_{n}C_{x}p^{x}$ es el número de combinaciones de *n*, tomadas *x* a la vez.

Una primera estimación de la probabilidad de la ocurrencia de futuras erupciones puede obtenerse a partir del resultado de la tasa eruptiva, usando métodos probabilísticos elementales. Puesto que esta probabilidad es una función del tiempo, se puede considerar un intervalo de 50 años, que es una

escala apropiada de tiempo para la planeación y desarrollo (Cuadro 15). Así, la probabilidad de que no ocurran erupciones en 50 años es:

$$B_i\,(50,\, x = 0) = {}_{50}C_0 P^0{}_i (1-p_i)^{50}$$

Donde el índice *i* se refiere a la clase correspondiente del VEI.

La probabilidad de que por lo menos una erupción en el volcán Jocotitlán, de la escala de VEI = 3 ocurra en 50 años, se define a partir de la siguiente expresión matemática:

$$Prn = {}_{50}C_0 P^0{}_i (1-p_i)^{50}$$

La probabilidad binomial de que ocurra por lo menos una erupción similar a la que ha producido los eventos freatomagmáticas de los últimos 1170 años en un periodo de 50 años se define a partir de la siguiente relación:

$$1\text{-}Prn = 0.120$$

Probabilidad de erupciones para las actividades freatomagmáticas en diferentes periodos de tiempo.

VEI	□i (erupciones / año)	$T_i(1)$	10 años	20	30	50
3	0.0025	390	0.025	0.05	0.074	0.12

$T_i(1) = 1/l$, representa el tiempo de recurrencia

La probabilidad de que se presente una avalancha de escombros en un periodo de 50 años está definida a partir de la siguiente relación:

$$1\text{-Prn} = 0.005$$

Se concluye de aquí que, la probabilidad de que se presente una erupción volcánica freatomagmática en un periodo de 50 años es 0.12 que representa el 12%. Y la probabilidad de que se presente una avalancha de escombros en el Jocotitlán es 0.005, que representa el 0.5% de probabilidad. Con estos resultados, se considera que, para todas las localidades que se encuentran asentadas en la región presentan una probabilidad de peligro volcánico del 12% para una actividad eruptiva freatomagmática en un periodo de 50 años. Este resultado se toma en cuenta para la evaluación del riesgo volcánico en el área, debido a que solo se cuenta con registros de este tipo de actividad en la región del volcán y la valoración de la probabilidad de la actividad de la avalancha de escombros es muy burda para el volcán Jocotitlán.

Análisis de la vulnerabilidad

La "*vulnerabilidad*" se define como el grado o porcentaje de pérdida o daño que puede sufrir un elemento de la estructura social (población, infraestructura, productividad) por efecto de alguna de las manifestaciones volcánicas. La vulnerabilidad corresponde a la predisposición o susceptibilidad que tiene un elemento de ser afectado o de sufrir una pérdida. Este análisis es un proceso mediante el cual se determina el nivel de exposición y la predisposición a la pérdida de un elemento o grupo de elementos ante un peligro específico, contribuyendo al conocimiento del riesgo a través de interacciones de dichos elementos con el ambiente peligroso. Los elementos bajo riesgo en el contexto social y material están representados por las personas, los recursos y servicios que pueden ser afectados por la ocurrencia de un evento (Carmona A. *et al*., 1993).

Para valorar y determinar la vulnerabilidad de las localidades asentadas en la región del Jocotitlán, se utilizaron las siguientes variables representadas espacialmente en el área del volcán: 1. el grado de peligro planteado en los escenarios de las siguientes actividades volcánicas: caídas de tefra o cenizas, flujos de lava, flujos y oleadas piroclástico, avalanchas de escombros, Lahares; 2. la morfometría del edificio considerando: Pendiente, Energía del relieve, densidad, profundidad de disección; 3. barreras topográficas naturales; 4. la distancia al cráter de las localidades de acuerdo con los siguientes rangos: 0 a 9 km, 9 a 12 km, más 12 km.

El desarrollo de las tecnologías de la información geográfica ha permitido la manipulación de considerables volúmenes de información, representadas espacialmente, el procesamiento de la información en el programa QGIS, permitió realizar los procesos de intersección, unión, sobreposición, buffer de las capas de información de las variables y se identificaron las localidades que están vulnerables en el área, asignándoles un valor de 0 al 100% de vulnerabilidad.

Según el Censo General de Población y Vivienda 2010 y del cruce de las variables, 102 localidades presentan una vulnerabilidad media que representa el 49% de las localidades asentadas en la región, con una población de 108,883 habitantes que representan el 47% de los habitantes (Cuadro 6).

De acuerdo con los rangos asignados, el municipio que presenta una mayor población vulnerable es Jocotitlán. El municipio de Ixtlahuaca tiene la mayor cantidad de población catalogada en la clase media.

Análisis del valor

Retomando algunas ideas de Ordaz (1996), se puede decir que el valor se refiere a la cantidad de los bienes expuestos susceptibles a afectarse durante un evento volcánico. Las unidades de expresión del valor pueden estar dadas en unidades monetarias y/o expresadas en términos de vidas

humanas. Cuanto mayor sea el valor de los bienes expuestos en una región a un fenómeno volcánico, mayor será el riesgo que tenga esta región. Si por el contrario en la región no hay bienes expuestos que presenten un valor, el riesgo es nulo, independientemente del peligro que presente. La cantidad del valor de los bienes expuestos varía con el tiempo, de acuerdo con la cantidad que se encuentre en la zona, así como del conocimiento anticipado de la ocurrencia del fenómeno en la región.

Cuadro 6
Grado de vulnerabilidad por población y localidades

Rango de vulnerabilidad	Población	%	Localidades	%
Bajo	71,09	30	53	25.5
Medio	108,883	47	102	49
Alto	50,998	23	53	25.5
Total general	230,971	100	208	100

Fuente: Censo de Población y Vivienda, INEGI, 2010.

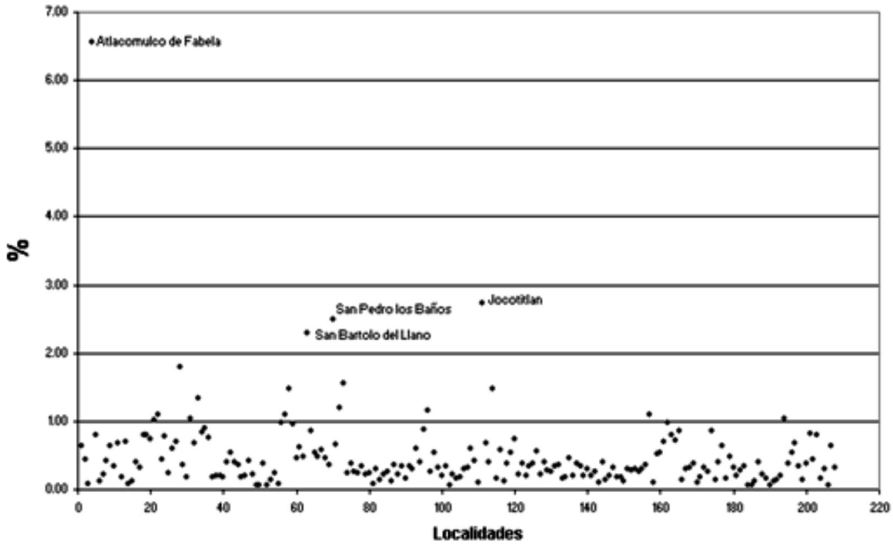
Para determinar el valor de los bienes expuestos de cada localidad en la región del Jocotitlán, se realizó un análisis espacial del número de elementos en la zona, de las actividades socioeconómicas, población total, viviendas habitadas, viviendas con servicio eléctrico, viviendas con servicio eléctrico, total de viviendas con drenaje, infraestructura urbana, actividades productivas, caminos, telecomunicación, líneas de conducción, hidrología, infraestructura hidrológica de esta forma se valoró el grado de valor que tienen los bienes expuestos por cada localidad en la región del Jocotitlán. De acuerdo con análisis de las variables de los elementos expuestos, el resultado indica que las localidades se encuentran dentro de un rango de valor bajo, el 98.1% de las localidades se encuentran dentro del porcentaje de 0.0 a 2.0% (Figura 2).

Estimación del riesgo

El riesgo se obtiene de relacionar el peligro, con la vulnerabilidad y el valor de los elementos expuestos. Para la evaluación del riesgo volcánico en la región del Jocotitlán se realizó una valoración de la probabilidad del peligro, un análisis de la vulnerabilidad y el análisis del valor de los bienes expuestos. Según Carmona, *et al.* (1993), los cambios en uno o más de estos parámetros modifican el riesgo en sí mismo. El riesgo se puede plasmar en mapas, estos representan un "escenario", es decir, la distribución espacial de los efectos potenciales que puede causar un evento de una intensidad definida, sobre un área geográfica

de acuerdo con el grado de vulnerabilidad de los elementos que componen el medio expuesto. Un mapa de riesgo es, ante todo, una herramienta de análisis esencial que, entre otros usos, permite identificar zonas de mayor o menor riesgo frente a diferentes peligros (Rendal, 2017). Un plan operativo elaborado con base en un mapa de riesgo es mucho más eficiente que si se realiza sin conocer dicho escenario de efectos potenciales, dado que este último permite definir procedimientos de respuesta más precisos para atender a la población en caso de desastre (Carmona A., *et al.*, 1993).

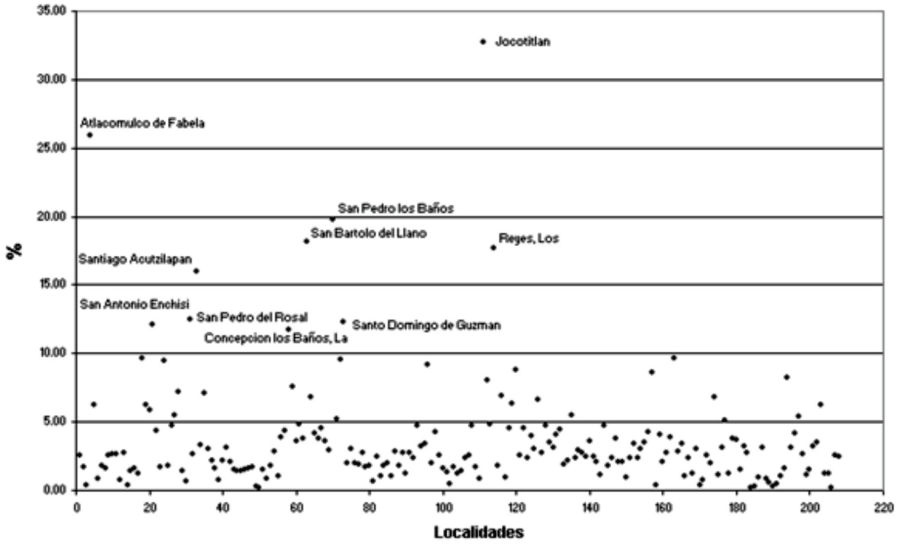
Figura 2. Valor de los bienes expuestos por localidad en Jocotitlán



Fuente: elaboración propia.

El resultado que se obtuvo de la evaluación de los componentes del riesgo está expresado en porcentaje para cada una de las localidades. De acuerdo con análisis de los componentes del riesgo, las localidades que se localizan en la región del volcán Jocotitlán se encuentran en una categoría de bajo riesgo que va de 0 a 33%, con una población expuesta de 230,971 habitantes. En esta categoría, se encuentran 198 localidades en un rango de 0 a 10% con una población de 161,001 habitantes, del 10 a 20% se localizan las siguientes localidades: La Concepción los Baños, Santo Domingo de Guzmán, San Pedro del Rosal, San Antonio Enchisi, Santiago Acutzilapan, Los Reyes, San Bartolo del Llano y San Pedro de los Baños con una población de 48,988 habitantes y en un rango de 20 a 33% se ubican las localidades de Atlacomulco de Fabela y Jocotitlán.

Figura 3. Grado de riesgo volcánico por localidad



Fuente: elaboración propia.

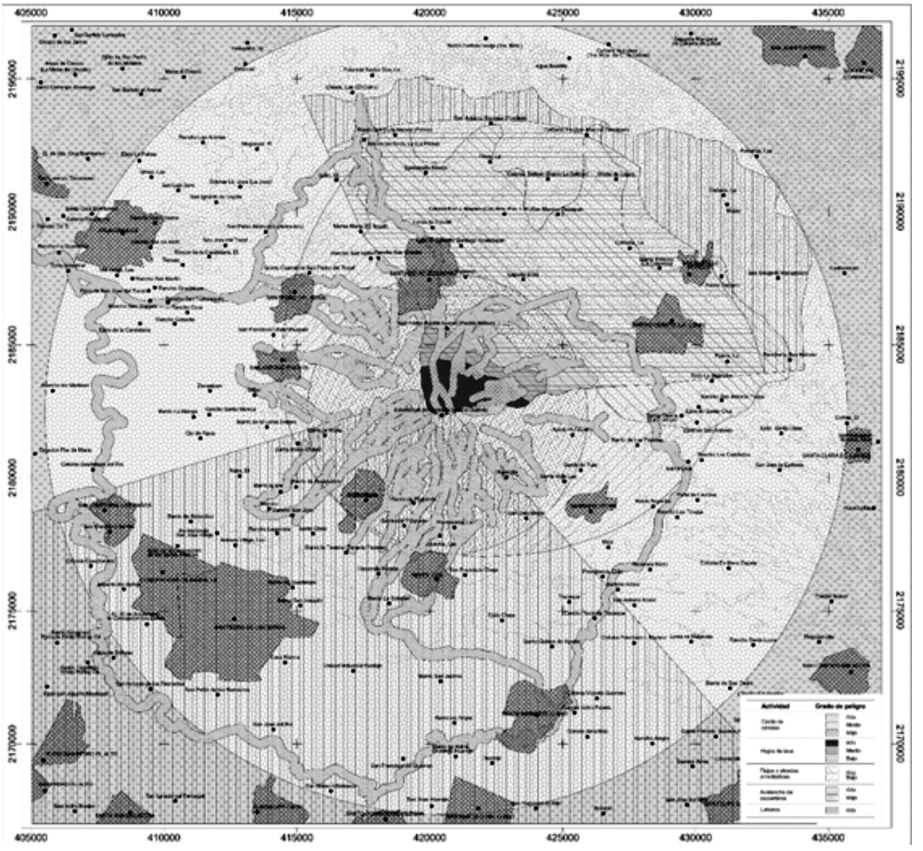
Preparación

La variable de preparación ingresa al modelo como divisor. Cuanto mayor sea la preparación, menor será el riesgo producido por un fenómeno de origen volcánico. Este parámetro reducirá el riesgo mediante una respuesta social o preparación que involucra una serie de medidas para reducir la vulnerabilidad y el valor vulnerable y con ella el riesgo (De la Cruz-Reyna, 1995). Para lograr que la preparación reduzca el riesgo se deben considerar también aspectos de educación pública, programas de mitigación de desastres ocasionados por la actividad volcánica y otros fenómenos naturales, preparación de mapas de zonificación del peligro, planificación de la prevención, monitoreo o vigilancia, predicción y sistemas de advertencia y respuesta (Punongrayam y Tilling, 1989).

Si habitualmente se entiende el concepto de plan de emergencia como un conjunto de procedimientos de coordinación y dirección de actuaciones cuando se produce una situación de emergencia o de naturaleza catastrófica, en el caso de riesgo volcánico, se pretenden ampliar de forma sustancial los objetivos del correspondiente plan, previendo además, de forma sistemática, el seguimiento del fenómeno, las tareas preventivas para minimizar las consecuencias previsibles, las tareas informativas y el propio mantenimiento del plan. En este contexto es necesario, un Plan

Operativo de Protección Civil adaptado a la zona del volcán Jocotitlán, El programa operativo, establecerá las acciones de prevención, auxilio y restablecimiento, destinadas a la protección de la población asentada en la región ante una eventualidad de una erupción volcánica de cualquier origen debe inducir la participación de los sectores: público, privado y social de la región para la coordinación de las acciones que permitan la planeación, implementación y consolidación del programa de Protección Civil del Estado de México, donde se establecerán los mecanismos de acción dirigidas a la población en caso de un evento volcánico.

Figura 4. Mapa de escenarios de peligro



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo ha sido la localización de las zonas de riesgo volcánico en la región del volcán Jocotitlán, mediante la evaluación de sus componentes del riesgo: peligro, valor, vulnerabilidad y preparación, a través del análisis de su historia eruptiva, análisis morfométrico y socioeconómico, para cumplir el objetivo requirió la elaboración de una base de datos de los elementos de estudio y su integración, sistematización, manipulación con las tecnologías de la información geográfica para el análisis y localización de las zonas de riesgo volcánico.

La evaluación del riesgo volcánico en la zona a partir de la metodología empleada permite obtener las bases suficientes para determinar con mayor precisión el uso adecuado de los diferentes espacios geográficos, y los mecanismos necesarios para la protección de la población y sus bienes en caso de un evento destructivo. A las autoridades locales les permite tener algunos criterios de evaluación, prevención y mitigación del riesgo de origen volcánico en la región.

Aunque los resultados indican que el volcán Jocotitlán es relativamente de bajo riesgo (derivado de la baja probabilidad de ocurrencia de erupciones) comparado con otros volcanes del país, la metodología desarrollada aquí puede aplicarse en cualquier otro volcán y también en otras zonas de riesgo, adecuando la naturaleza de las manifestaciones perturbadoras. Para la aplicación de esta metodología en otros edificios se requiere de la instrumentación de las tecnologías de la información geográfica como un sistema de información geográfica para el almacenamiento y análisis de la información.

En este trabajo solo se analizó la probabilidad de las actividades freatomagmáticas por la disponibilidad de los datos de los depósitos de este tipo. Para incorporar la probabilidad de peligro de todas las actividades volcánicas que pudieran presentarse y lograr una evaluación más completa, se requiere de la actualización de la edad de los depósitos de las erupciones que ha producido el volcán Jocotitlán conforme los estudios geológicos y geofísicos se realicen en la región.

Bibliografía

Araña,V. y Ortiz, R., 1984. *Volcanología*. RUEDA-C.S.I.C. Madrid, 528 pp.

Beget, J.E., 1983. "Glacier Peak volcano: A potentially hazardous Cascade volcano, Environ Geol.", 5, p. 83-92, en *Apuntes para un Curso Breve sobre los Peligros Volcánicos*.

Carmona, A., 1993. *Evaluación de la Amenaza, la vulnerabilidad y el Riesgo en Los Desastres no son Naturales Maskey*, compilador. La RED de estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Colombia, p, 51-74.

Capra L., Borselli L., Varley N., Norini G., Gavilanes J.C., Sarocchi D., Caballero C., 2010. "Rainfall-triggered lahars at Volcán de Colima, Mexico: surface hydro-repellency as initiation process". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189, 105-117.

Crandell, D.R., 1980. "Recent eruptive history of Mount Hood, Oregon, and potential hazards from future eruptions, U.S. Geol". Surv. Bull. 1492, 81 pp. *En Apuntes para un Curso Breve sobre los Peligros Volcánicos.*

Crandell. D.R., B. Booth, K. Kusumadinata, D. Shimozuru, G.P.L Walter, and D. Westercamp, 1984. *Source-Book for Volcanic-Hazard Zonation*, 97 pp., UNESCO, Paris.

De la Cruz-Reyna, S., 1995. "Un código de alerta para el manejo de emergencias volcánicas antes y durante potenciales erupciones del volcán Popocatépetl". *En Volcán Popocatépetl*. Estudios Realizados Durante la Crisis 1994-1995. CENAPRED, Mexico, p. 327-334.

De la Cruz-Reyna, S. y E. Ramos-Jiménez, 1992. *Volcanes*, CENAPRED, México, D.F., CENAPRED, No 4, 36 pp.

De la Cruz-Reyna, S. y G. Carrasco Núñez, 2002. "Probabilistic hazard analisis of Citlaltepetl (Pico de Orizaba) Volcano, eastern Mexican Volcanic Belt", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 113 p. 307-318.

De la Cruz-Reyna, S., M.A. Armienta, V. Zamora y F. Juárez, 1989. *Chemical changes in springs waters at Tacaná volcano, Chiapas, Mexico: a possible precursor of the may 1986 seismic crisis a phreatic explosion. Comunicaciones Técnicas no. 99*, Instituto de Geofísica, 18 pp.

Espíndola, J.M., 1991. "Bases Geofísicas y Geoquímicas de la Vigilancia de Volcanes Activos", *Ciencia*, v. 13, No 2, p. 185-201.

Fournier D´Albe, E.M., 1979. «Objectives of volcanic monitoring and prediction", *J. Geol. Soc. London*, Vol. 136, p. 321-326.

Fournier de Albe, M., 1985. *The quantification of seismic hazard for the purposes of assessment*. International Conference on Reconstruction and Urban Planning and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje, Yugoslavia.

Gobierno de Estado de México, 1996. *Guía para la Elaboración de Programas Específicos de Protección Civil.* Secretaría General de Gobierno, Dirección General de Protección Civil.

Kuntz, M.A., D.E. Champion, E.C. Spiker, and R.H. Lefebvre, 1986. "Contrasting magma types and steady-state, volume-predictable basaltic volcanism along the Great Rift, Idaho, Geol. Soc". Amer. Bull., 97, no. 5, p. 579-594. *En Apuntes para un Curso Breve sobre los Peligros Volcánicos.*

Lagar Timon D., 2016. "Los sistemas de información territoriales como herramienta de análisis en la Diputación de Cáceres". 129-140 pp. En T*ecnologías de la información geográfica en el análisis espacial. Aplicaciones en los Sectores Público, Empresarial y Universitario.*

Lavigne F., Thouret J.C., Voight B., Suwa H., Sumaryono A., 2000, "Lahars at Merapi volcano, Central Java: an overview". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 423-456.

Macías, J.L., Carrasco, G., Delgado, H., Martin del Pozo, A.L., Siebe, C., Hoblitt, R.P., Sheridan, M.F., y Tilling, R.I., 1995, *Mapa de Peligros del Volcán Popocatépetl*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, 1 mapa

Martin del Pozzo, A.L., Sheridan, M.F., Barrera, D., Lugo-Hubp J., Vázquez-Selem, L., 1995. *Mapa de Peligros del Volcán de Colima*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, 1 mapa

Pozzo, A. & Alatorre-Ibarguengoitia, M. & Bonasia, Rosanna & Capra, Lucia & Cassata, W. & Cordoba, Gustavo & Cortés-Ramos, Jorge & Delgado Granados, Hugo & Ferrés, Dolors & Álvarez, R. & García-Reynoso, A. & Gisbert Pinto, Guillem & Guerrero, Diana & Jaimes-Viera, Carmen & Vázquez, José & Obregón, J. & Nieto-Torres, Amiel & Ruiz, P. & Martínez, J. & Ugalde, E., 2016. *Memoria Técnica Mapa Peligros Popocatépetl.*

Malin and M. F. Sherida., 1982. *Computer-Assisted Mapping of Pyroclastic Surges*: M. C. 217 (4560): 637-640.

Manville V., Németh K., Kano K., 2009. "A review of three decades of progress in the understanding of volcaniclastic processes, deposits, and hazards". *Sedimentary Geology*, 220, 136-161.

Newhall, C. G., & Self, S., 1982. "The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism". *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C2), 1231-1238.

Ordaz, M., 1996. "Algunos Conceptos del Análisis de Riesgo", Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) México, *Prevencion* Número 14, p. 6-11.

Sheridan M.F., Carrasco-Núñez G., Hubbard B.E., Siebe, C., Rodríguez-Elizarraráz, S., 2001, *Mapa de Peligros del Volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba), escala 1:250,000*. Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Puebla, Gobierno del Estado de Veracruz, 1 mapa.

Servicio Geológico Mexicano, 2002. *Carta Geológico-Minera ciudad de México*, E14-2. Edo de Méx., Tlax., D.F., Pue., Hgo. y Mor.

Siebe, C., J.-C. Komorowski and M.F. Sheridan, 1992. "Morphology and Emplacement of an unusual Debris-Avalanche Deposits at Jocotitlán Volcano, Central Mexico". *Bull Vulcanol*, V.54, p. 583-589.

Siebert, L., 1984. "Large volcanic debris avalanches: characteristics of source areas, deposits and associated eruptions. J Volcanol Geotherm Res 22: p. 163-197". En *Morphology and emplacement of an unusual debris-avalanche deposit at Jocotitlan volcano, central México.*

Siebert, L., H.X. Glicken and T. Ui, 1987. "Volcanic hazards from Bezymianny- and Bandai-type eruptions. Bull Volcanol 49", p. 435-459. En *Morphology*

and emplacement of an unusual debris-avalanche deposit at Jocotitlan volcano, central México.

Soler Arechalde, A.M., 1990. *Paleomagnetismo de la Región de Acambay Faja Volcánica Transmexicana,* Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, UACP y P de CCH, UNAM.

Rendal E., Rozas Garay M., Moscardini O., Patricia Torchia N., 2017. *Manual para la elaboración de mapas de riesgo,* Programa Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD Argentina y Ministerio de Seguridad de la Nación de Argentina.

Tilling, R.I., 1984. "Eruptions of Mount St. Helens: Past, present, and future: U.S." *Geological Survey general – interest publications series*, 46 pp.

Tilling, R.I., 1989. "Editor, Short Course in Geology": Volume 1. *Volcanic Hazards: American Geophysycal Union*, Washington, D.C., 123 pp.

Tilling, R.I., Editor; Beate, B., 1993. *Traductor, apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos: organización mundial de observatorios vulcanológicos world organitation of volcano observatories (WOVO), Santa Fé, Nuevo México, U.S.A.* 125 pp.

Tilling, R.I., M. Rubin, H. Sigurdsson, S. Carey, W.A. Duffield and W.I. Rose, 1984. "Holocene eruptive activity of El Chichón Volcano, Chiapas, México": *Science*, v. 224, No. 4650, p. 747-749.

Vallance J.W., 2005, "Volcanic debris flows". En *Debris-flows hazards and related phenomena,* Jakob M. and Hungr O. Springer, Berlin, 247-272.

2.9. Cambios costeros contemporáneos y sus riesgos: algunas aproximaciones metodológicas

Alexis Ordaz Hernández

Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

José Ramón Hernández Santana
Ana Patricia Méndez Linares

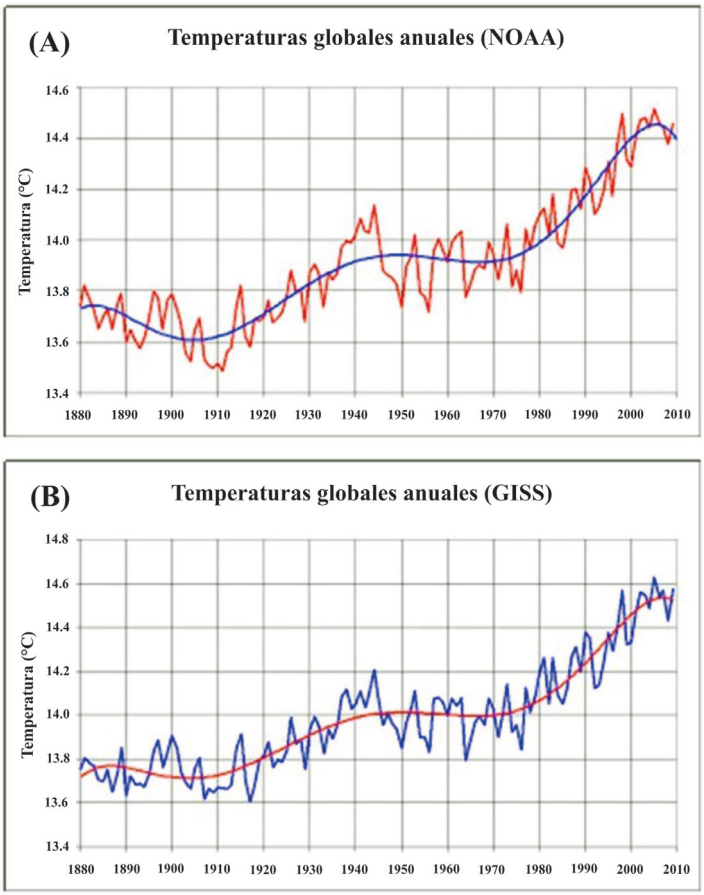
Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Desde la segunda mitad del siglo XVIII, se produjeron importantes transformaciones con la revolución industrial. La economía mundial, basada principalmente en la agricultura y el comercio, se hizo cada vez más dependiente de la industria. Desde entonces, la necesidad de energía basada en la combustión de hidrocarburos ha ido en ascenso. En la actualidad, ya se sobrepasa el umbral de las 40000 megatoneladas anuales de gases de efecto invernadero, donde China, Estados Unidos de América y los países de la Unión Europea, encabezan la lista de los más contaminadores (Banco Mundial, 2019), mientras que Canadá, Estados Unidos de América y Rusia, emiten la mayor cantidad de gases per cápita.

Derivado de lo anterior, se ha producido un incremento paulatino de las temperaturas en el planeta (Figura 1), provocando el deshielo de grandes extensiones de los casquetes polares y glaciares montañosos, y el consecuente aumento del nivel medio del mar. Por ejemplo, en México, según datos aportados por Vázquez (2008), en ciudad Madero, Estado de Tamaulipas, entre el año 1962 y 1979, el ascenso del nivel medio del mar (m s. n. m.) mantuvo una tendencia al incremento de +9.16 mm/año, mientras, que las costas de ciudad del Carmen, en el Estado de Campeche, en el periodo 1956 a 1990, experimentaron un incremento de unos +3.38 mm/año.

Figura 1. Incremento de la temperatura desde el año 1880, según el NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y GISS (NASA Goddard Institute for Space Studies)



Fuente: tomado de http://cambioclimaticoenergia.blogspot.com/2010/05/temperaturas-globales-del-ano-2009.html.

Sin embargo, las tendencias del nivel medio del mar, medidas por los servicios mareográficos, no necesariamente son uniformes, pues la corteza continental experimenta procesos tectónicos recientes, de ascenso o descenso; así como reacomodo de los bloques continentales, en ocasiones acelerados por sismos. Tal es el caso de Acapulco, en ael Estado de Guerrero, donde el Servicio Mareográfico Nacional, en el periodo 1952 a 1999, demostró una tendencia negativa de -2.44 mm/año del nivel medio del mar, a partir de 36 mediciones en el periodo anteriormente mencionado.

Algunas predicciones sobre el ascenso del nivel medio del mar, reflejan la gran crisis ambiental de las zonas costeras para las próximas décadas: 10 cm para el 2025 (Hanson y Maul, 1993); 10 y 20 cm, en el siglo XXI (Raper, 2000); entre 50 y 90 cm (IPCC, 1998); de 2 a 5 veces sobre lo propuesto por Raper (2000), para el presente siglo (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático-IPCC, 2001); de 13 a 68 cm (IPCC, 2001) y de18 a 59 cm para este siglo (IPCC, 2007).

El GEF-PNUD (1999) calculó ascensos de 2.9 mm/año para Cuba y con una proyección de ascenso de entre 8 y 44 cm para el 2050 (Pérez, 2003). Algunos ejemplos de retrocesos costeros por esta situación se presentan en Bretaña, con 1.0 m/año; en la isla japonesa de Nii Jima, entre 2.3 y 2.9 m/año; en la costa inglesa de Lyme Bay existe un retroceso de 40 m/siglo (Fernández-Suárez, 2005). El retroceso en las costas de la Federación Rusa también registra valores significativos por la abrasión marina: Mar Báltico, 0.5-2.5 m/año; Mar del Lejano Oriente, 0.5-2.0 m/año; Mar Negro, 0.3-0.5 m/año; y Mar de Azov, 1.8-2.0 m/año (Pastuchkova, 2006).

Otras tasas sensibles de ascensos del nivel medio del océano se presentan en el Mar Negro (52.5 cm/siglo), algunas partes de Indonesia (30 cm/siglo), en la región de Venecia (30 cm/siglo), en los Países Bajos (20 cm/siglo), en la costa sureste de Inglaterra (10 cm/siglo) (Fernández-Suárez, 2005). Una de las predicciones más utilizadas es la de Warrick *et al.* (1996), quien plantea, según sus modelos experimentales, ascensos de 49 cm para el 2100. A su vez, Miller *et al.,* (1994) señalan que la aceleración del ascenso del nivel del mar en las costas de New Jersey, desde hace 5 000 años hasta unos 200 años atrás, era de 1 mm/año, lo que contrasta con su duplicación a 2 mm/año, a partir de los reportes mareográficos desde 1850, y satelitales más recientes. Para la región argentina de Quequén, Lanfredi *et al.* (1998) pronostican ascensos de 1.6 ± 0.2 mm/año.

Ante subsidencias sostenidas de la corteza terrestre y sobre-consolidación sedimentaria de sus cuencas neógeno-cuaternarias, muchos sectores costeros del Golfo de México experimentarán retrocesos mayores de sus costas. Morton *et al.,* (2005) obtuvo resultados notables en las costas de los estados de la Florida, Alabama, Mississipi, Lousiana y Texas, en los Estados Unidos de América, comparando varios niveles temporales, desde mediados y finales del siglo XVIII hasta el 2002). El análisis de un total de 25778 perfiles transversales, arrojaron un promedio general de 73.6% de sectores costeros con un retroceso significativo, del orden de -14 m/año. El promedio del proceso de retroceso es de -2.78 m/año, con promedios extremos entre -8.2 y -3.1 m/año. Otros territorios de la cuenca del Golfo, como la Isla de Cuba, señalan retrocesos de costa 3 m/año (Pérez, 2003) en varias playas de su costa suroccidental.

Con respecto a las costas mexicanas del Golfo, en Tabasco, los resultados de las interpretaciones por cartografía comparativa, entre los años 1943-1958 y 1972-1984 (Ortiz, 1992; Ortiz y Benítez, 1996), muestran una tasa media anual de -8 m, con años extremos de hasta -15 m/año, en la desembocadura del Río San Pedro-San Pablo, y en la costa de Atasta se mantienen valores de -8 a -9 m/año, con extremos hasta de -21 m/año.

Investigaciones durante la década anterior, arrojaron datos alarmantes en algunos sectores, por ejemplo, en las localidades de Sánchez Magallanes hasta Playa El Limón (-9 y -11 m/año); en El Manatinero, en Playa Azul y hasta las Playas Dos Bocas y Bruja (-4 y -7 m/año); en La Unión y en Tupilquillo (-0.7 y -2.5 m /año) (Hernández-Santana *et al.,* 2008).

Los efectos adversos de este proceso transgresivo del mar sobre las zonas costeras actuales son la erosión de las costas, las inundaciones marinas temporales o permanentes y la salinización de los suelos cultivables, del escurrimiento superficial y del manto freático cercano que, a su vez, influyen en las características estructurales y en la distribución espacial de los ecosistemas asociados (Pannier, 1992) y, por otro lado, se altera la verdadera vocación original del uso del suelo, determinando el abandono del territorio (Hernández, 1999).

El impacto que ha causado el ser humano puede ser más dramático para países insulares, muy vulnerables a la salinización de sus suelos y acuíferos. Por ejemplo, pronósticos realizados por Salas *et al.* (2006), indican que el mar puede avanzar más de cinco kilómetros, en algunos puntos de la costa sur del occidente de Cuba, para el año 2100.

Una pieza clave para la comprensión de los riesgos costeros, son los bosques de manglares y humedales, en general. Los manglares, además de su relevancia por la rica biodiversidad que albergan, constituyen una protección natural para las costas. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, indican que Indonesia, México, Pakistán, Papúa Nueva Guinea y Panamá, registraron las mayores pérdidas de manglares durante los años 80. En este grupo de países desaparecieron cerca de un millón de hectáreas (FAO, 2008).

Las situaciones presentadas ilustran las lamentables consecuencias de las acciones humanas, las cuales han provocado serios desequilibrios en los ciclos biogeoquímicos globales, irreversibles modificaciones al funcionamiento y la dinámica de los procesos naturales, fundamentalmente los atmosféricos, hidrológicos y biosféricos, y amenazantes variaciones en el nivel medio del océano mundial, determinando la transgresión antropogénica de nuestros tiempos, con daños irreparables al sistema costero, tanto a las costas como a los ecosistemas y los asentamientos humanos. En este sentido, el presente capítulo, pretende discutir los métodos y las técnicas más empleados en el análisis de la vulnerabilidad y los riesgos costeros.

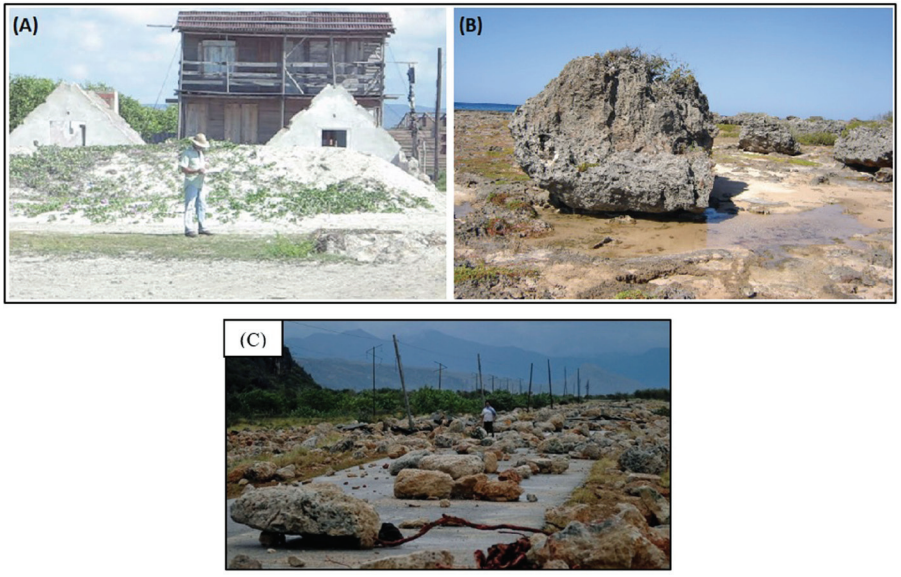
Algunas aproximaciones metodológicas

Existen numerosos métodos y técnicas para abordar las modificaciones ocurridas durante el Antropoceno en las zonas costeras. El Antropoceno es la época geológica que sucede al Holoceno, en el actual período Cuaternario, muy marcada por las transformaciones medioambientales generadas por el hombre. Esta época aún no es reconocida en el Cuadro crono-estratigráfica internacional (*International Commission on Stratigraphy*, 2019). Sin embargo, más allá de su formalización, lo

importante es su significado, ligado al impacto ambiental causado por el hombre acentuado desde la Revolución Industrial.

Las transformaciones antropocénicas de la línea de costa, deben ser interpretadas en función de las escalas espaciotemporales, en que se manifiesta el fenómeno que las origina. Por ejemplo, fenómenos hidrometeorológicos extremos, como los huracanes, de poca frecuencia, pero de alta energía, pueden ocasionar cambios importantes en la estructura y morfología de las costas. En este caso, los cambios post eventos pueden consistir en: a) pérdida definitiva de volúmenes de arena y avance de la línea de costa tierra adentro. En ocasiones, parte de los sedimentos erosionados vuelven al sistema sedimentario litoral; b) avance de la línea de costa tierra adentro, por reacomodo de los sedimentos costeros (Fotografía 1A); c) arribo de huracanolitos al litoral (Fotografía 1B y 1C), durante marejadas extremas, asociadas a eventos hidrometeorológicos extremos; d) destrucción de ecosistemas y pérdida de biodiversidad; e) severos daños a la infraestructura y los asentamientos costeros, con pérdidas de vidas humanas; f) migraciones humanas hacia lugares más protegidos, alejados de la costa; entre otros.

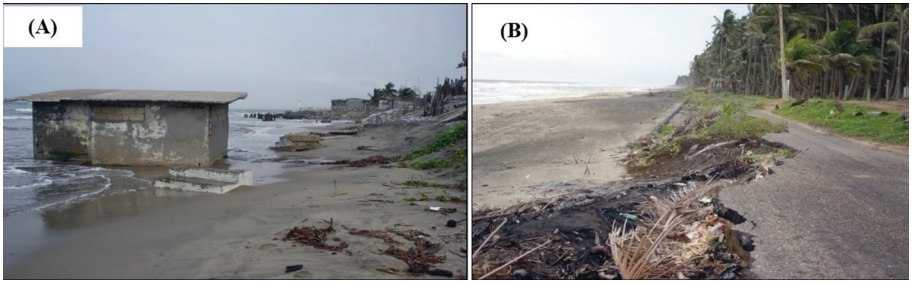
Fotografia 1. Cambios post evento hidrometeorológico extremo. A: Duna formada súbitamente en la Playa Boca de Galafre (sur de la Isla de Cuba), por el reacomodo de arenas durante el Huracán Iván (Categoria IV), en el año 2004, B: Costa aterrazada con huracanolitos, en Peñas Altas, Santiago de Cuba y C: Costa baracoense, noreste de la Isla de Cuba, con huracanolitos durante el Huracán Matthew, en 2016.



Fuente: Fuente: Foto A tomada por Alexis Ordaz Hernández, Foto B publicada en Iturralde-Vinent y Méndez (2015) y Foto C publicada en La Razón Digital, AFP, el 5 de octubre de 2016.

En contraposición a los eventos súbitos, como los sismos y los hidrometeorológicos, se ubican los procesos erosivos a largo plazo, menos perceptibles, pero que, debido a la existencia de un balance sedimentario negativo en la franja litoral, conllevan no solo a la pérdida de sedimentos y el retroceso de la costa, sino también a una intensificación de los procesos erosivos y daños a la infraestructura (Ojeda, 2000). En la Fotografía 2, se muestran daños severos en la infraestructura del poblado de Sánchez Magallanes, zona costera de Tabasco, donde en un comparativo temporal de 10 años, la línea de costa ha retrocedido hasta 30 metros (Hernández-Santana et al., 2008).

Fotografía 2. Daños en la infraestructura del litoral de Tabasco



Nota: A: retroceso de la costa en la localidad de Sánchez Magallanes (septiembre de 2004). B: ruptura de la carretera costera como resultado del retroceso de la costa, en el poblado El Alacrán (septiembre de 2004). Fuente: fotografías tomadas por Ana Pºatricia Méndez Linares.

En cualquiera de las circunstancias, ya sea un evento súbito o de largo plazo, la principal tarea en los estudios de riesgos costeros es definir con claridad la evolución que ha tenido la línea de costa. Con esta información, se realizan pronósticos, partiendo de la premisa que los factores condicionantes y detonantes de la erosión, permanezcan aproximadamente constantes.

Tradicionalmente, los cambios en la posición de la línea de costa han sido estimados mediante el cálculo de las tasas de erosión o acreción. Generalmente, lo más usual, es que se exprese en m/año, pero pueden usarse otras magnitudes, según las particularidades del estudio. En este sentido, la mayor evolución técnica se ha dado en las fuentes de información para el trazado de las líneas de costas actuales o históricas. Donde, las principales fuentes de información son: la cartografía (A), la fotografía aérea (B) y las imágenes de satélite (C).

A) La cartografía es quizás el recurso más tradicional empleado para este fin. La principal ventaja consiste en que es una fuente de información estándar, en cuanto al nivel de calidad y, generalmente, existe para la mayoría de los escenarios geográficos. Las limitaciones se deben fundamentalmente a la escala, deterioro por el paso del tiempo y al sistema de proyección utilizado, en este caso, al desplazamiento por el *datum* de referencia horizontal (Anders y Byrnes, 1991; Crowel *et al.,* 1991).

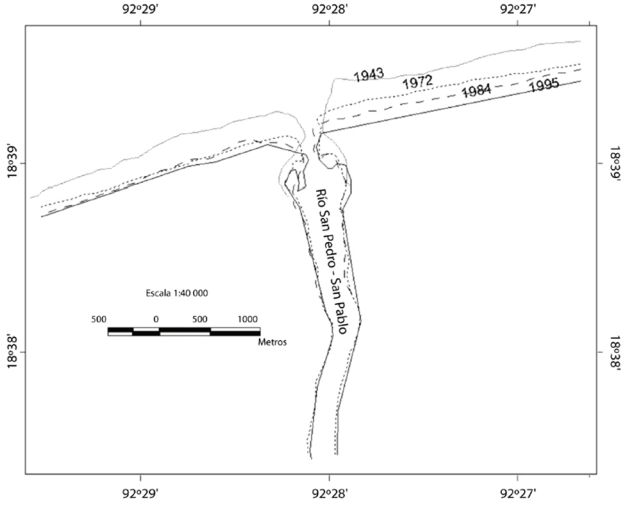
A manera de ejemplo, se ilustran los resultados de Hernández-Santana *et al.,* (2008) para el análisis de la morfodinámica de la línea costera del Estado de Tabasco, México, donde se empleó principalmente la cartografía publicada por el INEGI (Cuadro 1) y levantamientos topográficos realizados en el año 2003. Los resultados demostraron gradientes morfodinámicos máximos de retroceso costero, entre -9 y -11 m/año, en las localidades de Sánchez Magallanes, El Alacrán, Playa El Limón y desembocadura del río San Pedro y San Pablo (Figura 2).

Cuadro 1
Hojas cartográficas de INEGI empleadas en el análisis de las tendencias morfodinámicas de la línea de costa del Estado de Tabasco

Código	Nombre	Sistema de georreferenciación y año de edición	
		NAD27 - Esferoide Clarke (1866) Proyección Transversa de Mercator INEGI	ITRF92 - Elipsoide GRS80 Proyección Transversa de Mercator INEGI
E15A77	Sánchez Magallanes	Fecha de vuelo 1984; 1ª. edición, 1985	Fecha de vuelo 1995; 3ª. edición, 1999
E15A87	Benito Juárez	Fecha de vuelo 1984; 1ª. edición, 1985	Fecha de vuelo 1995; 2ª. edición, 1998
E15A78	Cocohital	Fecha de vuelo 1984; 1ª. edición, 1985	Fecha de vuelo 1995; 2ª. edición, 1998
E15A79	Comalcalco	Fecha de vuelo 1972; 1ª. edición, 1982	Fecha de vuelo 1995; 3ª. edición, 2000
E15B71	Villa Vicente Guerrero	Fecha de vuelo 1972; 1ª. edición, 1980	Fecha de vuelo 1995; 3ª. edición, 2000
E15B61	Felipe Carrillo Puerto	Fecha de vuelo 1972; 1ª. edición, 1980	Fecha de vuelo 1995; 3ª. edición, 2001
E15B62	Frontera	Fecha de vuelo 1972; 1ª. edición, 1980	Fecha de vuelo 1995; 3ª. edición, 1999

Fuente: tomado de Hernández-Santana et al., 2008

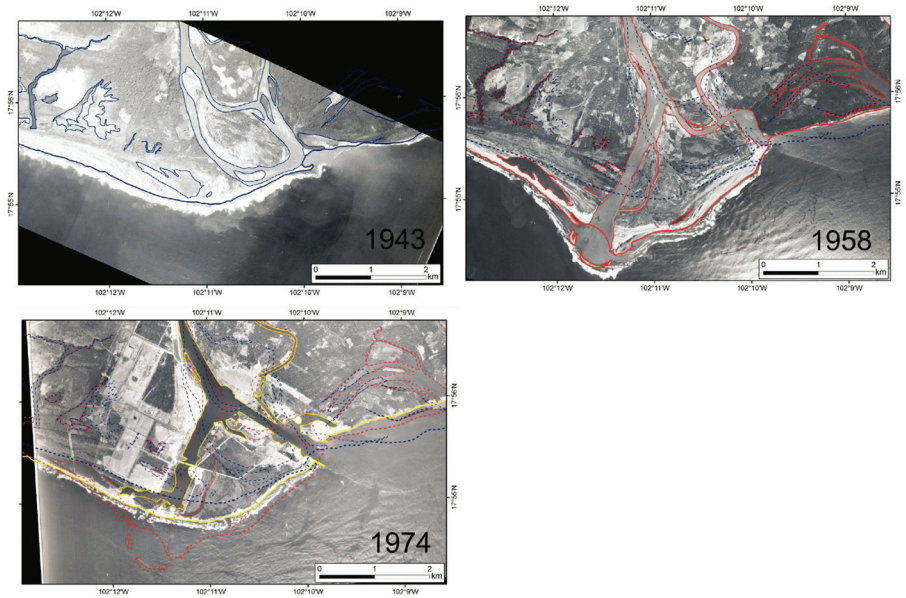
Figura 2. Retroceso de la línea de costa en la desembocadura del río San Pedro y San Pablo, Estado de Tabasco



Fuente: figura modificada, a partir de Ortiz y Benítez, 1996, y de Hernández-Santana *et al.,* (2008).

B) Por su parte, la fotografía aérea se apoya en vehículos aéreos y brinda la posibilidad de planificar el barrido de la zona de estudio. Además, permite apreciar los componentes del paisaje y sus interrelaciones particulares (Thowinsson, 2018). La aplicación de la fotografía aérea consiste en el diseño de líneas de vuelos fotográficos sobre una cobertura territorial. Las imágenes generadas de cada sitio permiten dar seguimiento y realizar análisis sobre los cambios que se experimenten en el ecosistema (Fernández, 2000). En la Figura 3, se muestra un ejemplo de aplicación de la fotografía aérea, realizado por Ortiz *et al.* (2017), para la interpretación de los cambios de la línea costera en el delta del río Balsas, en el Pacífico mexicano.

Figura 3. Cambios morfológicos de la línea de costa y de la trayectoria de los brazos distributarios en los años 1943 (color azul), 1958 (color rojo) y 1974 (color amarillo)



Fuente: tomado de Ortiz *et al.*, 2017.

C) El estudio de las variaciones en la línea de costa y los fenómenos de erosión y acreción, en la actualidad, tiene un mayor soporte, gracias al desarrollo de las geotecnologías y a la accesibilidad de los datos espaciales, como son mapas los históricos, las fotografías aéreas, las ortofotos y las imágenes de satélite. Una de las técnicas más utilizadas para la extracción de esta línea de costa es partir del procesamiento digital con las imágenes de satélite, que demuestran ser una herramienta eficaz (Boak y Turner, 2005). Existen otras técnicas como el LIDAR, que permite cubrir varios kilómetros

de costa en un periodo de tiempo corto, pero con la limitación temporal y su alto costo (Stockdon *et al.,* 2002), los sensores de microondas para generar MDT y las imágenes de video, cada una con sus ventajas y desventajas.

El empleo de las imágenes de satélite de alta resolución, permiten la interpretación y el cálculo de cambios de la línea de costa y de volúmenes de ganancia y/o pérdida de volúmenes sedimentarios, aspectos vitales para determinar la peligrosidad y vulnerabilidad costeras. Boretto *et al.* (2018) utilizaron imágenes de 1 m resolución, así como modelo de elevación digital de 12.5 m y 30 m de resolución respectivamente, en el desarrollo de investigaciones en las costas uruguayas. Los resultados arrojaron que la urbanización en el sector costero restringe la dinámica de la arena, incrementando la vulnerabilidad a la erosión con la consiguiente pérdida de las playas. Conclusiones de esta naturaleza requieren el uso de imágenes satelitales de alta resolución.

Otros tipos de imágenes satelitales, de mediana resolución (30 m en las bandas del visible e infrarrojo cercano y medio; 60 m en el infrarrojo lejano o térmico y 15 m en la banda pancromática), como la serie de imágenes LANDSAT, permiten evaluaciones más gruesas para análisis de cambios de línea costera, pérdidas sedimentarias e incluso para valoraciones de vulnerabilidad en la cobertura del suelo (Córdova-Aguilar *et al.,* 2006), por lo que no son aconsejables para mediciones de los morfoelementos de playa (berma, dunas, etc.) y sus cambios.

Para investigaciones y análisis de los cambios de cobertura terrestre y usos de suelo, así como para evaluaciones costeras y riesgos costeros, son de excelente calidad las imágenes satelitales de SPOT 6 y 7 Bundle, con una banda pancromática y cuatro multiespectrales y 1.5 m de resolución del pixel, así como las imágenes SENTINEL, lo que permite el cálculo preciso de las dimensiones del microrrelieve costero, los contactos lito-estratigráficos, las variaciones morfodinámicas y los cambios de las actividades humanas sobre el terreno.

En los subapartados anteriores, se han explicado las diferentes fuentes de información, que facilitan la vectorización de las líneas de costa y, de este modo, obtener tendencias o tasas de erosión o acreción. Es importante aclarar, que en la actualidad este tipo de trabajos se soportan sobre sistemas de información geográfica. Incluso, se han desarrollado herramientas automatizadas para el cálculo simultáneo de tasas de erosión o acreción, esto para múltiples puntos de control establecidos previamente. Por ejemplo, una de las herramientas más recientes lo constituye el software *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), desarrollado por el Departamento del Interior y el Servicio Geológico de los Estados Unidos de América (Himmelstoss *et al.,* 2018).

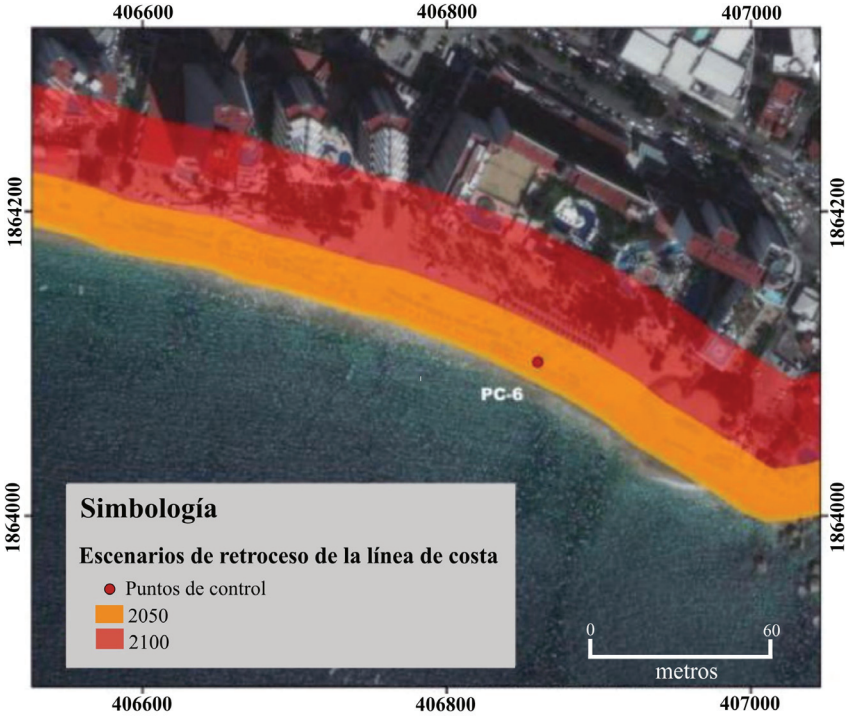
En México, algunos especialistas han aplicado este software en sus investigaciones, como Jiménez-Orocio (2010), en las costas veracruzanas; Bustamante-Fernández (2014) y Morales *et al.* (2019), en sitios seleccionados de Veracruz con fines de

emplazamiento de prototipos ingenieros para el aprovechamiento y conversión de la energía undimotriz en microgeneración eléctrica.

La determinación de la evolución de la línea de costa, y la estimación de la velocidad con que han ocurrido los cambios, constituyen una herramienta importante en la gestión del riesgo costero. Partiendo de la premisa, que aproximadamente los escenarios geográficos mantendrán igual tendencia y, en este sentido, uno de los productos que se pueden generar, consisten en los escenarios predictivos. Los escenarios predictivos, o simplemente pronósticos, permiten poner en perspectiva los cambios futuros que ocurrirán en las costas, y define con buenos niveles de certidumbre la infraestructura que potencialmente puede ser afectada.

En la Figura 4, se muestran los escenarios de retroceso de la línea de costa para la playa El Morro, en la Bahía de Acapulco, propuestos por Gómez (2019). Para este caso de estudio, se realizaron pronósticos de zonas potencialmente erosionadas, para los años 2050 y 2100.

Figura 4. Escenarios de retroceso de la línea de costa para la playa El Morro en la Bahía de Acapulco



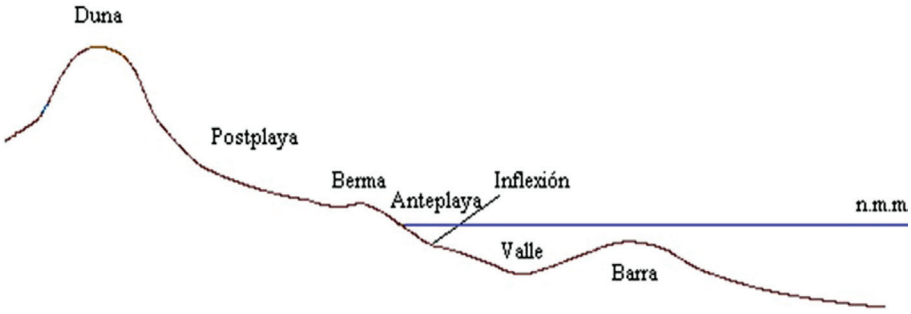
Fuente: tomado de Gómez, 2019.

El posicionamiento y pronóstico de las variaciones de la línea de costa, por sí solo, constituye un recurso técnico importante, pero no es el único que permite acercarse a las condiciones de riesgo costero. Existen otros enfoques, que pueden considerarse complementarios o incluso determinantes. En este caso, se ubican:

- Análisis de los perfiles de playas para conocer cambios geométricos (longitud, inclinación, ancho, etc.) de sus morfoelementos (berma, dunas embrionarias, cadenas de dunas).
- Análisis del deterioro de los bosques de manglar.
- Análisis granulométrico de los sedimentos de playas.

Los perfiles de playas son el resultado de los procesos de transporte y acumulación de sedimentos, que ocurren en los litorales (Figura 5). En los estudios de riesgo costero, su aplicación consiste en monitorear los cambios temporales que van sucediendo en un perfil determinado. En el ejemplo de la Figura 6, correspondiente a la playa Bailén, al sur de la ciudad de Pinar del Río, Cuba, se aprecia una interrupción en el desarrollo de la duna, la cual es truncada por la presencia de infraestructura en la playa. Sin embargo, es notable la ganancia de volumen de sedimentos en los cuatro años transcurridos (del 2003 al 2007).

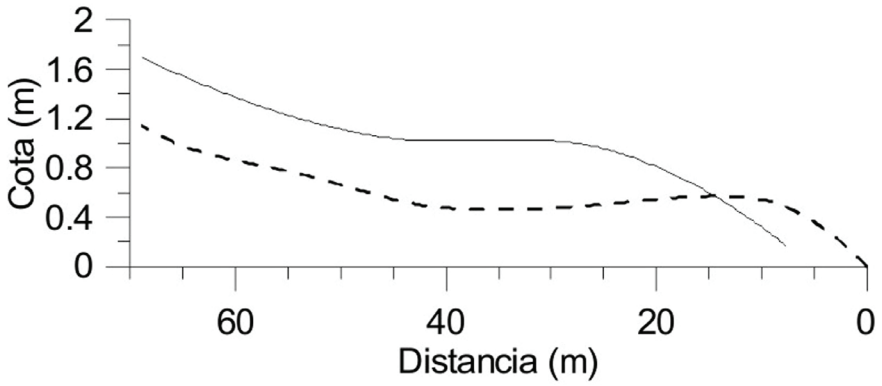
Figura 5. Principales elementos geomorfológicos que constituyen un perfil de playa



Fuente: Juanes, 2006.

Por su parte, el bosque de manglar marca la transición entre el mar y la tierra firme, especialmente en las zonas costeras tropicales y subtropicales. Esencialmente juegan dos roles. El primero ecológico, albergando una compleja red trófica con sitios de anidamiento de aves; además genera las condiciones de vida para poblaciones importantes de reptiles, peces, crustáceos y otras especies. En segundo lugar, los manglares constituyen una barrera física natural, de protección de la línea de costa frente a los procesos sistemáticos de oleaje, mareas; así como ante eventos hidrometeorológicos extremos como huracanes y frentes fríos.

Figura 6. Perfil para la playa Bailén en la costa sur del occidente de Cuba. La línea discontinua refleja la forma del perfil en el año 2003 y la línea continua para el año 2007



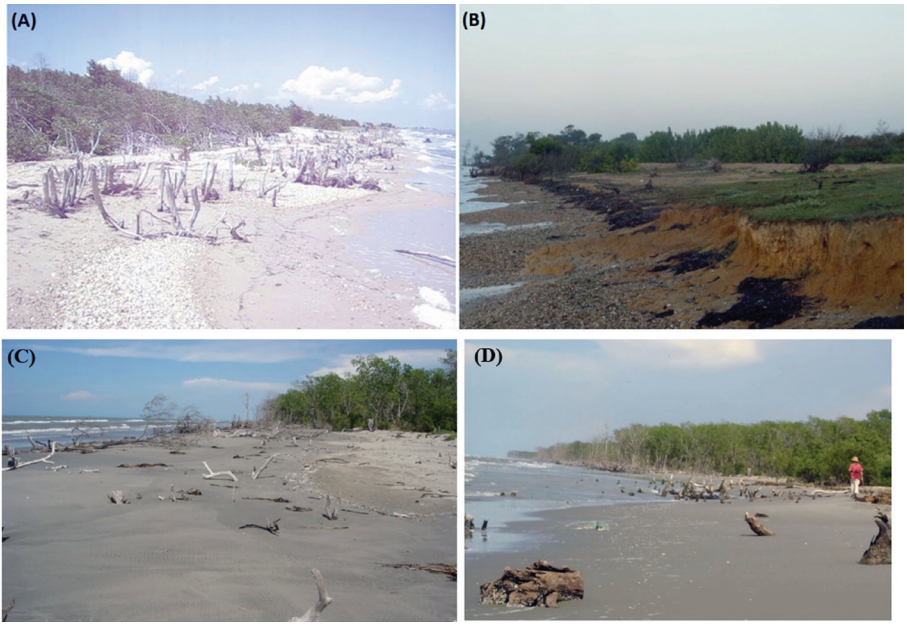
Fuente: Juanes, 2006.

Esas condiciones permiten comprender la importancia de los manglares para la protección de las líneas de costas. Sin embargo, estas formaciones boscosas, sufren altas presiones ecológicas, especialmente de índole antrópico. Millán (2003), enumera entre las principales amenazas, a las emisiones de residuos industriales, las actividades de recreación y a la agricultura.

El monitoreo de la cobertura de manglar permite inferir el comportamiento de la línea de costa. En la Fotografía 3A, por ejemplo, se puede apreciar la destrucción de una franja de bosque de manglar de unos 15 metros aproximadamente. En este caso, la línea de costa quedó desprotegida y es de esperar que sufra con mayor severidad los efectos de la erosión. Por su parte la Fotografía 3B, muestra a través de una fotografía, el probable estado físico en que debe culminar el punto de la Fotografía 3A. En este caso, lo esperado, es la pérdida de la franja de playa, quedando la línea de costa en forma de talud, como resultado del efecto del oleaje y la pérdida de la franja de arenas (material de poca cohesión), perdurando los materiales cohesivos, como las arcillas u otros, según sea el caso.

El análisis granulométrico de los sedimentos constituye también una herramienta robusta en el análisis de los riesgos costeros, especialmente para los litorales conformados por playas, donde predomina la presencia de materiales de muy baja cohesión, como las arenas. Para la aplicación de esta técnica, es recomendable la toma de muestras en el mismo punto en diferentes periodos de tiempo. En todos los casos, es necesario que la toma de muestras se haga aproximadamente en la misma estación del año, para evitar los efectos meteorológicos estacionales. La representación habitual de la información, en este caso, es a través de curvas granulométricas.

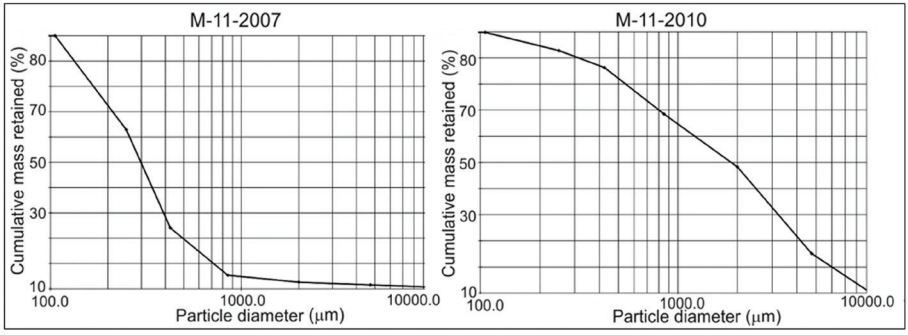
Fotografía 3. Importancia del monitoreo de las formaciones boscosas de manglar, donde A: representa la destrucción de una franja de manglar de 15 metros aproximadamente y B: Muestra el potencial escenario futuro



Fuente: fotografías A y B tomadas por Alexis Ordaz Hernández; y (C) y (D) Manglares frontales en la desembocadura del río San Pedro San Pablo, México fueron tomadas por Ana Patricia Méndez Linares, en 2004.

Por ejemplo, en la Figura 7, se muestra la evolución granulométrica de los sedimentos en la playa Bailén, zona sur del occidente de la Isla de Cuba. En este caso, se tomaron muestras en los años 2007 y 2010, siempre en el mes de diciembre. En esta Figura, se muestra el resultado de un punto de monitoreo, el número 11, situado en la berma de la playa. El sitio mostró un importante cambio en el diámetro medio de los granos, de 455 micrómetros, en el año 2007, a 2630 micrómetros, en el año 2010. Lo anterior, es un indicio del arrastre selectivo de las partículas más finas en el punto analizado.

Figura 7. Ejemplo de la evolución granulométrica en un punto de monitoreo



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El registro hiperanual de las variaciones mareográficas revela un sostenido ascenso del nivel medio del mar en muchas localidades nacionales, producto del calentamiento global, que ya delata temperaturas medias globales extremas cada año. Por otra parte, las observaciones locales y regionales de la línea costera, así como las mediciones instrumentales y los cálculos de diferentes líneas temporales, realizadas desde la última mitad del siglo XX hasta el presente, demuestran notables cambios geomórficos de la costa y de sus ecosistemas, reflejando pérdida de volúmenes de sedimentos, modificaciones morfométricas y geométricas de sus morfoelementos, como berma, dunas y barras, así como afectaciones al hábitat de muchas especies.

La presión ecológica que sufren las costas influye notablemente sobre las modificaciones recientes o "antropocéntricas", poniendo en riesgo elementos del medio físico natural de invaluable valor (flora, fauna y rasgos paisajísticos), cuyos daños generalmente son irreversibles, al menos a corto plazo, así como amenazas a asentamientos humanos costeros y a actividades económicas como la pesca y el turismo. Este escenario determinará a futuro numerosas migraciones de la costa hacia el centro de las naciones, con los elevados costos económicos y de infraestructura para acoger a casi un 60% de la humanidad.

Para el análisis de los cambios costeros existen diversas metodologías, sin embargo, este material trató de exponer los métodos basados en las modificaciones espaciotemporales de la línea de costa. Estos métodos ofrecen al menos dos productos tangibles, el primero basado en la velocidad de la modificación ocurrida en el pasado (tasa de erosión o acreción), mientras el segundo producto lo constituye el pronóstico o el escenario futuro para diferentes intervalos de tiempo.

Un papel importante en la disminución de los niveles de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgos costeros, ante los panoramas global, regional y local, lo determina la planeación territorial de las costas sobre los principios del manejo integrado y con la participación consensuada de las autoridades gubernamentales, la comunidad científica, los sectores económicos y la sociedad civil, en general. Es por ello que, en los programas de ordenamiento ecológico y territorial marino, los municipios costeros deben prever estas amenazas transgresivas marinas y micro-localizar la infraestructura y asentamientos humanos, de acuerdo con modelos probabilísticos de escenarios para diferentes horizontes temporales, y adoptar los correspondientes planes de medidas preventivas, correctivas y de control frente a la escalada de inevitables contingencias, que acechan el futuro de las costas.

Bibliografía

Anders, F.J. y Byrnes, M.R., 1991. "Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs". *Shore and Beach*, 59, 17-26.

Banco Mundial, 2019. *Emisiones de gases de efecto invernadero totales*. Consultado el 11/10/2019, en https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.GHGT.KT.CE.

Boretto, G. M., Rouzaut, S., Cioccale, M., Gordillo, S., Benítez, Y., 2018. "Dinámica costera y antropización en playas uruguayas. Un análisis integrado para su conservación". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 291-306.

Boak, E. and Turner, L. 2005. "Shoreline definition and detection Review". *Journal of Coastal Research*, 2005 (214):688-703.

Bustamante Fernández, J. E., 2014. *Cambios morfodinámicos (1951-2007) y sus implicaciones ante el ascenso del nivel del mar en el sector de Playa Punta Diamante-Papagayo, Acapulco, Guerrero*. Tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, 116 p.

Córdoba-Aguilar, E. H., Puentes Galindo, M. G., Otero Díaz, L. J., 2006. "Análisis de imágenes LANDSAT-7ETM+ para determinar la cobertura del suelo de la zona costera de la Bahía de Tumaco". *Boletín Científico CCCP*, 13, 41-52.

Crowel, M., Leatherman, S.P. y Buckley, M. K., 1991. "Historical shoreline change: Error, analysis y mapping accuracy". *Journal of Coastal Research*, 7, 839-852.

FAO, 2008. *La desaparición de manglares alcanza un nivel alarmante.* Disponible en: http://www.fao.org/newsroom/es/news/2008/1000776/index.html. Consultado el 11 de octubre de 2019.

Fernández, F. A., 2000. *Introducción a la fotointerpretación*. Barcelona.

Fernández-Suárez, E., 2005. Disponible en: http: //webs.uvigo.es/esuarez/RNL.pdf. Consultado el 25 octubre de 2005.

GEF-PNUD, 1999. *Protección de la biodiversidad y desarrollo sostenible en el*

ecosistema Sabana-Camagüey, Cuba. Proyecto CUB/92/G31. Alcolado, P. M., García, E. E., Espinosa N. (eds.). CESYTA, S. L., Madrid, 145 p.

Gómez, D. F., 2019.*Morfodinámica costera de la bahía de Acapulco. Un análisis espacio-temporal.* Tesis de Maestría en Análisis Espacial y Geoinformática. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Geografía, 111p.

Hanson, K., Maul, G., 1993. "Analysis of temperature, precipitation and sea-level variability with concentration on Key West, Florida, for evidence of Trace-Gas - Induced Climate Change", pp. 194-214. *In: G. Maul (Ed.) Climate change in the Intra - Americas Sea*, UNEP/IOC, 389 p.

Hernández Santana, J. R., 1999. "Interacción tierra-mar en condiciones de subsidencia reciente sostenida de la corteza terrestre y riesgos ambientales insulares: Cuba Oriental, Grandes Antillas", en *El Caribe: contribución al conocimiento de su geografía*, Ed. GIDO-ALVIGRAF, La Habana, pp. 29-34.

Hernández Santana, J. R., M. A., Ortiz Pérez, A. P., Méndez Linares y L., Gama Campillo, 2007. "Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente". *Investigaciones Geográficas*, 65:7-21.

Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., and Farris, A. S., 2018. "Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide": *U.S. Geological Survey* Open-File Report 2018–1179, 110 p., https://doi.org/10.3133/ofr20181179.

IPCC, 1998. *Climate Change 1998*. Cambrigde Univ. Press.

IPCC, 2001. *Climate change 2001: Third Assessment Report. Switzerland.* Consultado el 20 de febrero de 2003. http://ipcc.ch

IPCC, 2007. *Four Assessment Report: Climate Change 2007*. Wikipedia. Consultado en agosto de 2007. http://en.wikipedia.org/wiki/Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change #IPCC_Fourth_Assessment_Report:_Climate_Change_2007.

International Commission on Stratigraphy, 2019. *International Chronostratigraphic Chart*. Disponible en http://www.stratigraphy.org. Consultado el 14 de octubre de 2019.

Iturralde-Vinent, Manuel; Méndez, Herminia y otros, 2015. "Peligros y vulnerabilidades de la zona marino-costera de Cuba: estado actual y perspectivas ante el cambio climático hasta el 2100". *Editorial Académica*, La Habana. 86 p.

Jiménez Orocio, O. A., 2010. *Análisis espacio-temporal de la erosión y acreción de las costas del estado de Veracruz*. Tesis de maestría, INECOL, Xalapa, 115 p.

Juanes Martí, J. L., 2006. *La erosión de las playas. Causas y métodos ingenieriles para su control. Conferencias del posgrado Procesos costeros y criterios metodológicos para la recuperación de playas, La Habana*, 15 pp.

La Razón Digital, AFP, 2016. *Huracán Matthew* Disponible en http://www.la-razon.com/mundo/huracan-matthew-Bahamas_0_2576742326.html. Consultado el 28 de noviembre de 2019.

Lanfredi, N. W., Pouse, J. L., D'Onofrio, E. E., 1998. "Sea-level Rise and Related Potencial Hazards on the Argentine COSAT". *Journal of Coastal Research*, 14 (1), 47-60.

Milián, C. I., 2003. *Estudio de la dinámica de la erosión costera y vegetación de manglar del Sector Coloma - Las Canas, provincia de Pinar del Río*. Tesis de doctorado, Universidad de Pinar del Río, Cuba.

Miller, K.G., and Mountain, G.S., 1994. "Global sea-level change and the New Jersey margin". En *Mountain*, G.S., Miller, K.G., Blum, P., *et al., Proc. ODP, Init. Repts.,* 150: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 11-20.

Morales Méndez, D., Saavedra Gallardo, E., Mancera Flores, A., Hernández Santana, J. R., Méndez Linares, A. P., 2019. "Morfodinámica de las costas meridionales del estado de Veracruz, México: Tendencias en las últimas cuatro décadas (1976 y 2017)". *Informe técnico para el Centro Mexicano para la Innovación de la Energía del Océano*, pp. 12-56.

Morton, R. A., Miller, T., Moore, L., 2005. "Historical Shoreline Changes along the US Gulf of Mexico: A Summary of Recent Shoreline Comparisons and Analyses". *Journal of Coastal Research*, v. 21, 4, pp. 704-709.

Ojeda, J., 2000. "Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta". *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30:103-118.

Ortiz, Pérez, M. A., 1992. "Retroceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro, Campeche, Tabasco". *Investigaciones Geográficas*, 25, pp. 7-23.

Ortiz Pérez, M. A., y Benítez, J., 1996. "Elementos teóricos para el entendimiento de los problemas de impacto ambiental en las planicies deltaicas: la región de Tabasco y Campeche", pp. 483-503. *En: Botello, A.V, J. L. Rojas-Galaviz., J. Benítez y D. Zárate-Lomelí (eds). Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias*, EPOMEX, Serie científica 5, Universidad Autónoma de Campeche.

Ortiz Pérez, M., Hernández Santana, J.R., Figueroa Mah Eng, J. M., 2017. "Cambios de la línea costera en el delta del río Balsas, Pacífico mexicano, entre los años 1943-2009". *Investigaciones Geográficas*, 94:1-17.

Pastuchkova, S. A., 2006. *Marskie poberezhia possinskoi federacii i ij prabobaia zachita Zhurnal Geomorfologuia*, No. 1, pp. 20-24 (en ruso).

Pérez Hernández, A. L., 2003. "The territorial planning in the reduction of the vulnerability to natural hazards in Cuba's coastal zone". *Regional Geomorphological Conference*, México, D. F. p. 137.

Raper, S., 2000. *Information Sheet 10: Sea-Level Rice.* Nonwich (UK). *Climate Research* Unit. http://www.cru.wea.ac.uk/info/slr/. (july 2000).

Salas, I., Pérez-Parrado, R., Samper, S.T., Chávez, J.D., Pérez, A.L., Rodríguez, C., Pantaleón, B., Favier, L. y Restivo, R., 2006. "Impacto de la surgencia en el archipiélago cubano considerando los cambios climáticos. Informe de proyecto del Programa Nacional de Cambios Globales y Evolución del Medio Ambiente Cubano". *Archivo científico del Instituto de Meteorología de Cuba*, 220 p y anexos, (Inédito). La Habana.

Stockdon, H. F. Sallenger, A. H.., List, J.H., and Holman R.A., 2002. "Estimation of shoreline position and change using airborne topographic lidar data". *Journal of Coastal Research,* 18(3), 502–513

Thowinsson, O.E., 2018. *Análisis Multitemporal de Erosión Costera en Santa Marta-Colombia.* Tesis de Maestría. UNIGIS, 90p. Consultado el 15/10/2019, en https://issuu.com/unigis_latina/docs/thowwinson_37c65acb8992e1

Vázquez, A., 2008." Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos". *Informe final*, número de registro: INE/A1-051/2008. México, D. F., INE, UNAM y SEMARNAT, 121 p.

Warrick, R. A., Le Provost, C., Meier, M. F., Oerlemans, J., Woodworth, P. L., 1996. "Changes in sea level". In: J. T., Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kuttenberg and K. Maskell (eds) Climate Change 1995: *The Science of Climate Change (Contribution of WCI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change).* Cambridge, University Press, Cambridge, pp. 359-405.

2.10. Medidas de control de la erosión

José Miguel Febles Diaz

Facultad de Geografía,

Universidad Autónoma del Estado de México y
Universidad de La Habana

José Manuel Febles González

Universidad de La Habana

Introducción

La capacidad de un suelo en mantener sus propiedades y características físicas, químicas y biológicas es el resultado de la influencia de cinco factores: la fauna del suelo, microorganismos, raíces, agentes inorgánicos y variables del medio ambiente (Loss, 2014). Existe un efecto multiplicador cuando estos factores interactúan, lo cual da como resultado la formación y estabilización de los agregados (Six *et al*., 2004; Bronick y Lal, 2005; Rillig y Mummey, 2006).

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar conocimientos sobre los principales métodos y técnicas conectadas, para remediar, prevenir o reducir la degradación del suelo y mantener las características mencionadas anteriormente, en una localidad en particular o bajo circunstancias definidas.

No obstante, existe una inquietud cuando mencionamos el avance económico, así como el aumento del uso de insumos agrícolas. El uso de áreas naturales o vírgenes para explotación agrícola creció en los últimos años. Esto repercute en la conservación, así como en la fertilidad, lo que se refleja en la productividad, entendida tal como la capacidad del sistema edafológico de brindar las condiciones óptimas de humedad y nutrientes considerados esenciales para las plantas.

Reflexionando sobre la importancia que posee este amplio y complejo estudio, para todos y cada uno de los futuros profesionistas agrónomos y personas que les apasione entender un poco el mundo del suelo. Con el objetivo de afianzar y desarrollar destrezas sobre los conocimientos teórico-prácticos del espacio de aprendizaje, de manera que sea una herramienta accesible, didáctica, y guía, para una mejor integración entre los conceptos teóricos y las habilidades prácticas que se llevan a cabo en las labores de conservación, con el propósito de ofrecer experiencias que enriquezcan el

proceso enseñanza-aprendizaje, basado en el concepto de aprender haciendo. El cual ejecutarán cada uno de los educandos y demás interesados en el tema.

Medidas de control de la erosión, manejo del cultivo y la vegetación

Las medidas agronómicas para la conservación del suelo se basan en el efecto protector de cubiertas vegetales para reducir la erosión. Debido a las diferencias de tipos de plantas, en su densidad y morfología, difieren en su capacidad para proteger el suelo. En general, los cultivos en hileras son los menos eficaces y dan origen a problemas de erosión más graves. Esto es debido al alto porcentaje de suelo desnudo, particularmente en las primeras etapas de crecimiento de los cultivos, y a la necesidad de preparar un lecho de siembra. En el diseño de una estrategia de conservación basado en medidas agronómicas, cultivos en hileras deben ser combinados con cultivos de protección efectiva. Las medidas agronómicas también forman un componente importante de la labranza de conservación y de las estrategias para el control de la erosión en las plantaciones, bosques y áreas no agrícolas.

Rotación

La forma más sencilla de combinar diferentes cultivos es crecer de forma consecutiva en rotación. La frecuencia con la que se cultivan los cultivos en hileras depende de la gravedad de la erosión. Donde las tasas de erosión son bajos, pueden cultivarse cada dos años, pero, en zonas muy erosionables, que pueden ser permisibles solo una vez en cinco o siete años. Una alta tasa de pérdida de suelo en el cultivo en fila es contrarrestada por tasas bajas en los otros cultivos de manera que, como promedio, durante un período de seis o siete años, la tasa de erosión anual sigue siendo baja. Los efectos a largo plazo de rotación frente a monocultivo continuo pueden ser bastante dramático, como se muestra en los datos de los experimentos llevados a cabo en Sanborn Field, Missouri. Con 4° de pendiente, con un suelo franco limoso, la tasa de erosión anual bajo maíz continuo fue de 44 t ha^{-1} en comparación con 6 t ha^{-1} a partir de una rotación de maíz, trigo y trébol después de 100 años (Morgan, 2005).

Los cultivos adecuados para su uso en rotaciones son leguminosas y gramíneas. Estos proporcionan una buena cobertura del suelo, ayuda a mantener o incluso mejorar la condición orgánica del suelo, lo que contribuye a la fertilidad del suelo, y permitir una estructura de los agregados más estables para el desarrollo del suelo. Los efectos son a menudo suficientes para reducir la erosión y aumentar el rendimiento durante el primer año de cultivo fila-cosecha, pero rara vez se extienden en el segundo año. Por esta razón, dos años continuos de siembra con un cultivo fila debe ser evitado. Hudson (1981) mostró que una rotación de la hierba tabaco-hierba-hierba-tabaco-hierba-hierba fue más eficaz en Zimbabwe de uno de dos años consecutivos

de tabaco, seguido de cuatro años de hierba. Las respectivas tasas de pérdida media anual del suelo eran 12 y 15 t ha-1.

La agricultura migratoria

La rotación de cultivos es un método tradicional de reducir la erosión del suelo en los trópicos, mediante la rotación en la ubicación de los cultivos. Un área de bosque se elimina por la tala y quema, la tierra suelta es labrada a mano y plantada. Se pueden obtener dos cosechas al año, la segunda cosecha se cultiva después de cosechada la primera o de lo contrario la tierra se deja en barbecho de malezas. La misma área puede ser recortada por segundo año antes de que vuelva a hacer un matorral o bosque secundario. Los cultivos típicos cultivados son mandioca, maíz, arroz de secano y el ñame. El efecto residual del bosque en el contenido de materia orgánica y la estabilidad de los agregados del suelo generalmente dura para el primer año de la agricultura, de manera que la pérdida de suelo sigue siendo baja. Las tasas de erosión se elevan rápidamente si la tierra sigue siendo cultivada en los años subsiguientes. Pérdida de suelo de tierra bajo el arroz de secano en Mindanao, Filipinas, como promedio es de 0.38 g/m^2 por días en un nuevo desmonte, pero este aumenta a 14.91 g/m^2 por día en un desmonte en su duodécimo año de cultivo (Morgan, 2005).

La práctica de la rotación de cultivos mantendrá la fertilidad del suelo y reducirá la erosión a niveles tolerables, proporcionado las condiciones adecuadas al suelo, asociadas a un rendimiento de los cultivos bajos en donde existe una baja proporción de población por superficie de tierra lo que permite una calidad de vida aceptable. El factor crítico en el sistema es la longitud del período de barbecho. Esto es tradicionalmente entre 7 y 20 años en África Occidental (Okigbo, 1977), pero el aumento de la densidad de población y el deseo de las personas a elevar su nivel de vida mediante el sostenimiento de los cultivos mayor tiempo, ejercen presión sobre la tierra, lo que resulta en la reducción y, a veces, la eliminación del período de barbecho. Serios problemas de erosión se crean cuando se reduce el periodo de descanso, y se requieren prácticas agrícolas alternativas al sistema de rotación de cultivos para resolverlos mediante el cultivo intercalado, *mulching* y agroforestería.

Cultivo en línea

Existen problemas particulares asociados al maíz (Fotografía 1), el cual, cuando se cultiva como en fila con labranza convencional y el deshierbe limpio, resulta en una pérdida anual de suelo en 2-5° de pendiente de entre 10 y 120 t ha^{-1}, tomado de los datos de Zimbabwe (Hudson, 1981), Malasia (Sulaiman *et al.*, 1981) e India (Singh *et al.*, 1979). Estas tasas están muy por encima de la mayoría de los niveles de tolerancia de pérdida de suelo. Donde el maíz se cultiva de una manera más tradicional, con siendo restringido al

arado y sin deshierbe, presenta menos dificultades, pero los rendimientos son bastante bajos, a menudo solo 1 t ha^{-1} en comparación con más de 5 t ha^{-1} logradas regularmente en el EE.UU. Hay una necesidad urgente de encontrar una manera de aumentar el rendimiento sin aumentar la erosión.

Fotografía 1. Campo de maíz, cultivado en línea

Fuente: tomado de PXHERE, 2020.

Las semillas de soja se utilizan a menudo en rotación con el maíz debido a su aparente capacidad para reducir la pérdida de suelo mediante la interceptación de un alto porcentaje de la precipitación. Con 90 % de cobertura del dosel, las habas de soja de interceptan 58 % de la precipitación, en comparación con el 40 % para el maíz intercalado con yuca y solo el 28% de la yuca por sí sola. Las pérdidas de suelo anuales respectivas son 4.0, 6.9 y 11.0 t ha^{-1} en el área de Ibadan de Nigeria (Aina *et al.*, 1979). Sin embargo, los estudios en el Medio Oeste de los EE. UU. indican que las habas de soja pueden causar tanto o más erosión que el maíz (Laflen y Moldenhauer, 1979). En una pendiente 4° con un suelo franco-limoso, las pérdidas de suelo media anual durante siete años fueron de 7.0 t ha^{-1} para el maíz continuo, 6.5 t ha^{-1} para el maíz seguidas de habas de soja y 9.6 t ha^{-1} para habas de soja seguidas de maíz.

Además de controlar la erosión, la inclusión de gramíneas y leguminosas en una rotación puede aumentar los rendimientos de la cosecha principal. Los rendimientos mayores de maíz que se obtuvieron (fue de más de 5 t ha^{-1}) en Ibadan después de un año con la tierra bajo *Centrosema pubescens, Setaria splendida* o *Stylosanthes gracilis* (Okigbo y Lal, 1977).

A menos que los cultivos de barbecho se pueden utilizar para el pastoreo o forraje, por lo que no tienen ningún valor inmediato para el agricultor. Por lo tanto, la rotación de cultivos de gramíneas y leguminosas rara vez se practica en las principales zonas de cultivo de cereales del mundo, y es poco probable que sea aceptada si su inclusión no da ingresos para el agricultor. En estas condiciones, se requiere un enfoque alternativo para el control de erosión basado en minimizar el período de suelo desnudo. Por ejemplo, al dejar residuos de cosecha en la tierra y retrasar el arado hasta la primavera siguiente, o, cuando se cultivan cereales de invierno, la siembra tiene que realizarse antes de las temperaturas invernales que inhiben el crecimiento de las plantas. La siembra de cereales durante el invierno fue una de las principales causas de la erosión del suelo en la década de 1980 en gran parte del sur y el este de Inglaterra (Boardman y Evans 1994) y en el norte de Francia (Monnier y Boiffin, 1986).

Gestión de pastizales

La rotación es una práctica común en las tierras de pastoreo (Fotografía 2), se mueve el pasto de un campo a otro para dar tiempo a la hierba para recuperarse. En general, los pastizales no deben ser explotados para más de un 40% a 50% de la producción anual de sus especies más agradables (Fournier, 1972 y Thorsteinsson, 1980a), una condición que se alcanza cuando aproximadamente el 10% al 20% del crecimiento anual de las especies leñosas se ha eliminado. Se debe permitir a la vegetación que se regenere suficientemente para proporcionar una cubierta de tierra 70% en los momentos de riesgo de erosión. El pastoreo debe ser una actividad manejada con mucho cuidado. Mientras que el pastoreo excesivo puede conducir a un deterioro de los pastizales y el inicio de la erosión, el sub-pastoreo puede resultar en la pérdida de pastos nutritivos, muchos de los cuales se regeneran más rápidamente cuando son trillado.

El sobrepastoreo de los pastos de verano en Islandia ha llevado a una disminución en la proporción de hierbas dentro de la comunidad de plantas de 12% a 30% y se eleva en las proporciones de juncias y juncos del 18% al 26%, y musgos de 15% a 24% (Thorsteinsson, 1980a).

El rendimiento anual de especies leñosas en tierra sobrepastoreada es solamente 150 kg $DMha^{-1}$ en comparación con 800 kg $DMha^{-1}$ en suelo protegido. La densidad de siembra es a menudo baja, con cicatrices abiertas en la cubierta vegetal. Un aumento en el número de ovejas y una disminución en la duración de la temporada de crecimiento, de 240 a 210 días entre 1944 y 1968, creó una presión en los mejores pastos del Peak District en el Reino Unido, lo que llevo a una ruptura en el tapiz de césped, a la erosión y un cambio en el tipo de césped de *Agrostis-Festuca* a *Nardetum* (Evans, 1977), con la consiguiente reducción de la capacidad de carga de las ovejas. Este

cambio del tipo de vegetación pasto, otra especie de pasto, y también de brezales a pastos, ha sido generalmente observado en Reino Unido, seguido del sobrepastoreo de los pastos en las tierras altas en periodos de 5 a 10 años (Fenton, 1937 y Jeffers, 1986). Donde el sub-pastoreo ocurre, los pastizales y los brezales dan paso a los matorrales y bosques de abedules un periodo de 10 a 50 años, pero también esta práctica puede provocar un peligro de invasión de helechos. En cada escenario, la sucesión de árboles puede ser retardada y tomar centurias en ocurrir (Jeffers, 1986).

Fotografía 2. Campo de pastizales con prácticas de rotación

Fuente: tomado de PXHERE, 2020.

La quema controlada, preferiblemente practicada de manera rotativa, es esencial para la eliminación de especies no deseadas, mientras que la quema no controlada puede evitar que las plantas de restablezcan y aumente la extensión de tierra desnuda, resultando en una grave erosión. En general, la pérdida de suelo es mayor en el primer año después del fuego (Shakesby *et al*., 1993) y vuelve a los niveles anteriores después de 3 o 4 años. El aumento absoluto de la erosión puede ser bastante baja en suelos con una estructura granular estable (Kutiel 1994). En otros suelos, se produce una alta pérdida de suelo debido a la vaporización y reabsorción de sustancias orgánicas estables durante la quema, lo que hace al suelo hidrófobo (De Bano *et al*., 1970) y disminuye la velocidad de infiltración, aumenta la escorrentía y

ayuda al desprendimiento por impacto de la lluvia (Terry y Shakesby, 1993; Doerr *et al.,* 2002). La gravedad de los efectos depende de la temperatura de la quemadura. En un estudio experimental bajo vegetación mediterránea *maquis*, la erosión anual fue cinco veces mayor que la de un área sin quemar después de un incendio con una temperatura de superficie del suelo media de 180° C, pero fue 50 veces más alta después de una quema con una temperatura de superficie del suelo media de 475° C (Giovannini *et al.*, 1988).

La quema a altas temperatura causa que las partículas más finas del subsuelo se conviertan en cemento con tamaño similar a la arena, los cuales son agregados con baja porosidad (Giovannini, 1994) que estimulan la generación de escorrentía. Dependiendo del suelo, la precipitación, la temperatura de quemado y el grado de aislamiento proporcionado por Duff (Dimitrakopoulos *et al.*, 1994), la superficie del suelo tarda unos 3 años en restaurarse a la condición pre quema y algunos de siete a doce años para el restablecimiento de la comunidad vegetal después de un incendio (Naveh, 1975; y Trabaud y Lepart, 1980), lo que implica que la quema cada siete a diez años es probablemente necesaria para controlar la invasión de especies no deseadas.

Prescribir quema modifica la densidad, estatura y composición del cepillo del pasto dentro de una comunidad de plantas, pero mata solo unas pocas especies de plano. La mayoría de las especies de arbustos brotan vigorosamente después del fuego, en detrimento de las hierbas. Las hierbas, sin embargo, llenan los huecos del cepillo y alcanzan su máximo desarrollo en el segundo y tercer año después de un incendio. Por lo tanto, el fuego puede ser utilizado para *topkill* y abrir áreas para el establecimiento de las masas adultas de cepillo de modo que solo un cuarto de las semillas se necesita para lograr el establecimiento de pastos. Una vez que los rebrotes de arbustos en él están maduros, estos tienen una ventaja competitiva sobre el pasto joven y necesitan ser controlados por los herbicidas hasta que el césped es suficientemente fuerte como para llevar fuego. Después de que se ha alcanzado esta etapa, la quema puede ser utilizada periódicamente para controlar los arbustos y para mantener una comunidad de plantas más diversa de la que se produciría si la sucesión ecológica les permitiera desarrollarse ininterrumpidamente (Kutiel, 1994), llenar los vacíos en el cepillo y alcanzar su máximo desarrollo en el segundo y tercer año después de un incendio. Por lo tanto, el fuego puede ser utilizado como *topkill* y abrir las masas adultas del cepillo de modo que de un cuarto de las semillas se puede utilizar para el establecimiento de los pastos.

Los rebrotes de pincel, sin embargo, tienen una ventaja competitiva sobre la hierba joven y necesitan ser controlados por los herbicidas hasta que el césped es suficientemente fuerte como para llevar el fuego. Después de que se ha alcanzado esta etapa, la quema puede ser utilizada periódicamente para controlar el cepillo y para mantener una comunidad de plantas más diversas, que se produciría si la sucesión ecológica se les permitiera desarrollar ininterrumpidamente (Kutiel, 1994).

Un factor crítico en un sistema de pastoreo rotacional es la calidad de los pastizales en áreas de suelos pobres. Este sistema tradicional de ovejas pastando en Islandia se basó en pasturas cultivadas cerca de la granja, en la primavera y otoño, y en los pastos de montaña comunales, que fueron pastados en el verano, mientras que dos cosechas de heno fueron cortadas de las tierras cultivada para la alimentación de invierno. Durante la década de 1960, los agricultores redujeron el tiempo que pasaron las ovejas en las tierras altas, con el resultado de que solo se obtuvo una cosecha de heno y el forraje de invierno tuvo que ser importado. Sin embargo, con el forraje importado podría mantener más *stock* durante el invierno. Con el aumento de número de ovejas, la presión sobre los pastos de verano se intensificó, lo que llevó al sobrepastoreo y la erosión. La disponibilidad de los pastos de verano se convirtió en el factor limitante en la producción de ovejas (Thorsteinsson *et al*., 1971). Evitar el sobrepastoreo y la erosión de las zonas altas a través de la adopción de tasas de carga adecuadas constituye un elemento esencial. Por lo tanto, se introdujeron las políticas del gobierno para subvencionar proyectos ambientales llevados a cabo por los agricultores, a cambio de reducir el número de ovejas. Como resultado, el número de ovejas ha reducido a la mitad desde 1979, dando lugar a mejoras en la calidad de los pastizales y ventajas económicas a los agricultores (Arnalds, 1999).

No hay una fórmula universal para determinar las tasas de *stock* y la capacidad de carga de los pastos. La determinación es más difícil en regiones con alta variabilidad de las precipitaciones de un año a otro, de modo que el pastoreo excesivo es casi inevitable cuando hay varios años de sequía en sucesión. La capacidad de ovejas de pastoreo en los pastizales en Islandia se evaluó mediante la cartografía de la vegetación, desde la fotografía aérea y reconocimiento de campo y se clasificó en 94 tipos diferentes de vegetación (Steindórsson, 1980). Sobre la base de la producción media anual de materia seca, la palatabilidad de las especies de plantas, a las ovejas y la limitación de la extracción anual a 50 % del crecimiento anual de la especie de sabor agradable (para las ovejas), se calculó la capacidad de carga de cada tipo de vegetación (Thorsteinsson, 1980a y b). En realidad, estos inventarios solo pueden determinar una capacidad media de carga. La capacidad de carga real en un momento dado dependerá de las condiciones de suelo y vegetación locales, variaciones en el clima y la medida en la que se cortan los árboles y arbustos para leña y madera. Por lo tanto, se necesita una inspección regular y juicio para determinar cuando la acción se debe mover de un lugar a otro en un sistema de rotación.

El pastoreo rotacional y la quema son los más apropiados para los ranchos a gran escala, de 4000 hm o más. Desde este tamaño permite una mayor flexibilidad en el diseño de sistemas adecuados con respecto a la variabilidad en la calidad de la tierra, suministro de agua, niveles de degradación y el

clima. A continuación se presentan ejemplos de sistemas de pastoreo rotacional utilizados en tierras áridas y semiáridas del proyecto (ASAL) en Kenia (<biblio>) para gestionar pastoreo comunal (Cuadro 1, 2, 3 y 4).

Cuadro 1. Sistema de pastoreo rotacional para tierras semiáridas en Kenia. Ejemplo a

Bloque	Año 1			Año 2			Año 3			Año 4		
	E-A	M-A	S-D	E-A	M-A	S-D	E-A	M-A	S-D	E-A	M-A	S-D
1	P				P				P			
2		P				P				P		
3			P				P				P	
4	*			P				P				P

Nota: (a) Esquema de sistema de balance rotacional de pasto de cuatro bloques, como uso para la rehabilitación del sobrepastoreo en tierras de Kenia, muestra los movimientos del ganado para pastar en cada bloque (P) por un periodo de cuatro meses. El ciclo completo de pastoreo dura cuatro años y al final de ciclo se repite. En las áreas donde el sistema se implementó posee una temporada húmeda de abril - septiembre (columnas sombreadas).

Fuente: Pratt & Gwynne 1977 y Mututho 1989.

Cuadro 2. Sistema de pastoreo rotacional para tierras semiáridas en Kenia. Ejemplo b

Bloque	Año 1				Año 2				Año 3				Año 4			
	E-M	A-J	J-S	O-D	E-M	A-J	J-S	O-D	E-M	A-J	J-S	O-D	E-M	A-J	J-S	O-D
1	P				*			P			P			P		
2		P			P				*			P			P	
3			P			P			P				*			P
4	*			P			P			P			P			

Nota: (b) Una variación del sistema de pastoreo de cuatro bloques. Que el pastoreo dure solo tres meses y los periodos de descanso poseen deferente duración. Este sistema incluye la quema (*) de cada bloque en un rango de 4 años y con una temporada completa de descanso y crecimiento después de la quema.

Fuente: Pratt & Gwynne 1977 y Mututho 1989.

Cuadro 3. Sistema de pastoreo rotacional para tierras semiáridas en Kenia. Ejemplo c

Bloque	Año 1				Año 2				Año 3				Año 4			
	E-M	A-J	J-S	O-D	E-M	A-J	J-S	O-D	E-M	A-J	J-S	O-D	E-M	A-J	J-S	O-D
1		P				*		P		*		P		P		
2						P				*				*		P
3		*				*		P						P		
4		*		P						P				*		

Nota: (c) Una segunda variante, es aumentar los tiempos de pastoreo, cada uno de seis meses de duración, lo cual elimina los periodos cortos de descanso de la variante b. Esta pose dos alternativas de quemado en cada bloque, precedido de un corto periodo de descanso en temporada de lluvia. El pasto no quemado, se puede utilizar como reserva.

Fuente: Pratt & Gwynne 1977 y Mututho 1989.

Cuadro 4. Sistema de pastoreo rotacional para tierras semiáridas en Kenia. Ejemplo d

Bloque	Año 1			Año 2			Año 3			Año 4		
	E-A	M-A	S-D	E-A	M-A	S-D	E-A	M-A	S-D	E-A	M-A	S-D
1	P			*	P		*	1/2P	1/2P			
2		P		P		P	*			*	1/2P	1/2P
3	*	1/2P	1/2P				P			*		
4	*			*	1/2P	1/2P						P

Nota: (d) Un balanceado sistema de cuatro bloques; en el que el pastoreo se aplica a cada bloque en un periodo de cuatro meses y otro de ocho meses. Esta es una alternativa a la variante c, esta ofrece un periodo largo de descanso después de la quema.

Fuente: Pratt & Gwynne 1977 y Mututho 1989.

Gestión de bosques

Los principios de rotación se pueden aplicar a otras formas de uso de la tierra. Los recursos madereros de los bosques son a menudo explotados comercialmente, tala de parches, de forma rotativa. Las tasas de erosión son más altas en los años inmediatamente posteriores a la tala, pero disminuyen en los años siguientes, ya sea con el rebrote de la vegetación natural o la replantación de manera que, como media de 12 años o más, las diferencias son pequeñas en comparación con las de tierras vírgenes. En el oeste de Oregón, la tasa anual de producción de sedimentos de Deer Creek tenía un promedio de captura 0,97 t ha^{-1} para el período de 1959 a 1965, antes de que las carreteras se construyeran. A finales de 1965 hasta 1966 se realizaron los parches de corte en un 25 % del área de captación (Beschta, 1978). La producción de sedimentos en 1966 aumentó en un 150%, pero en 1967 fue solo 40% por encima de la media pre corte. La producción de sedimentos en los años posteriores se redujo hasta llegar a la media del pre corte, hasta que, en 1972, de repente se aumentó en un 170% a causa de varios fallos de masa a lo largo de los bordes de la carretera en el área de la zona de corte. En 1973 la producción de sedimentos fue, de nuevo, similar a la media pre corte. Por lo tanto, siempre que la erosión en terraplenes de carretera y esquejes puede ser controlada, un área puede recuperarse rápidamente de los efectos de parche de corte.

La limpieza de áreas mucho más grandes puede crear problemas a más largo plazo. En la vecindad de la cuenca Needle Branch, la producción de sedimentos media anual pre corte era 0,53 t ha^{-1}. Tras la tala del 82% del área de captación, en 1966, la producción de sedimentos fue del 50% por encima de la pre corte promedio, y un 260% por encima de 1967, y no volvió a los niveles pre corte hasta 1973.

Los incendios forestales representan un peligro adicional una vez que un área se ha reducido. En Pine Creek, Boise bosque nacional, Idaho, la erosión directamente atribuible a la quema es mayor en corte que en las zonas sin cortar (Megahan y Molitor, 1975). Las respuestas al fuego en términos de

hidrofobicidad del suelo, la generación de escorrentía y la erosión son similares a los descritos para la quema de pastizales. Pero la severidad del incendio influye grandemente. En la isla de Lesbos, Grecia, la erosión post incendio en 30 episodios de lluvias, entre octubre de 1992 y marzo de 1993, fue de 12,2 t ha^{-1} después de una quema grave que destruyó la capa de hojarasca, dejando solo 0% a 10 % de la cubierta de vegetal; 1,3 t ha^{-1} después de una quemadura moderada donde se consumió la capa de hojarasca. No obstante, 45% a 60% de la cubierta vegetal se mantuvo; y 0,2 t ha^{-1} de un área no quemada (Dimitrakopoulos y Seilopoulos, 2002). La replantación debe tener lugar rápidamente después de la tala, antes que la pérdida de la capa superior del suelo y los nutrientes se reduzcan por la erosión, disminuyendo la calidad de la tierra. En estos casos, se pude tratar la siembre poniéndole sobre el suelo alguna cobertura como pueden ser desechos de cosechas etc.

Aunque con un manejo cuidadoso y una tala limitada en áreas pequeñas a la vez, los parches de corte pueden ser una técnica aceptable. Áreas de suelos muy erosionables pueden ser demasiado riesgosos como para permitir su uso. En estas áreas, la tala selectiva, en la que solo los árboles maduros se retiran y los otros árboles se mantienen para proporcionar una cubierta, es una mejor práctica de conservación. Los árboles elegidos deberán ser eliminados mediante la corta dirigida para evitar daños a las plántulas, árboles jóvenes y ríos. Una tira de filtro, con una anchura mínima de 20 m, se debe mantener en las orillas de las corrientes perennes. Cosechar con tractores equipados con cuchillas de corte y utilizar pistas de arrastre solo deben permitirse en pendientes por encima a 30° (Wan Yusoff, 1988).

Cultivos de cobertura

Los cultivos de cobertura se cultivan como medida de conservación, ya sea durante la temporada baja o como protección de suelo bajo los árboles. Los cultivos típicos usados son el centeno, la avena, la mostaza, la veza vellosa, trébol dulce, alfalfa, los guisantes de invierno de Austria, trébol carmesí, etc. Para ser eficaz, el cultivo de cobertura debe ser rápido, para establecerse y proporcionar una cubierta vegetal temprano, que sea lo suficientemente agresivo para reprimir las malas hierbas y posea un sistema de raíces profundas para mejorar la macro porosidad del suelo. La siembra en campo abierto de centeno de invierno a una tasa de 120-130 kg ha^{-1} tan pronto como sea posible en el otoño, se practica como control a la erosión eólica en los suelos arenosos del norte de Holanda, donde los cultivos principales son la remolacha azucarera, patatas y maíz (Eppink y Spaan, 1989). La siembra temprana es esencial porque se obtiene buena cubierta a finales de diciembre, ya que el clima es demasiado frío para el crecimiento en febrero y marzo, el período donde la superficie del suelo está seca y vientos fuertes con baja humedad son más comunes. El cultivo se desbroza en el momento adecuado, por lo general antes de la perforación de la remolacha azucarera o antes de la aparición

de las patatas y del maíz. El mantenimiento de un cultivo de cobertura durante el invierno en lugar de suelo desnudo es también beneficioso en la reducción de la lixiviación de nitrógeno a las aguas subterráneas.

La cubierta de tierra son cultivos que se cultivan debajo de las tierras destinadas a cultivos de árboles para proteger el suelo del impacto de las gotas lluvia que caen del dosel. Son particularmente importantes con cultivos altos, como el caucho, donde la altura de caída es suficiente para hacer que las gotas se acerquen a su velocidad terminal. Con suelo desnudo debajo de los árboles, tasas de erosión mayores a 20 t ha^{-1} han sido registrados bajo la palma de aceite en Malasia, incluso con el banco de terrazas (Lim, 1988). La erosión puede ser reducida a menos de 0,5 t ha^{-1} con cultivos de cobertura, aunque los caminos de cosecha todavía siguen siendo vulnerables (Maene *et al*., 1979). La cubierta más común de cultivos utilizados son *Pueraria phaseoloides, Mucunoides calopogonium* y *Centrosema pubescens*. A pesar de que crecen rápidamente y retienen los nutrientes en el suelo, que de otro modo se eliminan por lixiviación, su uso a veces puede dar problemas. Primero, como el cultivo principal se establece y las condiciones del terreno cambian de sol fuerte abierto a la sombra, existe el riesgo de que una cubierta satisfactoria no se logre. En segundo lugar, el costo de los cultivos de cobertura puede ser mayor que los beneficios que el agricultor recibe. La mayoría de las cubiertas dan ningún ingreso y esto restringe su uso en pequeñas explotaciones donde los agricultores no tienen suficiente liquidez para esperar a que el cultivo de árboles madure. La investigación es necesaria para encontrar cultivos de cobertura adecuados, particularmente variedades de judías y guisantes, que el pequeño propietario pueda sembrar (Fotografía 3).

Los estudios realizados en las plantaciones de caucho, en el este de Java, muestran que los cultivos de cobertura pueden reducir la humedad del suelo hasta en un 50 % durante la estación seca, en comparación con el deshierbe limpio (Williams y Joseph, 1970). Se requiere una medida alternativa conservación en estas circunstancias. Cuando se utiliza en los viñedos (Figura 4) en la región de Beaujolais, en Francia, una cubierta vegetal permanente, gestionada por la siega, reduce la erosión a menos del 7 % del total en viñedos con suelo desnudo. No hubo competencia de las vides por la humedad durante el verano cálido y seco, ya que el aumento de la infiltración promovida por la hierba limita la pérdida de agua por escorrentía durante las tormentas y de ese modo compensa cualquier déficit potencial de agua (Gril *et al*., 1989). En el valle del Mosela, Alemania, el pasto redujo el agua disponible en los 40 cm superiores del suelo en el verano, cuando las precipitaciones eran más o menos medias, pero mejoró el estado de humedad durante el verano seco, sin diferencias significativas en el rendimiento en comparación con el mantenimiento de un suelo cultivado sin vegetación bajo las vides (Husse, 1991).

Fotografía 3. Viñedo, que utiliza los cultivos de coberturas para proteger la erosión del suelo de los surcos entre plantación

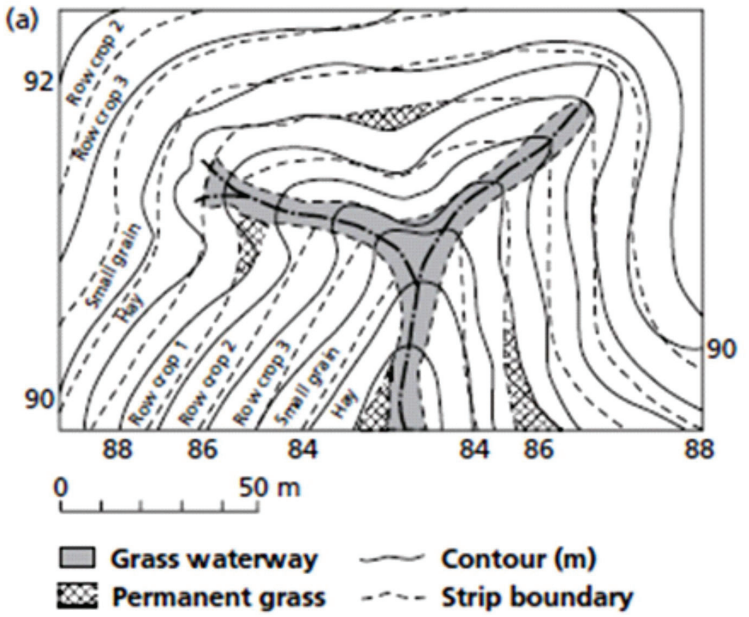
Fuente: tomado de PXHERE, 2020.

El cultivo en fajas

Con el cultivo en fajas, cultivos en hileras y los cultivos de protección eficaz se cultivan en tiras alternas, alineadas a las curvas de nivel o perpendiculares al viento (Figura 1a). La erosión es limitada en gran parte por las tiras de fila-cultivos, quedando atrapadas la siguiente tira, pendiente abajo, o a merced del viento, por lo que en general se siembra con un cultivo leguminoso o hierba. La anchura fila-cultivo varía de acuerdo con el grado de peligro de la erosión (Cuadro 5). Las tiras de protección son, por lo general, alrededor de 4,5 m de ancho, cuando está formada por pastos o pasto y mezcla de leguminosas, y 9 m de ancho cuando está compuesto únicamente de las especies de leguminosas (Servicio de Conservación de Recursos Naturales, 1999). Cuando las tiras protectoras comprenden uno de los cultivos utilizados en una rotación, que son conocidos como tiras anuales y su posición en la ladera pueden variar de un año a otro. El cultivo en fajas es la mejor medida para los suelos bien drenados porque reduce la velocidad del escurrimiento, si estas son combinadas con suelos con bajas tasas de infiltración, puede originar inundaciones o empantanamientos.

En pendientes pronunciadas, o en suelos muy erosionables, puede ser necesario retener las tiras como la vegetación permanente. Estas franjas de protección son, por lo general, de 2 a 4 m de ancho y se colocan a intervalos de 10 a 20 m (Figura 5b). En pendientes alrededor de 5°, las tiras actúan retardando el flujo, causando inundación pendiente arriba de la barrera (Melville y Morgan 2001).

Figura 1a. Contorno diseños de faja de cultivo

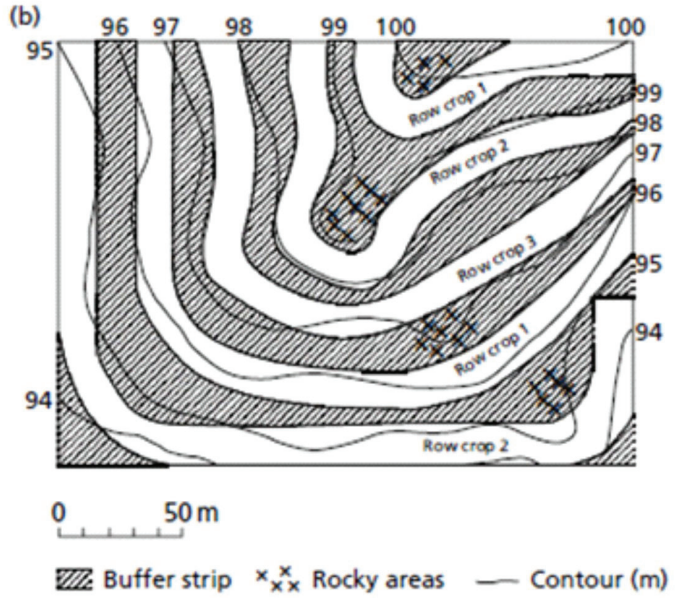


Fuente: Troeh *et al.*, 1980.

La acumulación gradual de suelo detrás de las tiras de la barrera, con el tiempo, pueden formar terrazas de tipo banco. En un sistema de fajas de pastos, *Setaria anceps*, en un suelo arcilloso nitisol cerca de Nairobi, Kenia, hasta 120 mm de profundidad de suelo se acumuló, pendiente arriba de las tiras dentro de dos años, reduciendo la pendiente local de 6° a 5° (Wolde & Thomas, 1989).

En el área de Cochabamba, en Bolivia, se registraron aumentos de 20 a 450 mm de altura dentro de dos años detrás de las barreras de pasto *Phalaris tuberoarundinacea* (Sims *et al.*, 1999). Sin embargo, la deposición de sedimentos también conduce a un aumento de la altura de la superficie del terreno por encima de la faja con respecto a que está por debajo, lo que aumenta localmente la inclinación de la pendiente. A menos que el suelo dentro de la franja están debidamente protegidos por la vegetación, el agua que sale de la faja, con su carga de sedimentos por filtración y que fluye sobre la pendiente más pronunciada, puede iniciar la erosión (Ghadiri *et al.*, 2001).

Figura 1b. Uso de franjas de protección



Nota: contorno diseños de faja de cultivo para una rotación de cultivos de cinco años y (b) el uso de franjas de protección. Las líneas de contorno son en metros sobre un *datum* arbitrario. Observe el uso de un canal de agua con pasto para evacuar el exceso de escorrentía de la zona de faja recortada y la inclusión de zonas rocosas que no puede ser cultivado dentro de las franjas de protección. Fuente: Troeh *et al.*, 1980.

Las tasas de erosión pueden ser más altas con los cultivos en faja que sin ellas (Emama Ligdi y Morgan, 1995). En las pendientes más pronunciadas, 12° a 16°, el filtro de las fajas atrapa el sedimento, pero tienen poco efecto sobre la escorrentía (Boubakari & Morgan, 1999). La pendiente máxima a la que las franjas de hierba siguen siendo eficaces no se ha determinado. A pesar de que pueden ser inadecuados como la única medida de conservación en pendientes superiores a 8,5° (FAO 1965), estas han sido adoptadas por los agricultores en pendientes de hasta 30° (Wolde & Thomas, 1989) o incluso 50° (Sims *et al.*, 1999).

La principal desventaja de cultivo en fajas es la necesidad de que estén juntas, con espacios muy pequeños en el medio, lo que limita el tipo y uso de maquinaria. Por lo tanto, la técnica no es compatible con la agricultura altamente mecanizada. Aunque se trata de una consideración menos relevante en minifundios, la dificultad aquí es que gran parte de la tierra está ocupada por cultivos de protección efectiva de un valor limitado. Las franjas de hierba de contorno se introdujeron en Suazilandia por un decreto del rey Sobhuza II en 1948 y por la década de 1950 algunos 112000 km de fajas fueron cultivados,

protegiendo prácticamente todas las tierras de cultivo que rodean las granjas individuales. Las fajas fueron originalmente de 2 m de ancho, pero por la década de 1970 no había evidencia de que los agricultores estaban recortando gradualmente las áreas de las fajas. Sin embargo, el sistema de faja parece ser relativamente flexible en cuanto a anchura de la banda y puede haber poco beneficio adicional en tener tiras más anchas de 1,5 m. Wolde y Thomas (1989) encontraron que las tiras de 0,5 y 1,0 m reducen amplia pérdida de suelo a 36 % con respecto a un suelo desnudo y sin protección, pero al ampliar la franja a 1,5 m se tuvo una reducción adicional del 18%. En el sur de Limbourg, Países Bajos, las franjas de 1 m de ancho reducen la descarga de sedimentos en un 50% a 6 %, franjas anchas, de 5 m, un 60% a 90% y las de 10 m de ancho un 90% a 99% (Van Dijk *et al.*, 1996).

Cuadro 5
Anchuras de banda recomendados para el cultivo en fajas

Erosión hídrica (anchura de las fajas en suelos con bastante el alto consumo de agua	
2-5 % de pendiente	30 m
6-9 % de pendiente	25 m
10-24 % de pendiente	20 m
15-20 % de pendiente	15 m
La erosión eólica (fajas perpendiculares a la dirección del viento)	
Arenoso	6 m
Arena arcillosa	7 m
Franco arenoso	30 m
Franco	75 m
Franco limoso	85 m
Franco arcilloso	105 m

Fuente: tomado de la FAO (1965), Cooke y Doornkamp (1974).

Las plantas elegidas para formar franjas de protección permanentes son generalmente pastos. Estos deben ser perennes, rápidos de establecer y capaces de soportar periodos de inundaciones y sequías. Estos deben tener sistemas radiculares profundos para reforzar el suelo y reducir el desprendimiento del suelo, una densidad uniforme de planta y un crecimiento parejo proporciona un filtro para los sedimentos y reducen la velocidad del flujo. Sus puntos de crecimiento deben estar cerca del suelo o por debajo de este para que no se pasten y puedan recuperarse de los daños después de un incendio. Deben ser o bien estériles o propagarse muy lentamente, de modo que no se conviertan en malas hierbas. Las especies de *Rhizomous* deben ser evitadas, ya que se propagan muy rápidamente en la tierra circundante. Los pastos Tussocky, tales como el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), deben evitarse porque concentran mucho

el flujo. Pastos con un hábito de crecimiento erecto y de entretejido de tallos actúan como un filtro poroso, son más eficaces en la reducción de la erosión que aquellos con rizomas delgados rastreros y con una forma de crecimiento más horizontal (Lakew & Morgan 1996; Melville y Morgan, 2001). Especies adecuadas incluyen el pasto Napier (*Pennisetum purpureum*), pasto Guatemala (*Tripsacum laxum*), Makarikari (*Panicum coloratum*), alpiste (*Phalaris canariensis*), avena (*Hyparrhenia spp*.), trigo (*Agropyron spp*.) y Lyme (*spp Elymus*.).

El pasto vetiver (*Vetiver zizanioides*) se establece rápidamente y no compite con los cultivos adyacentes. Se adapta a una amplia gama de condiciones climáticas y del suelo con tolerancia a metal pesado y a la toxicidad de solución salina (Pease y Truong, 2002). Durante un período de 11 meses en un oxisol con yuca en la Estación de Investigación de Santander de Quilichao, cerca de Cali, Colombia, la pérdida de suelo fue de 1,3 t ha^{-1} con cultivo en franja de pasto vetiver y de 4.0 t ha^{-1} con franjas de pasto Napier y 8,3 t ha^{-1} sin medidas de conservación (Laing, 1992). El pasto vetiver tiene la ventaja de que no es aceptable para el ganado y, por tanto, cualquier franja formada a partir de ella es probable que se mantenga intacta y no proporciona ingresos para el agricultor, mientras que el pasto Napier puede ser cortado para la alimentación del ganado. Es evidente que la situación ideal es que el valor económico de las franjas de pastos sea igual o mayor que al que le hubiera dado la tierra si estuviera en producción agrícola.

El sistema de cultivo en franjas también puede ser usado para proporcionar refugio en el campo a los cultivos sensibles al viento y proteger el suelo contra la erosión eólica. En los pantanos del este de Inglaterra, franjas de cebada se utilizan para proteger las cebollas, remolacha y zanahorias de daños por el viento y para controlar la erosión de la turba en los suelos de las tierras bajas. La cebada se siembra en febrero o marzo, dando tiempo para que emerja antes que el cultivo principal sembrado a mediados o finales de abril, el período crítico para la erosión. Una vez que el cultivo principal tiene la suficiente biomasa para llevar a cabo una función protectora, la cebada se desbroza. La cebada cumple con los requisitos de diseño de una planta de refugio las hojas aovadas para reducir al mínimo el riesgo de ráfagas de vientos fuertes, hojas rígidas para reducir el aleteo, y de ese modo minimizar el "efecto pared", y un hábito de crecimiento vertical con al menos 0,65 $kgDMm^{-3}$ de biomasa uniforme en los 5 cm más bajos para proporcionar un filtro adecuado (Morgan, 1989). Las tiras de cebada deben ser espaciadas a distancias de ocho a diez veces su altura, que es cada 2 m si la cebada es de 20 cm de altura.

Las franjas de barrera pueden ser utilizadas para proteger los cuerpos de agua de la contaminación por el sedimento y productos químicos, en particular el fósforo. Para este propósito, barreras de pasto necesitan ser colocadas en posiciones críticas en el paisaje, por ejemplo: junto a los ríos, lagos y embalses, donde forman barreras de ribera; en las convexidades de las laderas para

reducir las velocidades de escurrimiento y prevenir la iniciación de surcos; y a través de las vías de agua y el movimiento de sedimentos, tales como pistas sin asfaltar. Necesita diseñarse para atrapar todo el sedimento, incluyendo las partículas finas de arcillas, estas deben ser más anchas que las descritas anteriormente. Barreras de ribera son a menudo de una amplitud de 5 a 10 m. Una franja de 9 m de amplitud es por lo general suficiente para atrapar 80% del sedimento (Servicio de Conservación de Recursos Naturales, 1999). Los estudios en Dinamarca indican que una franja de ancho de 12 m es suficiente para atrapar todo el sedimento y partículas de fosforo transportadas desde laderas circundantes y evitar que entre en el curso de agua (Kronvang *et al.*, 2000). Debe tenerse en cuenta que su capacidad de trampa de sedimentos está "diseñado para fallar", ya que pierde eficacia con el tiempo, porque el sedimento se acumula pendiente arriba de la franja. Cuando se acumula el sedimento hasta una profundidad de unos 150 mm, es recomendable que se elimine por la labranza para restablecer la barrera. De lo contrario, existe el riesgo de que la escorrentía sea desviada alrededor de la barrera. La siega controlada de la vegetación de barrera estimula un crecimiento más vigoroso, lo que la hace más eficaz en la absorción de nutrientes y el secuestro de carbono.

Los bosques pueden ser utilizados para barreras de ribera con las ventajas adicionales de la creación de sombra para el medio acuático y una diversidad de hábitat para la vida silvestre. Típicamente, comprenden tres zonas: 1. una zona adyacente a la tierra agrícola de especies de pastos mezclados que forman un filtro; 2. una zona intermedia de bosque gestionado; y 3. una zona de bosque en estado natural junto al río. La primera zona, por lo general de 10 m de ancho, reduce el escurrimiento un 56% a 72% y el transporte de sedimentos un 78% a 83% (Sheridan *et al.*, 1999). Cuando la tierra de los alrededores es pasto y no de cultivo, esta zona se puede eliminar. Cuando la barrera de ribera se instala junto a un río en una llanura de inundación que es más ancho que 100 m, la anchura de las zonas 2 y 3 combinada debe al menos tener 30 m. Para llanuras de inundación más estrechas, la anchura combinada debe ser 13.7 m.

Los cultivos múltiples

El objetivo de cultivos múltiples es aumentar la producción de la tierra mientras que proporciona la protección del suelo contra la erosión (Fotografía 4). El método involucra secuencial de cultivo, creciendo dos o más cosechas al año o intercalados, creciendo dos o más cultivos en el mismo pedazo de tierra al mismo tiempo. La mayoría de los esquemas implican la mezcla de dos cultivos. Los cultivos múltiples han sido tradicionalmente practicados en el Caribe; con un promedio de 0,2 ha de tamaño, proporcionan frutas y verduras para muchas familias en las zonas rurales. Los que están en Granada combinan árboles frutales (el más común es el plátano, pero también pueden

encontrarse coco, cacao y mango) con verduras (especialmente tubérculos como el boniato y el ñame). Gandules, cacahuetes, malanga, pimiento y tomate también se cultivan. Por lo tanto, los cultivos múltiples, los ecosistemas naturales de varias capas (Hoogerbrugge y Fresco, 1993). A pesar de que la huerta tiene una apariencia confusa (Figura 7), la organización de la tierra cultivada es sistemática y los mejores agricultores llevan a cabo el deshierbe periódico, la aplicación selectiva de fertilizantes y el riego (Brierley, 1976).

Fotografía 4. Campo de flores, utilizando el manejo de cultivos múltiples

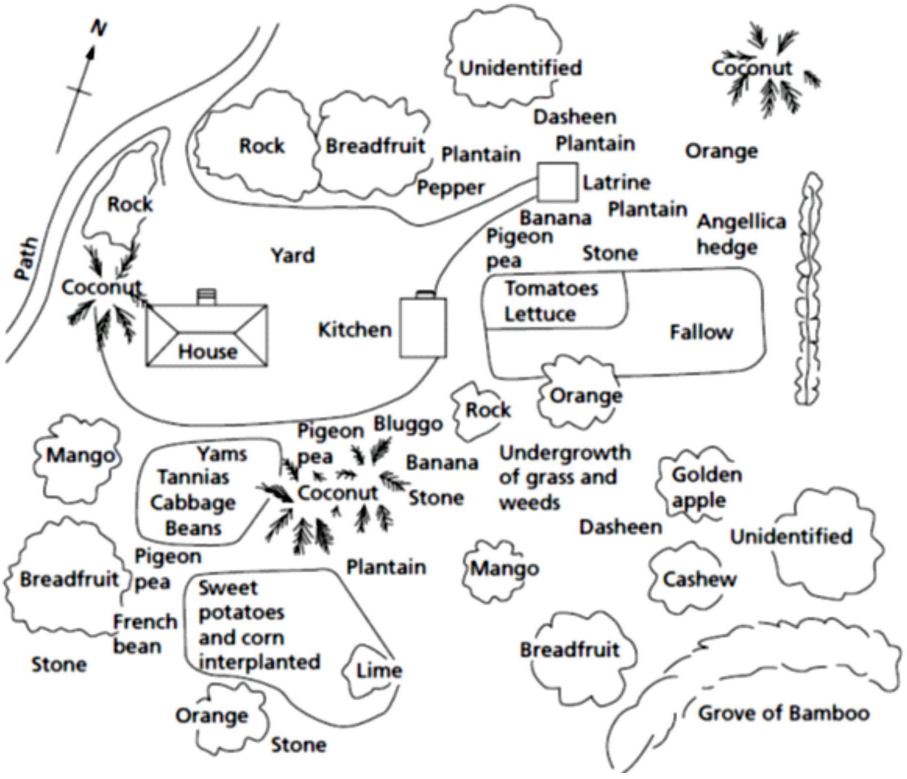
Fuente: tomado de PXHERE, 2020.

Cuando se utiliza el cultivo secuencial, se debe prestar atención al orden en el que se cultivan las cosechas. Lal (1976) encontró que en una pendiente de 6°, cerca de Ibadan, Nigeria, una cosecha de maíz seguido por uno de caupí sin labranza produjo una pérdida de solo 0,2 t ha^{-1}. El crecimiento de caupí seguido del maíz, pero con labranza, dio una pérdida de suelo de 6,2 t ha^{-1}. Aunque es difícil aislar los efectos de la labranza cero, parece que una secuencia de maíz-caupí produce menos erosión que uno caupí-maíz, pues el maíz es un cultivo más agotador para el suelo y, cuando se cultiva segundo, se siembra en un suelo ya parcialmente agotado. La pérdida de suelo es también mayor en virtud de maíz que de caupí (Lal, 1977) y la diferencia entre los dos cultivos es probable que sea mayor cuando el maíz es el segundo cultivo. Los rendimientos de los cultivos eran 4,9 t ha^{-1} para el maíz y 4,3 t ha^{-1} para caupí

en la secuencia de maíz-caupí, pero 5 t ha^{-1} para el caupí y solo de 2,1 t ha^{-1} para el maíz en la secuencia caupí-maíz.

El intercalado de maíz con yuca ofrece la ventaja de un dosel de dos plantas, dando una capacidad de interceptación superior; reduce el desprendimiento de las partículas del suelo por impacto de la gota de lluvia a un 35% a 60 % de los valores respectivos de yuca y maíz solo (Lal, 1987). En una pendiente de 6°, mezclado maíz y yuca, redujo la pérdida anual de suelo a 86 t ha^{-1}, en comparación con 125 t ha^{-1} para la yuca como un monocultivo (Lal, 1977). Ambos valores, sin embargo, están por encima de los niveles de tolerancia de pérdida de suelo, como son los de experimentos similares que implican la yuca con maní, maíz, caupí y pimientos (16,2 t ha^{-1}), cerca de Benín City, Nigeria (Odemerho y Avwunudiogba, 1993). Generalmente, los cultivos múltiples es necesarios que sean combinado con otras prácticas.

Figura 2. El uso del suelo en la huerta, cerca de Concord, San Juan, Granada, muestra de un ejemplo de cultivos múltiples



Fuente: Brierley, 1976.

Mulching

Mulching es la cubierta del suelo con residuos de cultivos tales como paja, tallos de maíz, hojas de palma o de rastrojo (Fotografía 5). La cubierta protege el suelo del impacto de las gotas de lluvia y reduce la velocidad de la escorrentía y el viento. Es más útil como alternativa a cultivos de cobertura en zonas secas donde la insuficiencia de lluvia impide el establecimiento de una cubierta vegetal antes de la aparición de fuertes lluvias o vientos fuertes, o cuando compite un cultivo de cobertura por la humedad con el cultivo principal. En los trópicos semi húmedos, los efectos secundarios de un mulch son la disminución de las temperaturas del suelo y el aumento de la humedad, lo que puede aumentar el rendimiento. En otros lugares, los efectos pueden ser perjudiciales. En climas fríos, la reducción en la temperatura del suelo acorta la temporada de crecimiento, mientras que, en zonas húmedas, una mayor humedad del suelo puede inducir a la gleyzación y condiciones anaeróbicas.

La eficacia del mulch en la reducción de la erosión fue demostrada por los experimentos de campo de Borst y Woodburn (1942), quienes encontraron que, en un suelo franco limoso en una pendiente de 7°, la pérdida anual de suelo fue de 24,6 t ha^{-1} en un suelo desnudo sin cultivar, pero solo 1,1 t ha^{-1} en un suelo cubierto con un mantillo de paja. Lal (1976) encontró que si se cubre un alfisol en una pendiente de 6° con 6 t ha^{-1} de paja, resulta en una pérdida anual de suelo de 0,2 t ha^{-1} en comparación con 23,3 t ha^{-1} en el suelo desnudo.

Fotografía 5. Rastrojos de cosechas dejados en el campo o mulching

Fuente: tomado de PXHERE, 2020.

Aunque no siempre se logran pérdidas bajas en el suelo, el grado en que una capa de mulch reduce la erosión es generalmente impresionante. Un mulch de pasto de 4 t ha^{-1} aplicado a un suelo franco limoso en una pendiente 4,5° cerca de Dehra Dun, India, redujo la pérdida anual de suelo bajo maíz a 5,0 t ha^{-1} en comparación con 22,4 t ha^{-1} para el maíz con labranza convencional hacia arriba y hacia abajo de la pendiente (Khybri, 1989). Con mulch de pasto de 15 t ha^{-1} en un suelo franco arenoso con una pendiente de 3° cerca de Pakhribas, al este de Nepal, dio una pérdida anual de suelo bajo maíz de 16,9 t ha^{-1} en comparación con 32,8 t ha^{-1} con prácticas tradicional, seguido por dos labranzas (Sherchan *et al.*, 1990).

Mulch también puede ser utilizado en los cultivos de árboles. Usando ramajes podados como cubiertas de las rutas de recolección en una plantación de palma de aceite en Johor, Malasia, redujo la pérdida anual de suelo de 14,9 t ha^{-1} a 4,2 t ha^{-1}, registrados en caminos sin protección (Maene *et al.*, 1979). Un mulch de pasto aplicado entre filas de té joven en una pendiente de 6° en un ultisol cerca de Kericho, Kenia, redujo la pérdida media anual de suelo por más de tres años a 0,7 t ha^{-1} en comparación con 210,8 t ha^{-1} para suelo desnudo con labranza a mano entre las filas (Othieno, 1978).

La mayoría de las aplicaciones de mulch implican la difusión de los residuos de cosecha en la superficie de la tierra, pero este método crea problemas en la perforación y la plantación a través del mantillo, a menos que se utilice un equipo especializado. Un enfoque alternativo es incorporar el mulch en el suelo. Aunque esto reduce la cubierta de la superficie general, los elementos de mantillo ayudan a sostener la tierra, simulando el efecto de raíces de las plantas, y aumentando las tasas de infiltración. Duley y Russel (1943) encontraron que la incorporación de los residuos de los cultivos redujo la pérdida anual de suelo de 35,7 t ha^{-1} en un suelo desnudo a 9,9 t ha^{-1}. El efecto del mulch incorporado depende del material utilizado. La paja de trigo es particularmente eficaz, ya que genera un gran número de ventajas: un patrón uniforme de incorporación, un buen contacto entre el mantillo y el suelo, suficiente material en la superficie para formar presas en miniatura, detrás del cual los estanques de agua, y protege el suelo contra la formación de costras. Por el contrario, los tallos de maíz presentan rendimiento bajo debido a su gran tamaño medio, la superficie queda cubierta escasamente, el contacto con el suelo es pobre y los elementos individuales de estos son fácilmente lavados y transportados pendiente abajo (Abrahim y Rickson, 1989). En general, mulch incorporados son menos eficaces que los mulch sin incorporar.

Al utilizar mulch como coberturas para el control de la erosión eólica, se requiere rastrojos de pie, debido al peligro de que el viento se las lleve. Un lecho de 1 t ha^{-1} de rastrojo de trigo o de 2 t ha^{-1} de paja de trigo aplanado reducirá las tasas anuales de erosión eólica a un nivel tolerable de 0,2 t ha^{-1}. Para lograr el mismo efecto con el rastrojo de sorgo, se requiere un lecho de 6,7 t ha^{-1} (Chepil y

Woodruff 1963). En una revisión de la investigación llevada a cabo en el Sahel, Bielders *et al.* (1998) mostraron que 2 t ha^{-1} de rastrojo de mijo podría reducir la pérdida de suelo por entre 42% y 92 %, dependiendo de la velocidad del viento.

Existe una considerable evidencia experimental (Wischmeier 1973; Lal 1977b; Laflen y Colvin 1981; Norton *et al.*, 1985; y Bekele & Thomas 1992) para mostrar que la tasa de pérdida de suelo disminuye exponencialmente con un aumento en el porcentaje de área cubierta por un mantillo. El factor del mulch (MF), se define como la relación de la pérdida de suelo con un mantillo; sin él, está relacionado con el residuo porcentaje o la cubierta del mantillo (RC) por la expresión (Laflen y Colvin, 1981):

(Ec 1)

Donde el rango de valores está comprendido entre 0,01 a 0,07, dependiendo del grado de la perturbación del suelo por la labranza.

Para un arado de vertedera el valor es de 0,03 y para no laboreo de 0,06 (Norton *et al.*, 1985). Hussein y Laflen (1982) encontraron que la relación exponencial aplica solo a la erosión en surcos y que la tasa de erosión entre estos disminuye linealmente con el aumento de cobertura de residuos. Dado que para la mayoría de los suelos la contribución de la erosión entre surcos a la pérdida total de suelo es bastante pequeña para longitudes de pendiente que excedan los 25 m, la ecuación 1 se puede utilizar para obtener valores del factor de mantillo que, cuando se multiplica por los valores del factor C, lo que permite ser incluido en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, el efecto del mulch.

El mulch debe cubrir el 70% a 75 % de la superficie del suelo. Con paja, se debe aplicar una tasa de 5t ha^{-1} es suficiente para lograr esta cobertura. Una cubierta menor no protege adecuadamente el suelo, mientras que una cubierta superior puede retrasar la germinación y el crecimiento de las plantas. Coberturas más densas, al menos del 90 % de cobertura, se utilizan a veces con cultivos de árboles para controlar las malas hierbas. Una estimación de la tasa de aplicación requerida para controlar la erosión se puede hacer para un conjunto preseleccionado de condiciones, usando la ecuación de Manning para la velocidad de flujo y la relación entre n de Manning y la tasa de mulch para paja (Foster *et al.*, 1982):

erosión entre surcos (Ec. 2)
erosión en surcos (Ec. 3)

Donde "nm" es el valor de n debido al mulch y M es la tasa de mulch ($kg \cdot m^{-2}$). No existe un procedimiento similar para determinar las tasas de mulch

para el control de la erosión eólica, pero la eficacia de residuos de cultivos de pies depende del número de tallos de pie por unidad de área y su tamaño.

Como se indicó anteriormente, el control de la erosión con mulch posee problemas especiales para el agricultor, ya que puede obstruir las herramientas de labranza, el control de malezas y control de plagas se hacen más difíciles; la siembra bajo el residuo no siempre brinda buenos rendimientos y el rendimiento de los cultivos, especialmente en regiones húmedas y semi húmedas, son a veces más bajos. El mulch por sí solo no es siempre una técnica apropiada, pero cuando se combina con la labranza de conservación muchos de estos problemas se pueden superar. Posee un tremendo potencial como un método de control de la erosión.

Los fragmentos de roca en la superficie pueden actuar de la misma manera que el mulch. Las relaciones entre la tasa de erosión y el porcentaje cubierto por piedra suelen seguir el descrito por la Ecuación 1 (Poesen, 1992). Por lo tanto, las coberturas de piedra podrían ser apropiadas para el control de la erosión en áreas no agrícolas, tales como terraplenes de caminos y obras de construcción. Sin embargo, donde las piedras están incrustadas en un terreno sellado, la erosión entre surcos se puede incrementar con el porcentaje de cobertura de piedra porque el escurrimiento generado no puede infiltrarse en el suelo circundante de piedra impermeable (Poesen y Ingelmo-Sánchez, 1992).

En un suelo erosionable, fragmentos de roca también pueden inducir turbulencia local, lo que lleva a erosionar corriente arriba de las piedras y a la deposición aguas abajo de la piedra. Con pequeñas piedras o guijarros de alrededor de 15 mm, puede causar que la producción de sedimentos se incremente a medida que aumenta la cubierta de 0% a 20%, pero a mayores porcentajes de cobertura solo prevalece el efecto protector. En las cubiertas de 60% o más, la socavación es casi imposible. Pero para adoquines de alrededor de 86 mm de tamaño, no hay una reducción en la producción de sedimentos y la pérdida del suelo aumenta exponencialmente con el aumento del porcentaje de cobertura (Bunte y Poesen, 1994).

En este tenor, los fragmentos de roca se pueden reducir y aumentar la erosión de acuerdo con las circunstancias locales, su uso como abono a la erosión por el agua no pueden ser recomendados. No hay una reducción en la producción de sedimentos y la pérdida del suelo aumenta exponencialmente con el aumento de porcentaje de cobertura (Bunte y Poesen, 1994).

El panorama es diferente para el control de la erosión eólica. Un mulch de guijarro reduce la tasa de erosión eólica un 84% a 96 % (Li *et al.*, 2001). Guijarros de 25 mm de diámetro son más eficaces que los de diámetro de 100 mm, atrapan 2,8 veces más, probablemente porque las piedras más grandes crean más turbulencia (Li y Liu, 2003). Dado que el nitrógeno y el contenido orgánico del polvo es de dos a tres veces mayor que la del suelo local, el sedimento acumulado aumenta la fertilidad de los campos con mulch de

grava. Con el tiempo, los espacios entre los guijarros se llenan con el suelo y la superficie se vuelve más suave, reduciendo así la eficacia de la técnica. El laboreo, sin embargo, ayuda a devolver la grava a la superficie.

Revegetación

La vegetación juega un papel importante en el proceso de control de la erosión en las zonas de cárcavas, deslizamientos de tierra, dunas de arena, terraplenes de carreteras, despojos de minas y corredores de tuberías. La revegetación rápida es necesaria para la replantación de bosques en zonas despejadas por parche de corte. Los primeros casos enumerados representan ambientes marginales para el crecimiento de las plantas, donde el riesgo de no poder reestablecer la vegetación es alto. Los segundos casos enumerados son menos marginal y el objetivo es reducir al mínimo los daños causados durante la deforestación y establecer una cubierta rápidamente antes de que el medio ambiente tenga tiempo de deteriorarse.

Cuando se desarrolla un plan para la revegetación de un área, debe llevarse a cabo una prueba de suelo para establecer el pH, los niveles de nutrientes, el estado de humedad, los niveles de salinidad y la presencia de iones tóxicos. Todo esto influirá en la gama de especies que crecerán. Las condiciones climáticas también deben ser estudiadas, incluyendo la frecuencia de la sequía y anegamiento. Influencias topográficas en el clima local son importantes; por ejemplo, diferencias en la temperatura y humedad entre las pendientes por su exposición, también permite determinar los sitios secos y húmedos a través del efecto que tiene estas sobre el movimiento del agua en el suelo. Las especies de plantas deben ser seleccionados por sus propiedades de crecimiento rápido, resistencias a enfermedades y plagas, capacidad de competir con las especies menos deseables y adaptabilidad al suelo local y las condiciones climáticas. Siempre que sea posible, las especies nativas deben ser elegidas. Un estudio de los sitios vecinos a menudo da una buena indicación de qué especies son más probables de sobrevivir y prosperar. El uso de especies introducidas o exóticas no debe descartarse, especialmente en el medio ambiente local que se ha deteriorado más allá de las condiciones necesarias para la utilización de la flora local o cuando el número de especies locales son limitadas. El plan de revegetación debe permitir que la sucesión vegetal tenga lugar de forma natural. En muchos casos, el objetivo es establecer especies pioneras para dar cobertura inmediata y mejorar el suelo, permitiendo a las especies nativas entrar y restablecerse. Generalmente, una mezcla de especies de plantas es requerida, ya que es imposible predecir el éxito de una especie en ambientes marginales. Un monocultivo también es más susceptible a la enfermedad. Las especies que se mezclan deben incluir pastos, herbáceas y leñosas, tanto arbustos y árboles, salvo en algunas condiciones en las que esos requisitos específicos de mezcla son indeseables, como ciertos tipos de recuperación

de cárcavas o en los corredores de oleoductos. La cobertura detallada de los diversos métodos de establecimiento de la vegetación se puede encontrar en Gray y Leiser (1982) y Coppin y Richards (1990).

Restauración de cárcavas

El restablecimiento de la vegetación se utiliza en el control de la erosión en cárcavas (Fotografía 6) como un método para aumentar la infiltración y la reducción de la escorrentía superficial. Proporcionado alrededor de un 30% a 35 % de cobertura vegetal cercana al área de una cárcava en loess en la cuenca Xingzihe en forma de cercado y la prohibición de su uso para el pastoreo, puede conducir a un aumento natural de la cubierta de 70% a un 90 % dentro de tres o cuatro años. Sin embargo, con la siembra adicional de las hierbas y arbustos, el mismo efecto se puede lograr en dos años (Tang *et al*., 1987). Generalmente, el área alrededor de los barrancos necesita ser tratada con gramíneas, leguminosas, arbustos y árboles, o combinaciones de los mismos, con la ayuda en las primeras etapas de un mulch o el uso de geotextiles.

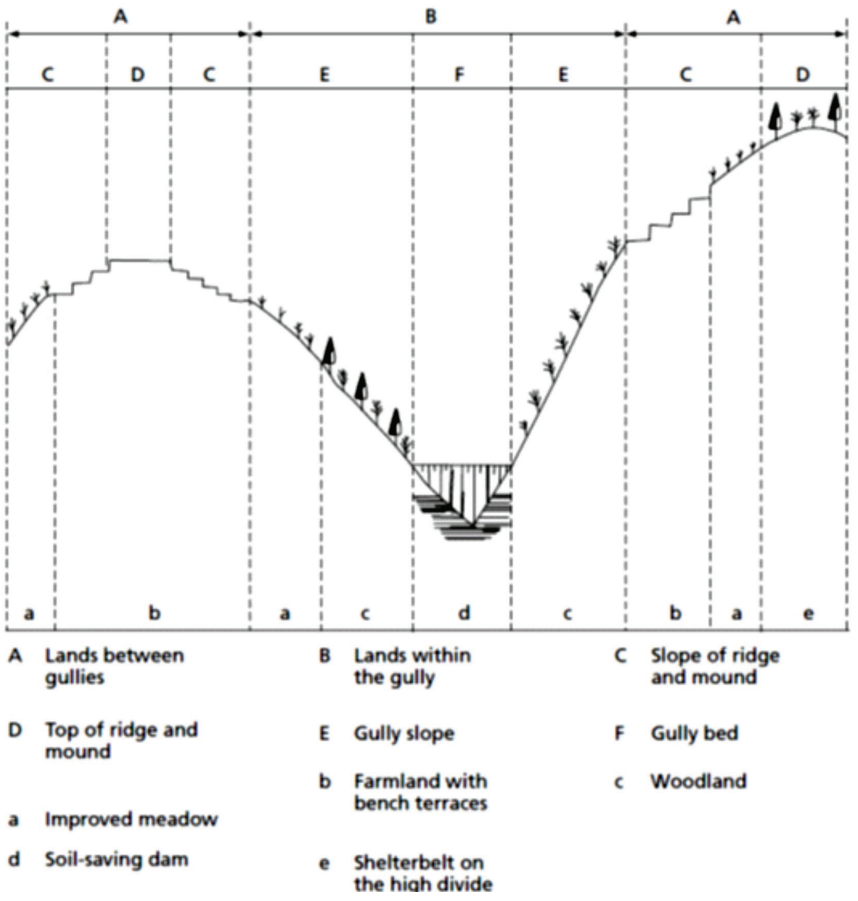
Fotografía 6. Cárcava, producida por la erosión hídrica de los suelos

Fuente: tomado de PXHERE, 2020.

La investigación llevada a cabo por la Suide Soil and Water Conservation Experiment Station de la Huang He Conservancy Commission muestra que

la forestación puede reducir la escorrentía en las zonas de loess abarrancados en un 65% a 80 % y la pérdida de suelo en 75% a 90%. El crecimiento de pastos reduce la escorrentía en 50% a 60 % y disminuye la pérdida de suelo en 60% a 80 % (Gong y Jiang 1977). La plantación de árboles y hierbas en las pendientes pronunciadas a los lados de la cárcava y el cultivo en terrazas de banco en las zonas más suaves (Figura 3) puede estabilizar la tierra y evitar que la creación de cárcavas. Mediante el apoyo a estas medidas con diques y embalses a lo largo del lecho de la cárcava, el volumen de sedimento que entra en las cárcavas de Huang He, en el valle de Wuding, se redujo en un 44 % durante el período 1971-1978 (Jiang et al., 1981).

Figura 3. Sección transversal donde se muestra las medidas adoptadas de conservación de suelo y aguas en la cárcava sobre loess en un área de China



Fuente: Jiang *et al.*, 1981.

En los estudios mencionados anteriormente, el objetivo principal era aumentar la infiltración. El logro de esto ayudará a reducir la cárcava cuando se trata de procesos superficiales, pero donde los barrancos son alimentados por tubos del subsuelo, o túneles, es necesario también para promover la infiltración en un patrón uniforme. Como los árboles y pastos tienen diferentes densidades de raíces y su sistema de radicular se extiende a diferentes profundidades, su mezcla puede dar lugar a más infiltración bajo los árboles, y estos pueden ser a su vez alimentados por el agua de un sistema de tuberías rompiendo el sistema de tuberías. Es más probable que ocurra si la especie de árboles es de raíz muy profunda. Por lo tanto, el mejor tratamiento para estas áreas tunelizadas es establecer una densa capa de pasto uniforme. Cuando las condiciones son muy marginales para que el pasto se restablezca, arbustos y árboles han de ser utilizados, pero en un sistema radicular que tienda más a lo horizontal que a lo vertical

Restauración de las cicatrices de deslizamientos

La plantación de árboles se recomienda como un procedimiento de estabilización de laderas propensas a movimiento de masas. Aunque la adición de árboles a una ladera a veces puede inducir deslizamiento debido al aumento en el peso (De Ploey, 1981), este efecto es generalmente compensado por un aumento en la cohesión asociada con la unión de la tierra dentro del sistema radicular y por la resistencia a la tracción de las propias raíces. Además, el efecto de sobrecarga puede ser minimizado mediante la colocación de árboles en la parte inferior en lugar de la parte superior de la pendiente. Las raíces vivas de los árboles pueden contribuir en 20 kPa a la resistencia de corte del suelo (O'Loughlin y Watson, 1979). Se cree que las raíces laterales contribuyen más a la cohesión a causa de su densidad mayor, mientras que las raíces verticales añaden mayor resistencia a la tracción y en donde se cruzan un plano de deslizamiento potencial ayudan a anclar el suelo a la pendiente. Especies de raíces muy profundas son las preferidas para la estabilización de la pendiente y el aumento de su resistencia al deslizamiento. Bishop y Stevens (1964) muestran que los árboles grandes pueden aumentar el esfuerzo de cizallamiento requerido para deslizamiento en 2.5 kPa, por lo que su eliminación puede promover deslizamientos de tierra. Las raíces del pasto pueden aumentar la resistencia al cizallamiento de los suelos entre un 0,1 y 11.6kPa (Lawrance *et al*. 1996; y Preston y Crozier, 1999).

El cercano a las áreas, en particular de ganado, pero también de animales salvajes, permite a la vegetación colonizar las cicatrices de deslizamientos de forma natural. La tasa de recuperación, sin embargo, es lenta. Las hierbas vienen en primer lugar, seguido por los pastos, pero solo después de unos cuatro años permite que los pastos sean perennes y dominen la cubierta para que los arbustos comiencen a aparecer. Después de siete años de la cubierta las

cicatrices en el Valle Mgeta, en Tanzania, fue solo del 25% del aérea cubierta de pastos (Lundgren, 1978). La recuperación de las cicatrices de deslizamiento de un suelo en la región montañosa de Wairarapa, Nueva Zelanda, de hace 20 años, la cobertura del pasto es solo el 80% de lo que en la tierra no erosionadas (Trustrum *et al.*, 1984). La plantación de árboles se intentó en las cicatrices de deslizamiento en el Valle Mgeta, pero las especies utilizadas, *Acacia mearnssii, Cupressus lusitanica* y *Eucalyptus maidenni*, resultaron inadecuadas. Todas las plantas *Cupressus lusitanica* murieron y la supervivencia de los demás fue amenazada por la erosión en la cárcava (Lundgren, 1978). Este ejemplo pone de relieve la necesidad de una cuidadosa selección de las especies en relación con las condiciones ambientales.

Repoblación forestal

Muchos países tienen programas de forestación encaminados a detener la erosión y la regulación de las inundaciones. La mayoría de los sistemas implican el cierre de la tierra a otros usos. Debe reconocerse, sin embargo, que el éxito de estos sistemas depende de los métodos utilizados para preparar la tierra para la replantación y estos métodos toman algunos años antes de que la capa superficial del suelo se desarrolle adecuadamente para albergar la reforestación. La erosión aumenta a menudo en los primeros años del trabajo de reforestación.

En las zonas Vasad y Kota de Gujarat, India, el cierre de las tierras de cárcavas al pastoreo permitió el establecimiento de una buena primera capa de pasto de especies deseables y luego un aumento en el número de árboles a través de la colonización natural. Ensayos de forestación también se llevaron a cabo con éxito, con el bambú, teca y eucalipto como las especies más prometedoras (Tejwani, 1981). Las especies principales en las plantaciones forestales en Kenia, *Cupressus lusitanica, Pinus patula, Pinus radiata* y *Eucalyptus saligna*, se seleccionan debido a su rápido crecimiento en lugar de su valor en la conservación de suelos y agua (Konuche, 1983). Aunque los pinos son generalmente satisfactorios, los resultados de ciprés dan un suelo de bosque desnudo susceptible a la erosión por flujo superficial. El papel de los eucaliptos no es claro debido a la evidencia de que cuando se plantan en zonas húmedas resultan en una reducción del suministro de agua en manantiales y ríos (Gosh *et al.*, 1978), sin embargo, cuando se cultiva en las zonas más secas no consumen grandes cantidades de agua (Konuche, 1983). Los eucaliptos desarrollan sus sistemas de raíces rápidamente y promueven la infiltración y el drenaje del subsuelo, lo que puede inducir a movimientos de masas cuando se plantan en laderas inclinadas con suelos poco profundos. Esto es debido a la impedancia para el movimiento del agua bajo la superficie en la interfase suelo-roca y la reducción de la resistencia al cizallamiento del suelo producto del aumento del contenido de humedad hasta la saturación (De Ploey & Cruz, 1979).

Restauración de pastos

La revegetación de tierras para pastos es la principal actividad de *Landgræsla Ríkisins* de *State Soil Conservation Service* de Islandia. El trabajo se concentra en la restauración de arenas y gravas desnudas en movimiento usando la siembra aérea. El terreno primero se cerca para impedir la entrada de ganado. A continuación se planta el *Elymus arenarius* en las dunas móviles, en tiras en ángulo recto en la dirección de los vientos erosivos y se fertilizan anualmente hasta que se haya detenido el movimiento de la duna. Esta planta crece bien sobre las dunas de arena y recoge y fija los sedimentos. Una vez que la arena ha sido estabilizada, el *Elymus* muere y *Festuca rubra, Poa pratensis* y *Phleum* se siembran de forma aérea. Las semillas que se utilizan son importadas debido a que el clima local es demasiado grave como para proporcionar un depósito de semillas. El fertilizante se aplica por vía aérea cada año durante los siguientes 2 a 4 años, momento en el cual se ha obtenido una capa de vegetación razonable. Ningún trabajo adicional se lleva a cabo y, en ausencia de aplicación continua de fertilizantes, las gramíneas sembradas se extinguen y la cubierta vegetal se convierte en pobre. Para esta etapa ya se ha alcanzado una estabilidad suficiente y suficiente materia orgánica, para permitir que la vegetación nativa recolonice.

Estas tierras permanecen protegidas durante 30 años (Runólfsson, 1978 y Arnalds *et al*., 1987) antes de ser devuelto al agricultor. En muchos países del mundo, la revegetación está limitada no solo por la infertilidad del suelo, sino también por la falta de agua. Además del suministro de fertilizantes en las primeras etapas de recuperación, es necesario proporcionar agua. Mututho (1989) modificó unas prácticas de cosecha tradicional del pueblo WaMatengo, en el sur de Tanzania, para formar fosos semicirculares de 5 a 12m^2 en la zona, de unos 15 a30 cm de altura para atrapar el agua en un esquema de recuperación de pastizales en el Distrito Kitui, Kenia. Los sitios fueron excluidos de pastoreo y los fosos sembrados con pastos perennes indígenas. Los fosos, requirieron considerables insumos de mano de obra para su construcción.

Una versión modificada, conocida como la fosa Katumani, se ha desarrollado (Gichangi *et al*., 1992) en una zona de 1,5 a 3 m^2. Estos pozos también están plantados con pastos indígenas, en el primer año después de la construcción, se cultivó frijol caupí y se pudo obtener un ingreso a corto plazo hasta que la tierra de pastoreo se haya rehabilitado.

Terraplén y taludes de corte

El rápido establecimiento de una cobertura de pastos o legumbres es esencial en los terraplenes y taludes de corte para minimizar la erosión superficial y mejorar la estabilidad del talud. Esto se consigue habitualmente por hidrosiembra, una mezcla de semillas y fertilizantes. Donde el control de

la erosión inmediata es necesario la utilización de mulch o geotextiles para el control del suelo y evitar que las semillas sean arrastradas. Un mantillo de paja, aplicado a 4 t ha^{-1} en el momento de la siembra y la fertilización de ese suelo en el otoño, puede reducir la erosión a niveles aceptables en pendientes de 45° (Dyrness, 1975) y permitir el establecimiento de más de un 70% la cobertura vegetal para el final del verano siguiente. La cobertura máxima, sobre todo de centeno, *bentgrass* y festuca, se logró después de unos 3 años, pero luego la falta de nitrógeno causó la disminución de la vegetación en un 10% de la cobertura después de 8 años. Para este tiempo, la pendiente ya estaba protegido por una densa camada de pasto muerto. La adición de más fertilizante revivió rápidamente la vegetación, que se desarrolló a un 90 % de cobertura en un año.

La mayor parte de la erosión se produjo en el primer año de tratamiento, después de lo cual la pérdida de suelo era prácticamente cero. Una forma alternativa de establecimiento de una cubierta es plantar césped natural sobre la pendiente, lo que es una práctica estándar en las áreas urbanas de Singapur (Ramaswamy *et al.*, 1981).

Las gramíneas, principalmente *Cynodon dactylon* y *clandestinum Pennisetum*, se utilizan para control de la erosión superficial en laderas de 30° a 65° de las carreteras en el este de Nepal (Howell *et al.*, 1991), pero el aumento de la infiltración da como resultado el riesgo de deslizamiento poco profundos. Con el fin de reducir el riesgo, pastos con raíces profundas, tales como *Eulaliopsis binata, reynaudiana Neyraudia, Saccharum spontaneum* y *microtheca Cymbopogon*, son recomendados para anclar el suelo. Sin embargo, estos pastos tienen el hábito de formar clústeres, por lo que la escorrentía tiende a concentrarse. Por otra parte, sus raíces no siempre se adhieren bien a los escombros gruesos y se desprenden cuando el material comienza a moverse. Para contrarrestar esto y proporcionar una mejor estabilidad, sucesiones de vegetales son plantadas, permitiendo que los pastos sean soportados por arbustos y árboles. Especies de árboles adecuados incluyen los *Pinus wallichiana, roxburghii Pinus, Acacia catechu, sissoo Dalbergia* y *nepalensis Alnus*. Con el fin de sostener la cubierta de pasto, el bosque debe permanecer abierta un 50%, por lo que será necesaria una gestión a largo plazo para evitar el cierre de la cubierta forestal (Howell, 1999).

A pesar de la versatilidad de la vegetación para el control de la erosión en las orillas de la carretera, la inclinación de muchas laderas y la dureza del medio ambiente a menudo significan que las soluciones vegetales necesitan integrarse con un trabajo estructural.

Corredores de los oleoductos

Los corredores de tuberías comprenden franjas en la tierra, generalmente de 20 a 40 m de ancho, que se extienden por muchos cientos de kilómetros en un país. Hay un riesgo de erosión entre el momento en que se instala la

tubería y el rebrote de la vegetación. La erosión severa puede obstaculizar los trabajos de restauración mediante el arrastre de las semillas y de plantas jóvenes. En muchas situaciones, el método más rentable es la combinación del restablecimiento de la vegetación, con métodos de control de la erosión. Cubrir la pendiente con un geotextil *surfacelaid* y luego se plantas árboles jóvenes a través del material geotextil. Cuando el medio local es adecuado, una capa de mulch puede ser utilizada en lugar del geotextil, pero es importante que la cobertura del suelo al menos sea de un 70 % durante todo el período vulnerable. El éxito de los trabajos de restauración, en particular cuando el objetivo es restablecer la comunidad local de plantas, se puede mejorar mediante una cuidadosa gestión de la capa superior del suelo durante su extracción, almacenamiento y retorno (Coppin y Richards, 1990) con el fin de preservar la mayor estructura, la cohesión como sea posible y de no dañar el banco de semillas contenida en el suelo original. El banco de semillas contiene material representativo de la comunidad local de la planta, debe ser vista como la base para el restablecimiento de la ecología local. La resiembra y la replantación se utilizan para complementar el banco de semillas.

En climas secos, o donde el trabajo de revegetación se lleva a cabo antes de la temporada seca, las semillas y las plantas deben ser regadas regularmente. Medidas para el manejo del agua, tales como hoyos y lunetas (Hudson, 1987) que se pueden utilizar para atrapar la escorrentía superficial en ocasiones de tormentas de lluvia. Como es el caso de los bancos de la carretera. Es importante planificar una sucesión de plantas, decidir qué especies se deben usar para la resiembra y la replantación. Es necesario hacer hincapié en las especies colonizadoras con el fin de establecer una cubierta lo más rápidamente posible. Una vez que se ha establecido una nueva cubierta vegetal, la sucesión de las plantas debe ser gestionada con el fin de garantizar que mantenga una cubierta uniforme de pastos y arbustos y tratar de no utilizar árboles, ya que sus raíces pueden dañar la tubería.

Restauración de dunas de arena

La primera etapa en la restauración de la duna de arena es estabilizar la arena en movimiento con el fin de crear un entorno adecuado para que las plantas crezcan (Fotografía 7). Las vallas se erigen para reducir la velocidad del viento, atrapar la arena y encerrar el área para impedir la entrada del ganado y las personas. La superficie de la arena se fija mediante estabilizadores de suelo o geotextiles. Las principales plantas utilizadas en la estabilización de dunas de arena en las zonas costeras de Europa y los EE. UU. son pasto de barrón (*Ammophila arenaria)* y el pasto de playa americano (*Ammophila breviligulata*). Estos tienen raíces fuertes, con extensas redes laterales y verticales, que les permiten enlazar el suelo, mientras que el pasto actúa como una trampa de sedimentos (Hesp, 1979). Se desarrollan bien en arena seca con baja disponibilidad de nutrientes. Los pastos

se deben plantar entre 100 y 150 mm de amplitud, debido al riesgo de que las semillas se vuelen y las plantas jóvenes sean dañadas por chorros de arena. Una vez estabilizadas las dunas pueden ser plantadas con arbustos y árboles.

Fotografía 7. Dunas inmovilizadas por pasto, para la posterior puesta en marchas para la producción agrícola

Fuente: tomado de PXHERE, 2020.

Enfoques similares se utilizan para estabilizar dunas del desierto. Con ocho años de haberse establecido una vegetación de rápido crecimiento *Tamarix aphylla* en las arenas cerca del oasis de Al-Hasa, en Arabia Saudita, la profundidad del horizonte orgánico había aumentado de 0 a 10 mm y el contenido de carbonato de calcio disminuyó de 30% a 15 % (Stevens, 1974). El efecto a largo plazo de tales esquemas no está claro, porque los árboles maduros agotan la humedad del suelo dentro de la duna. La supervivencia de la vegetación depende entonces de la capacidad de las raíces de los árboles para buscar las aguas subterráneas. Si estas resultan ser saladas, los árboles pueden morir y las dunas se pueden removilizar (Gupta, 1979). En general, donde la precipitación anualmente excede de 250 mm, las dunas se pueden estabilizar por la vegetación tras unos 5 a 10 años. Donde la precipitación anual es de entre 100 y 250 mm, la estabilización por la vegetación es posible, pero puede tardar 20 a 30 años. Donde la precipitación es inferior a 100 mm por año, un enfoque basado en la vegetación es arriesgado.

Restauración de áreas recreativas

El cierre de la tierra, para la replantación de árboles, arbustos y pastos se adopta con frecuencia en las áreas erosionadas debido al uso recreativo. Ejemplos de ello son el proyecto Tarn Hows en el *English Lake District* (Barrow *et al*., 1973), la recuperación de cárcavas en la zona de *Box Hill* de las llanuras del norte en el sudeste de Inglaterra (Streeter, 1977), los trabajos de restauración de las sendas en el área de *Three Peaks* del *Yorkshire Dales National Park* (Rose, 1989) y la revegetación del *Heavenly Ski Resort* en *Tahoe Basin*, California (Morse, 1992). Además de asegurar que las especies utilizadas para la replantación son compatibles con el entorno físico y resistente al pisoteo, la selección de plantas puede estar influenciada por consideraciones estéticas con el fin de mejorar la calidad del paisaje y por la necesidad de crear variados e interesantes hábitats de vida silvestre.

Agrosilvicultura

Los árboles pueden ser incorporados dentro de un sistema agrícola al plantarlos en un terreno que no es adecuado para la producción de cultivos. Donde los árboles están integrados voluntariamente con cultivos, animales o ambos, para explotar las interacciones positivas esperadas entre los árboles y otros usos de la tierra; la práctica se define como la agrosilvicultura (Lundgren y Nair, 1985). Los árboles ayudan a preservar la fertilidad de la tierra a través del retorno de la materia orgánica y la fijación de nitrógeno. Mejoran la estructura y la ayuda a mantener altas tasas de infiltración y mayor capacidad de retención de agua. Como resultado, se genera menos escorrentía y la erosión se controla mejor. Los árboles también son atractivos para el agricultor en el que prestan las necesidades adicionales, especialmente combustible, forraje y frutos. Árboles y arbustos de usos múltiples son, pues, fundamentales para la agroforestería.

La agroforestería se fomenta en muchos países como una forma de modificar los sistemas agrícolas existentes para promover la fertilidad del suelo, control de la erosión y una fuente de ingresos diversificadas. Hay tres tipos de práctica que pueden ser definidos. La agrosilvicultura implica la combinación de árboles y cultivos. La silvopastoril es la combinación de árboles y animales. La agrosilvopastoril combina árboles con cultivos y animales. En estos sistemas, los árboles pueden ser utilizados como suplemento de las medidas de control de erosión (por ejemplo, se añade a las prácticas de cultivo de fajas) o pueden ser utilizados para controlar la erosión directa (en cultivos múltiples en el sistema de intercalación de cultivos, pueden ser utilizados como setos cultivados esto a favor de las curvas de nivel, entre huertas). Aunque este último actúa como barrera viva y trampa de sedimentos, lo que lleva a la formación de terrazas con el tiempo, una característica importante de los setos

es que aumentan la infiltración de tres a ocho veces debido a sus sistemas de raíces (Kiepe, 1995) y con ello reducen la generación del escurrimiento. Mucha atención se ha dado a los sistemas de cultivo de faja, en el que se cultivan fajas de árboles de uso múltiple como coberturas de contorno separando las tierras de cultivo. En una pendiente de 16° en la *Butare Research Station*, Ruanda, la pérdida de suelo anual durante 4 años a partir de la yuca en un sistema de cultivo en fajas de una faja con 5 m de ancho de arbusto leguminoso *Calliandra calothyrsus,* crecido en una micro terraza era 12,5 t ha^{-1} en comparación con 111 t ha^{-1} para el cultivo tradicional de la yuca. El cultivo mixto de la yuca en fajas con judías, maíz y las patatas dulces, alternando con cultivos de cobertura de leguminosas, reduce la pérdida de suelo a 1 t ha^{-1} (König, 1992). En una gama de sistemas de fajas en un Alfisol, con una pendiente de 4° cerca de Ibadan, Nigeria, pérdida de suelo anual de en dos años para una rotación maíz-caupí fue de 1,6 t ha^{-1} con setos de *Leucaena* a 4 m de espaciamiento, 0,15 t ha-*1* con setos de Leucaena en 2 m de espaciamiento, 0,88 t ha^{-1} con setos de Gliricidia a 4 m espaciamiento y 1,7 t ha^{-1} con setos de Gliricidia a 2 m de espaciamiento en comparación con 8,7 t ha^{-1} con el cultivo convencional y 0.025 t ha^{-1} sin labranza (Lal, 1988). Los rendimientos en el maíz fueron similares en todos los sistemas. Los estudios realizados en varios países muestran que los sistemas agroforestales reducen la erosión al menos en diez veces, comparados con los que no tienen medidas de conservación de suelos (Young, 1998).

Los sistemas agrosilvícolas requieren una cuidadosa selección de los cultivos y especies de árboles si desean obtener algún beneficio por su interacción. De hecho, diversos estudios ponen en duda si esta interacción se puede lograr. Con los sistemas de cultivo en fajas en Bellary, India, los rendimientos de sorgo, cártamo y gramo de Bengala se redujeron en un 16, 53 %, respectivamente, cuando crecido entre fajas de *Leucaena leucocephala* a 4,5 m de espaciamiento (Srivastva y Rama Mohan Rao, 1988), principalmente como resultado del agotamiento de la humedad del suelo en la tierra cerca de los setos. Los rendimientos de sorgo también se reducen cuando se cultiva en combinación con *Acacia nilotica, Azadirachta indica* y *Eucalyptus* híbrido. Se observaron reducciones en el rendimiento de sorgo y mijo perla en sistemas agrosilvícolas cerca de Karnal, al norte de la India (Kumar *et al.*, 1990). Es evidente que con estos efectos adversos la aceptabilidad del sistema dependerá de si los rendimientos del grano son todavía suficientes para la supervivencia y si los ingresos adicionales se pueden obtener de los árboles. Según el *Natural Resources Conservation Service* (1999), las fajas de 12 m de espaciamiento permitirán el rendimiento de los cultivos del maíz y frijol de soja entre cinco y diez años antes de que los rendimientos reduzcan; fajas de 24 m de espaciamiento permitirán cultivo durante 20 años o más.

Las especies de árboles más importantes son: *Leucaena leucocephala*, que es un árbol de rápido crecimiento, se utiliza para el forraje, pero también

proporciona madera para combustible y madera para pulpa; *Prosopis juliflora* y *Prosopis chilensis*, que son resistentes a la sequía y proporcionar madera para combustible y postes; *Acacia albida*, que se adapta bien a los suelos arenosos y produce un buen forraje; *Acacia nilotica*; y *Sesbandia grandiflora*. Sistemas alternativos, son con árboles frutales lo que podría generar más ingresos o con cultivos de sombra.

Bibliografía

Abrahim, Y., & Rickson, R., 1989. "The effectiveness of stubble mulching in soil erosion control. En U. Schwertmann, R. Rickson, & K. Auerswald", *Soil erosion protection measures in Europe* (pp. 26-115). Soil Technology Series.

Aina, P., Lal, R., & Taylor, G., 1979. "Effects of vegetal cover on soil erosion on an alfisol". En R. Lal, & D. Greenland, *Soil physical properties and crop production in the tropics* (pp. 8-501). London: Wiley.

Arnalds, A., 1987. "Ecosystem disturbance in Iceland". *Arctic and Alpine Research*, 13-508.

Arnalds, A., 1999. "Incentives for soil conservation in Iceland". En D. Sanders, P. Huszar, S. Sombatpanit, & T. Enters, *Incentives in soil conservation: from theory to practice* (pp. 135–50). New Delhi : Oxford and IBH Publishing.

Barrow, G., Brotherton, D., & Maurice, O., 1973. "Tarn Hows experimental restoration" project. *Countryside Recreation News Supplement*, 13-18.

Bekele, M., & Thomas, D., 1992. "The influence of surface residue on soil loss and runoff". En H. Hurni, & K. Tato, *Erosion, conservation and small-scale farming* (pp. 52-439). Bern: Geographica Bernensia.

Beschta, R., 1978. "Long-term patterns of sediment production following road construction and logging in the Oregon Coast Range". *Water Resources Research* , 14: 1011–16.

Bielders, C., Rajot, J., & Koala, S., 1998. "Wind erosion research in Niger: the experience of ICRISAT and Advanced Research Organizations". En M. Sivakumar, M. Zöbisch, S. Koala, & T. Maukonen, *Wind erosion in Africa and west Asia: problems and control strategies* (pp. 95–123). Aleppo: ICARDA.

Bishop, D., & Stevens, M., 1964. *Landslides on logged areas in southeast Alaska.* USDA , Forest Research Service Paper NOR-1.

Boardman, J., & Evans, R., 1994. "Soil erosion in Britain: a review". En R. Rickson, *Conserving soil resources: European perspectives* (pp. 3-12). Wallingford: CAB International.

Borst, H., & Woodburn, R., 1942. "The effect of mulching and methods of cultivation on runoff and erosion from Muskingum silt loam". *Agricultural Engineering* , 23: 19–22.

Brierley, J., 1976. "Kitchen gardens in the West Indies with a contemporary study from Grenada". *Journal of Tropical Geography*, 43: 30–40.

Bunte, K., & Poesen, J., 1994. "Effects of rock fragment size and cover on overland flow hydraulics, local turbulence and sediment yield on an erodible soil surface". *Earth Surface Processes and Landforms*, 35-115.

Chepil, W., & Woodruff, N., 1963. "The physics of wind erosion and its control". *Advances in Agronomy*, 15: 211–302.

Cooke, R., & Doornkamp, J., 1974. *Geomorphology in environmental management.* Oxford: Oxford University Press.

Coppin, N., & Richards, I., 1990. *Use of vegetation in civil engineering.* London: CIRIA/Butterworths.

De Bano, L., Mann, L., & Hamilton, D., 1970. "Translocation of hydrophobic substances into soil by burning organic litter". *Soil Science Society of America Proceedings* , 34: 130–3.

De Ploey, J., 1981. *The ambivalent effects of some factors of erosion.* l'Université de Louvain, Institute de Géologie.

De Ploey, J., & Cruz, O., 1979."Landslides in the Serra do Mar, Brazil". *Catena*, 22-111.

Dimitrakopoulos, A., & Seilopoulos, D. (2002). "Effects of rainfall and burning intensity on early post fire soil erosion in a Mediterranean forest of Greece". En J. Rubio, R. Morgan, S. Asins, & V. Andreu, *Soil at the third millennium* (pp. 1351–7). Logroño: Geoforma Ediciones.

Dimitrakopoulos, A., Martin, R., & Papamichos, N., 1994. "A simulation model of soil heating during wildland fires". In M. Sala, & J. Rubio, *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires* (pp. 199–206). Logroño: Geoforma Ediciones.

Doerr, S., Leighton-Boyce, G., Shakesby, R., & Walsh, R., 2002. "The role of hydrophobicity in soil erosion processes: evidence from Portuguese forest soils". En J. Rubio, R. Morgan, S. Asins, & V. Andreu, *Soil at the third milllennium* (pp. 1311–22). Logroño: Geoforma Ediciones.

Duley, F., & Russel, J., 1943. "Effect of stubble mulching on soil erosion and runoff". *Soil Science Society of America Proceedings*, 7: 77–81.

Dyrness, C., 1975. "Grass-legume mixtures for erosion control along forest roads in western Oregon". *Journal of Soil and Water Conservation*, 73-169.

Eppink, L., & Spaan, W., 1989. "Agricultural wind erosion control measures in The Netherlands". En U. Schwertmann, R. Rickson, & K. Auerswald, *Soil erosion protection measures in Europe* (pp. 1–13). Soil Technology Series.

Evans, R., 1977. "Overgrazing and soil erosion on hill pastures with particular reference to the Peak District". *Journal of the British Grassland Society* , 32: 65–76.

FAO, 1965. *Soil erosion by water.* Rome: FAO.

Fenton, E., 1937. "The influence of sheep on the vegetation of hill grazings in Scotland". *Journal of Ecology* , 25: 424–30.

Foster, G., 1982. Modeling the erosion process. En C. Haan, H. Johnson, & D.

Brakensiek, *Hydrologic modeling of small watersheds* (pp. 297–380.). American Society of Agricultural Engineers Monograph .

Fournier, F., 1972. “Soil conservation”. *Nature and Environment Series*.

Gale, W., McColl, R., & Xie, F., 1993. “Sandy fields traditional farming water conservation in China”. *Journal of Soil and Water Conservation*, 7-474.

Gichangi, E., Jones, R., Njarui, D., Simpson, J., Mututho, J., & Kitheka, S., 1992. “Pitting practices for rehabilitating eroded grazing land in the semiarid tropics of eastern Kenya: a progress report”. En H. Hurni, & K. Tato, *Erosion, conservation and small-scale farming* (pp. 27-313). Bern: Geographica Bernensia.

Giovannini, G., 1994. “The effect of fire on soil quality” . En M. Sala, & J. Rubio, *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires* (pp. 15–27). Logroño: Geoforma Ediciones.

Giovannini, G., Lucchesi, S., & Giachetti, M., 1988. “Effects of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility”. *Soil Science* , 146: 255–61.

Gong, S., & Jiang, D., 1977. “Soil erosion and its control in small gully watersheds in the rolling loess area on the middle reaches of the Yellow River”. *Paris symposium on erosion and soil matter transport in inland waters, preprint.*

Gosh, R., Kaul, O., & Subba-Rao, B., 1978. “Some aspects of water relations and nutrition in Eucalyptus plantations”. *Indian Forester*, 24-517.

Gray, D., & Leiser, A., 1982. *Biotechnical slope protection and erosion control.* New York: Van Nostrand Reinhold.

Gril, J., Canler, J., & Carsoulle, J., 1989. “The benefits of permanent grass and mulching for limiting runoff and erosion in vineyards. Experimentations using rainfall simulations in the Beaujolais”. En U. Schwertmann, R. Rickson, & K. Auerswald, *Soil erosion protection measures in Europe* (pp. 66-157). Soil Technology Series 1.

Gupta, J., 1979. “Some observations on the periodic variations in moisture in stabilized and unstabilized dunes of the Indian desert”. *Journal of Hydrology*, 6-153.

Hesp, P. 1., 1979. “Sand trapping ability of culms of marram grass (Ammophila arenaria)”. *Journal of the Soil Conservation Service*, 60-156.

Hoogerbrugge, I., & Fresco, L., 1993. *Homegarden systems: agricultural characteristics and challenges.* International Institute for Environment and Development Gatekeeper Series 39.

Howell, J., 1999. *Roadside bio-engineering.* Department of Roads, HM Government of Nepal, Kathmandu.

Howell, J., Clark, J., Lawrance, C., & Sunwar, I., 1991. *Vegetation structures for stabilising highway slopes. A manual for Nepal.* Department of Roads, HM Government of Nepal, Kathmandu.

Hudson., 1981. *Soil conservation* (2nd ed.). N. W: Batsford.

Hudson, N., 1987. "Soil and water conservation in semiarid areas". *FAO Soils Bulletin 57*.

Husse, B., 1991. *Soil conservation in vineyards.* Universität Trier Forschungstelle Bodenerosion.

Hussein, M., & Laflen, J., 1982. "Effects of crop canopy and residue on rill and interrill soil erosion". *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 15-1310.

Jeffers, J., 1986. "The role of ecosystem theory in upland land use and management". En G. Chisci, & R. Morgan, *Soil erosion in the European Community: impact of changing agriculture* (pp. 51-65). Rotterdam: Balkema.

Jiang, D., Qi, L., & Tan, J., 1981. "Soil erosion and conservation in the Wuding River Valley, China". En R. Morgan, *Soil conservation: problems and prospects* (pp. 79-461). Chichester: Wiley.

Khybri, M., 1989. "Mulch effects on soil and water loss in maize in India". En W. Moldenhauer, N. Hudson, T. Sheng, & S. Lee, *Development of conservation farming on hillslopes* (pp. 8-195). Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society.

Kiepe, P., 1995. "No runoff, no soil loss: soil and water conservation in hedgerow barrier systems". *Tropical Resource Management Papers*, 10.

König, D., 1992. The potential of agroforestry methods for erosion control in Rwanda. *Soil Technology*, 76-167.

Konuche, P., 1983. "Effects of forest management practices on soil and water conservation in Kenya forests". En D. Thomas, & W. Senga, *Soil and water conservation in Kenya* (pp. 9-350). Institute of Development Studies and Faculty of Agriculture, University of Nairobi.

Kronvang, B., Laubel, A., Larsen, S., & Iversen, S., 2000. "Soil erosion and sediment delivery through buffer zones in Danish slope units". *International Association of Scientific Hydrology Publication*, 67–73.

Kumar, A., Samra, J., Singh, N., & Batra, L., 1990. "Tree canopy–intercrop relationships in an agroforestry system". In *Proceedings, International symposium on water erosion, sedimentation and resource conservation.*

Kutiel, P., 1994. "Fire and ecosystem heterogeneity: a Mediterranean case study". *Earth Surface Processes and Landforms*, 19: 87–94.

Laflen, J., & Colvin, T., 1981. "Effect of crop residue on soil loss from continuous row cropping". *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 9-605.

Laflen, J., & Moldenhauer, W., 1979. "Soil and water losses from corn-soybean rotations". *Soil Science Society of America Journal* , 43: 1213–15.

Laing, D., 1992. *From the International Center for Tropical Agriculture (CIAT).* Cali, Colombia.: Vetiver Newsletter.

Lakew, D., & Morgan, R., 1996. "Contour grass strips: a laboratory simulation of their

role in erosion control using live grasses". *Soil Technology* , 9: 83–9.

Lal, R., 1976. *Soil erosion problems on an alfisol in western Nigeria and their control.* IITA.

Lal, R., 1977. "Soil management systems and erosion control". En D. Greenland, & R. Lal, *Soil conservation and management in the humid tropics* (pp. 7-93). Chichester: Wiley.

Lal, R., 1977. "Soil-conserving versus soil-degrading crops and soil management for erosion control". En D. Greenland, & R. Lal, *Soil conservation and management in the humid tropics* (pp. 6-81). London: Wiley.

Lal, R., 1987. "Research achievements towards soil and water conservation in the tropics: potential and priorities". En I. Pla Sentis, *Soil conservation and productivity* (pp. 87-755). Maracay: Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo.

Lal, R., 1988. "Soil erosion control with alley cropping". En S. In Rimwanich, *Land conservation for future generations* (pp. 45-237). Bangkok: Land Development Department.

Lawrance, C., Rickson, R., & Clark, J., 1996. "The effect of grass roots on the shear strength of colluvial soils in Nepal". En M. Anderson, & S. Brooks, *Advances in hillslope processes* (pp. 68-857). Chichester: Wiley.

Li, X., & Liu, L., 2003. "Effect of gravel mulch on aeolian dust accumulation in the semiarid region of northwest China". *Soil and Tillage Research*, 73-81.

Li, X., Liu, L., & Gong, J., 2001. "Influence of pebble mulch on soil erosion by wind and trapping capacity for windblown sediment". *Soil and Tillage Research*, 42-137.

Lim, K., 1988. "A study on soil erosion control under mature oil palm in Malaysia". En S. Rimwanich, *Land conservation for future generations* (pp. 1–13). Bangkok: Department of Land Development.

Lundgren, B., & Nair, P., 1985. "Agroforestry for soil conservation". En S. El-Swaify, W. Moldenhauer, & A. Lo, *Soil erosion and conservation* (pp. 11-703). Ankeny: Soil Conservation Society of America.

Lundgren, L., 1978. "Studies of soil and vegetation development on fresh landslide scars in the Mgeta Valley, western Uluguru Mountains, Tanzania". *Geografiska Annaler*, 91-127.

Maene, L., Thong, K., Ong, T., & Mokhtaruddin, A., 1979. "Surface wash under mature oil palm. In E. Pushparajah", *Proceedings, Symposium on water in Malaysian agriculture.* (pp. 16-203). Kuala Lumpur: Malaysian Society of Soil Science.

Maene, L., Thong, K., Ong, T., & Mokhtaruddin, A., 1979. "Surface wash under mature oil palm. En E. Pushparajah", *Proceedings, Symposium on water in Malaysian agriculture* (pp. 16-203). Kuala Lumpur: Malaysian Society of Soil Science.

Megahan, W., & Molitor, D., 1975. "Erosional effects of wildfire and logging in Idaho". *Symposium on watershed management* (pp. 423–44). St Giles, MI: American Society of Civil Engineers.

Melville, N., & Morgan, R., 2001. "The influence of grass density on effectiveness of

contour grass strips for control of soil erosion on low-angle slopes". *Soil Use and Management* , 17: 278–81.

Monnier, G., & Boiffin, J., 1986. "Effect of the agricultural use of soils on water erosion: the case of cropping systems in western Europe". En G. Chisci, & R. Morgan, *Soil erosion in the European Community: impact of changing agriculture* (pp. 17-32). Rotterdam: Balkema.

Morgan, 2005. *Soil Erosion and Conservation* (third edition ed.). Blackwell Science Ltd.

Morgan, R., 1989. "Design of in-field shelter systems for wind erosion control". En U. Schwertmann, R. Rickson, & K. Auerswald, *Soil erosion protection measures in Europe* (pp. 15–23). Soil Technology Series 1.

Mututho, J., 1989. "Some aspects of soil conservation on grazing lands". En D. Thomas, E. Biamah, A. Kilewe, L. Lundgren, & B. Mochoge, *Soil and water conservation in Kenya* (pp. 315–22). University of Nairobi/SIDA: Department of Agricultural Engineering.

Natural Resources Conservation Service, 1999. *CORE4 conservation practices training guide. The common sense approach to natural resources conservation.* USDA Natural Resources Conservation Service.

Naveh, Z., 1975. "The evolutionary sequence of fire in the Mediterranean region". *Vegetation* , 9: 199–06.

Norton, L., Cogo, N., & Moldenhauer, W., 1985. "Effectiveness of mulch in controlling erosion". En S. El- Swaify, W. Moldenhauer, & A. Lo, *Soil erosion and conservation* (pp. 598–606). Ankeny, IA: Soil Conservation Society of America.

O'Loughlin, C., & Watson, A., 1979. "Root-wood strength deterioration in radiata pine after clearfelling". *New Zealand Journal of Forestry Science*, 93-284.

Odemerho, F., & Avwunudiogba, A., 1993. "The effects of changing cassava management practices on soil loss: a Nigerian example". *Geographical Journal* , 159: 63–9.

Okigbo, B., 1977. "Farming systems and soil erosion in West Africa". En D. Greenland, & R. Lal, *Soil conservation and management in the humid tropics* (pp. 151–63). London: Wiley.

Okigbo, B., & Lal, R., 1977. "Role of cover crops in soil and water conservation". *FAO Soils Bulletin*, 33: 97–108.

Othieno, C., 1978. "An assessment of soil erosion on a field of young tea under different soil management practices". In *Soil and water conservation in Kenya* (pp. 62–73). Occasional Paper .

Pease, M., & Truong, P., 2002. "Vetiver grass technology: a tool against environmental degradation in southern Europe". In J. Rubio, R. Morgan, S. Asins, & V. Andreu, *Soil at the third millennium* (pp. 78-2167). Logroño: Geoforma Ediciones.

Poesen, J., & Ingelmo-Sanchez, F., 1992. "Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position". *Catena* ,

19(5), 451-474.

Poesen, J., & Ingelmo-Sanchez, F., 1992. “Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position”. *Catena*, 74-451.

Pratt, D., & Gwynne, M., 1977. *Rangeland management and ecology in East Africa.* London: Hodder and Stoughton.

Preston, N., & Crozier, M., 1999. “Resistance to shallow landslide failure through root-derived cohesion in East Coast Hill Country soils, North Island, New Zealand”. *Earth Surface Processes and Landforms*, 75-665.

Pxhere, 2020. Varias fotos. Disponible en: https://pxhere.com/es/. Consultado el 28 de agosto de 2020.

Ramaswamy, S., Aziz, M., & Narayanan, N., 1981. “Some methods of control of erosion on natural slopes in urbanizd areas”. En T. Tingsanchali, & H. Eggers, *Southeast Asian regional symposium on problems of soil erosion and sedimentation* (pp. 39-327). Bangkok: Asian Institute of Technology.

Rose, S., 1989. “The Three Peaks Project: tackling footpath erosion”. In *Erosion knows no boundaries* (pp. 78-369). Steamboat Springs, CO: International Erosion Control Association.

Runólfsson, S., 1978. “Soil conservation in Iceland”. En M. Holdgate, & M. Woodman, *The breakdown and restoration of ecosystems* (pp. 40-231). New York: Plenum.

Shakesby, R., Coelho, C. d., Ferreira, A., Terry, J., & Walsh, R., 1993. “Wildfire impacts on soil erosion and hydrology in west Mediterranean forest, Portugal”. *International Journal of Wildland Fire*, 3: 95–110.

Sherchan, D., Chand, S., Thapa, Y., Tiwari, T., & Gurung, G., 1990. “Soil and nutrient losses in runoff on selected crop husbandry practices on hill slope soil of the eastern Nepal”. En *Proceedings, International symposium on water erosion, sedimentation and resource conservation* (pp. 98-188). Dehra Dun: Central Soil and Water Conservation Research and Training Institute.

Sheridan, J., Lowrance, R., & Bosch, D., 1999. “Management effects on runoff and sediment transport in riparian forest buffers”. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* , 42: 55–64.

Sims, B., Rodríguez, F., Eid, M., & Espinoza, T., 1999. “Biophysical aspects of vegetative soil and water conservation practices in the inter-Andean valleys of Bolivia”. *Mountain Research and Development* , 19: 282–91.

Singh, G., Bhardwaj, S., & Singh, B., 1979. “Effect of row cropping of maize and soybean on erosion losses”. *Indian Journal of Soil Conservation*, 7: 43–6.

Srivastva, A., & Rama Mohan Rao, M., 1988. “Crop responses under different agroforestry practices in semiarid black soil region”. *Indian Journal of Soil Conservation*, 1-10.

Steindórsson, S., 1980. “Vegetation classification in Iceland”. *Islenzkar landbunadarrannsoknir*, 12(2), 11-57.

Stevens, J., 1974. “Stabilization of eolian sands in Saudi Arabia’s Al Hasa oasis”. *Journal of Soil and Water Conservation*, 33-129.

Streeter, D., 1977. “Gully restoration on Box Hill”. *Countryside Recreation Review*, 28-40.

Sulaiman, W., Maene, L., & Mokhtaruddin, A. (1981). “Runoff, soil and nutrient losses from an ultisol under different legumes”. En T. Tingsanchali, & E. H, *Southeast Asian regional symposium on problems of soil erosion and sedimentation* (pp. 275–86). Bangkok: Asian Institute of Technology.

Tang, K., Zhou, H., Hou, X., & Liu, Y., 1987. “The influence of destruction and reconstruction of vegetation on soil erosion and its control in the loess plateau of China”. En I. Pla Sentis, *Soil conservation and productivity* (pp. 72-963). Maracay: Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo.

Tejwani, K., 1981. “Watershed management as a basis for land development and management in India”. En R. Lal, & E. Russell, *Tropical agricultural hydrology* (pp. 55-239). Chichester: Wiley.

Terry, J., & Shakesby, R., 1993. “Soil hydrophobicity effects on rainsplash: simulated rainfall and photographic evidence”. *Earth Surface Processes and Landforms* , 18: 519–25.

Thorsteinsson, I., 1980a. “Beitargildi gróÐurlenda”. *Íslenzkar Landbúna rannsóknir*, 5-123.

Thorsteinsson, I., 1980b. «Nýting úthaga: beitarþungi». *Íslenzkar Landbúna rannsóknir*, 22-113.

Thorsteinsson, I., Ólafsson, G., & van Dyne, G., 1971. «Range resources of Iceland». *Journal of Range Management*, 24: 86–93.

Trabaud, L., & Lepart, J., 1980. “Diversity and stability in garrigue ecosystems after fire”. *Vegetation* , 43: 49–57.

Troeh, F., Hobbs, J., & Donohue, R., 1980. *Soil and water conservation for productivity and environmental protection.* Englewood Cliffs, NJ.: Prentice Hall.

Van Dijk, P., Kwaad, F., & Klapwijk, M., 1996. “Retention of water and sediment by grass strips”. *Hydrological Processes* , 10: 1069–80.

Wan Yusoff, W., 1988. “Forest management and conservation practices for controlling soil erosion in the natural forest of Peninsular Malaysia”. En S. Rimwanich, *Land conservation for future generations* (pp. 869–75). Bangkok: Department of Land Development.

Williams, C., & Joseph, K., 1970. *Climate, soil and crop production in the humid tropics.* Kuala Lumpur: Oxford University Press.

Wischmeier, W., 1973. “Conservation tillage to control water erosion”. En *Proceedings, National conservation tillage conference* (pp. 41-133). Ankeny, IA: Soil Conservation Society of America.

Wolde, F., & Thomas, D., 1989. “The effect of narrow grass strips in reducing soil loss and runoff in a Kabete nitosol, Kenya”. In D. Thomas, E. Biamah, A. Kilewe, L. Lundgren, & B. Mochoge, *Soil and water conservation in Kenya* (pp. 94-176). Department of Agricultural Engineering,University of Nairobi/SIDA.

Young, A., 1998. *Land resources: now and for the future.* Cambridge: Cambridge University Press.

Sección 3
Riesgos hidrometeorológicos

3.1. Inundaciones: causas, efectos y elementos mínimos a considerar en la construcción de sistemas de alerta temprana[1]

Carlos Díaz Delgado
Humberto Salinas Tapia
Khalidou M. Bâ
Carlos Alberto Mastachi Loza,
Adrián Torres Maya
Miguel Ángel Gómez Albores

Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua,
Universidad Autónoma del Estado de México

José Emilio Baró Suárez

Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

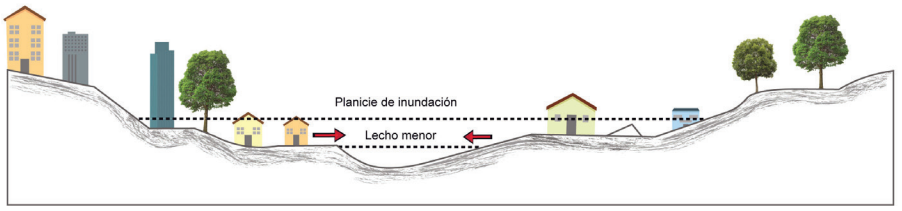
El objetivo principal de este capítulo es presentar de manera simple el concepto de inundación y tipos de esta. Se hace énfasis en la información mínima necesaria para diseñar una respuesta concreta y eficaz que fortalezca la resiliencia de una cuenca, la protección de vidas e infraestructura y mitigue el sufrimiento humano ante este tipo de riesgos socionaturales. Finalmente se formulan recomendaciones de elementos mínimos necesarios para la construcción de un sistema de alerta temprana contra inundaciones (SATI).

1 Este trabajo fue realizado bajo el patrocinio de los proyectos con clave UAEMex 4212/2016E y 4192/2016E patrocinados por la Fiducie de Recherche en hydrologie (Quebec-Canadá).

Una inundación es el evento provocado por la precipitación, oleaje, marea de tormenta, falla de alguna estructura hidráulica, o bien el deshielo de la parte alta de una cuenca en la primavera (cortina de hielo) que origina un incremento en el nivel de la superficie libre de agua, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay (Figura 1). Hasta un cierto umbral, una inundación es apreciada, pues contribuye al enriquecimiento de suelos, favoreciendo a la agricultura. Sin embargo, una vez superado dicho límite, la velocidad y volumen de agua sobrepasa el margen de tolerancia de la zona y con ello se incrementa la vulnerabilidad de la comunidad y sus bienes.

Generalmente, los daños impactan en la población, agricultura, ganadería e infraestructura. Las inundaciones pueden clasificarse de acuerdo con su origen en tres categorías: a) pluviales; b) fluviales y c) lacustres. La inundación puede denominarse, de acuerdo con sus lugares de ocurrencia, como urbana o rural. Y en función del tiempo en el que alcance su profundidad máxima, la inundación puede ser considerada como súbita, entendiendo este término como un tiempo en el cual no existe una respuesta suficiente del sistema para reaccionar con fines de evacuación o ejecución de acciones para mitigar los impactos del fenómeno. Los riesgos socionaturales, como las inundaciones, son causa de mucho sufrimiento en los países en desarrollo donde ejercen una fuerte presión sobre las economías de ingresos marginales y representan uno de los mayores peligros para un desarrollo sostenible.

Figura 1. Planicie de inundación



Fuente: modificado de Díaz-Delgado *et al.*, 2012.

Las inundaciones son consideradas riesgos socionaturales relacionados con el agua que afectan a millones de personas cada año y provocan muertes y pérdidas materiales de miles de millones de dólares a nivel mundial. Los desastres relacionados con el agua representan un abrumador 90% de todos los riesgos socionaturales a nivel mundial, según el Centro de Investigación sobre Epidemiología de Desastres (2009) (por sus siglas en inglés CRED) - se utiliza en este informe para proporcionar un desastre global, continental, nacional o regional estadísticas. Desde el año 2000 hasta finales de 2018, se ha informado de un total de 5,338 DRA que han provocado más de 326000 muertes y pérdidas

económicas de más de 1.7 trillones de dólares a nivel mundial. Las inundaciones representaron alrededor del 54% de todas las DRA. Asia parece ser el continente más afectado, con el 41% de todos los eventos de desastres por inundación, seguido de África (23%), América (21%), Europa (13%) y Oceanía (3%).

De las muertes causadas por todas las DRA entre 2001 y 2018, unas 3470 se debieron a inundaciones. Durante el mismo período, solo las inundaciones fueron responsables de pérdidas económicas de casi 500 mil millones de dólares a nivel mundial, aproximadamente un tercio de las pérdidas financieras totales causadas por todas las DRA. Asia fue el más vulnerable con el 71% de las muertes totales y el 63% de los daños económicos totales registrados desde 2001. Solo en 2018, se informaron 50 desastres por inundación en Asia, causando casi 2000 víctimas, además de pérdidas de 16 mil millones de dólares. China, India e Indonesia fueron las naciones más afectadas de Asia, con más de 100 eventos de desastre por inundación desde el año 2000. Aunque hay alguna evidencia de una disminución gradual en la frecuencia de desastres por inundación y mortalidad asociada después del año 2000, en comparación con el siglo XX (1901 a 2000), los daños económicos han aumentado continuamente (EM-DAT 2018).

De acuerdo con el reporte 2008 del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2008), muy probablemente se presentarán eventos de precipitación más intensos y frecuentes en el mundo teniendo como consecuencia inundaciones, particularmente de tipo urbano pues la infraestructura actual habrá sido rebasada dado que su diseño se efectuó bajo hipótesis de un régimen de precipitación estacionario y no de cambio climático. Por su parte, Palmer y Raïsänen (2002) argumentan que el cambio climático afectará la probabilidad de ocurrencia de temporadas atípicas de lluvias de alta intensidad en el transcurso de los próximos cien años, pudiendo fácilmente incrementar hasta cinco veces la probabilidad de ocurrencia actual de estos eventos.

Por otro lado, la población total estimada de México para el año 2050 será de 143 925 millones de personas, esto es 43 965 millones de personas más que al inicio del siglo XXI (United Nations, 2011). Destacando que la proporción de la población urbana en el país ya era muy alta en el año 2000, 74.7%, 77% para 2015 y se percibe que continuará creciendo hasta alcanzar el 86.4% en el año 2050. En su mayoría, esta nueva población urbana en México se asentará en colindancia con los principales centros urbanos. Sin duda, en México los principales problemas hídricos no han sido resueltos, en particular el de las inundaciones urbanas. Estos fenómenos, que ya se observan y se verán agravados, se encuentran en las grandes ciudades y megalópolis, principalmente las de la ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Toluca, Querétaro y Puebla.

Como respuesta a este tipo de calamidades, las autoridades mexicanas responsables de los aspectos hídricos se encuentran continuamente trabajando en planes de emergencia y diseño de sistemas de alerta temprana. Prueba de

ello es que el artículo 83 de la Ley de Aguas Nacionales, menciona que los Organismos de Cuenca (OC) o Direcciones Locales (DL) deberán clasificar las zonas en atención a sus riesgos de posible inundación, haciendo uso de la cartografía disponible y posteriormente utilizar un software que permita ubicar y georreferenciar la infraestructura existente, asentamientos humanos, ríos o arroyos, para realizar el trabajo de prevención deseado (CONAGUA, 2011). Este último documento señala igualmente que la orientación de la fuerza de trabajo y responsable de las tomas de decisiones importantes en la atención a la emergencia es el director del Organismo de Cuenca. Sin embargo, hasta ahora, ante la ocurrencia de un evento extremo, la mejor respuesta de ayuda a damnificados es el denominado Plan DN-III-E configurado para evacuar y rescatar a la población involucrada ante un desastre, aun cuando éste no está diseñado particularmente para el caso de inundaciones. Este plan presenta grandes oportunidades de mejora, ya que solo es ejecutado una vez que el evento ha golpeado severamente a la población.

Las inundaciones en México

El país es afectado anualmente, en promedio, por 8 huracanes en su costa Atlántica, de los cuales al menos dos de ellos penetran al continente; mientras que la costa del Pacífico es azotada, en promedio, por 13 huracanes al año y al menos cuatro de ellos tocan tierra y son la causa de daños severos (Bitrán, 2000). Para mostrar la magnitud de los daños causados por inundaciones en el país, la descripción sucinta de los siguientes eventos son ejemplos ampliamente claros y suficientes: a) el huracán Gilbert en el año de 1988 ha sido uno de los ciclones tropicales más intensos, destructores y letales registrados en el Océano Atlántico durante el siglo pasado, sus efectos se registraron fuertemente en seis estados del país y donde su paso ocasionó un total de 225 muertes, 46 heridos, cerca de 10 mil viviendas afectadas y más de 364 mil hectáreas de cultivos siniestradas; b) la inundación generada por una de las más importantes depresiones tropicales de los últimos 40 años en México, ocurrió en octubre de 1999, particularmente en la región del Istmo de Tehuantepec, y fue responsable de más de 260 muertes y enormes daños a lo largo de 81 municipios (Bitrán, 2000); c) el estado de Tabasco, en 2007, fue víctima de una precipitación extraordinaria en la parte media de la cuenca del río Grijalva, evento que ocasionó la inundación de más del 70% de su territorio y alcanzando en los sitios urbanos mayormente afectados hasta una profundidad de 4 m (Gaytán-Iniestra & Rodríguez, 2012); y d) en septiembre de 2013 las costas del país con el Océano Pacífico y con el Golfo de México fueron simultáneamente azotadas por los devastadores huracanes Ingrid y Manuel, dejando en su recorrido por territorio nacional más de 23 muertes y daños económicos por al menos 1500 millones de dólares en la costa y al menos 169 muertes y daños superiores a 4200 millones de dólares en la zona afectada de la costa del Golfo de México (AONBenfield, 2013).

Sistemas de alerta temprana contra inundaciones (SATI)

Los sistemas de alerta temprana de inundaciones (SATI) constituyen una de las medidas de gestión del riesgo de inundaciones que están actualmente operativos en muchos países. La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres reconoce su importancia y aboga firmemente por un aumento en su disponibilidad bajo los objetivos del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (UNDRR, 2015). Sin embargo, a pesar del reconocimiento generalizado de la importancia de los SATI para la reducción del riesgo de desastres (RRD), existe una falta de información que limita su operación, eficacia, beneficios, incrementa costos por daños y erosiona las oportunidades de un desarrollo sostenible en países emergentes.

Bajo la definición de que el riesgo es el producto del peligro, la vulnerabilidad y su costo asociado, una evaluación de riesgo de inundación depende de la estimación del peligro de inundación. Esta evaluación del peligro puede ser de predicción o de pronóstico y debe ser capaz de proporcionar un conjunto de respuestas que faciliten la construcción de las diferentes fases de un SATI. Una evaluación del tipo pronóstico corresponde al comportamiento en el corto plazo de una inundación. Es decir, considerando un tiempo desde minutos, horas o días, o incluso un pronóstico estacional. Una evaluación de tipo predictivo corresponde al análisis probabilístico de ocurrencia de una inundación y se lleva a cabo con base en los registros históricos de variables hidrométricas y/o climatológicas, ajustando una función de distribución de probabilidad a dicha información siguiendo una serie de procesos de simulación hidrológica e hidráulica hasta obtener la definición de zonas afectadas (para mayor detalle se refiere al lector a Díaz-Delgado *et al.,* 2005).

Así, una evaluación de riesgo de inundación debe contemplar: a) la identificación de las causas del peligro de inundación; b) el análisis de frecuencia de eventos hidrológicos extremos (periodo de retorno y magnitud); c) la identificación y ubicación de las planicies de inundación; d) la estimación de la magnitud del tirante de las inundaciones (h_{max}); e) la estimación de la duración de la inundación; f) La estimación de la velocidad máxima alcanzada por el pico de flujo de la inundación (Q_{max}); g) la cuantificación de elementos en exposición (población y principales bienes e infraestructura estratégica) y sus vulnerabilidades. Estas evaluaciones constituyen los principales elementos de información indispensables para el diseño de un plan estratégico de gestión contra inundaciones.

En consecuencia una evaluación de riesgo por inundación debe investigar el proceso particular del fenómeno para la zona en estudio y éste puede realizarse a través de los dos análisis siguientes: a) determinación del peligro de inundación, el cual consiste en un análisis morfológico, hidrológico-hidráulico

de la cuenca; y b) determinación de la vulnerabilidad, consistente en el análisis de censos poblacionales y otras informaciones complementarias que faciliten la cuantificación de la infraestructura física, de elementos del ecosistema, población y aspectos económicos potencialmente en peligro de afectación.

El análisis hidrológico comprende desde la modelación de la distribución espaciotemporal de precipitación y generación de escurrimiento hasta la concentración de flujos en diferentes puntos del río principal. Mientras que el análisis hidráulico se refiere a la modelación del tránsito del agua, a través de los diferentes tramos de río o sectores de la red de drenaje pluvial, e incluye la evaluación de posibles fallas de la infraestructura existente de protección contra inundación, así como la estimación de la zona afectada y sus niveles de agua máximos alcanzados. La evaluación del riesgo de inundación debe contemplar el análisis de todos los escenarios relevantes, sus probabilidades de ocurrencia y posibles daños socioeconómicos asociados (Baró-Suárez *et al.*, 2011).

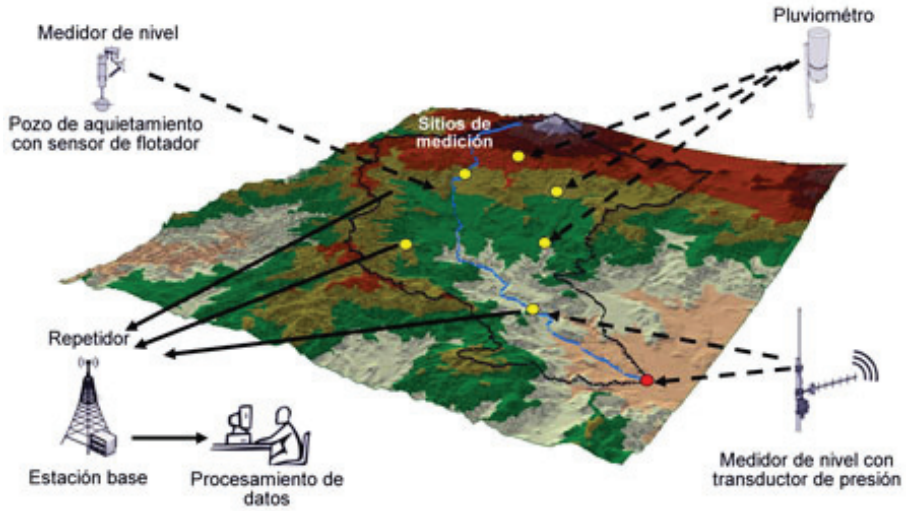
Un SATI (Neussner, 2009) contiene al menos los siguientes cuatro elementos: 1) identificación del riesgo; 2) servicios de monitoreo y alerta; 3) servicios de diseminación y comunicación; y 4) diseño e implementación de capacidad de respuesta. Es importante subrayar que el propósito de este sistema es el de auxiliar en la toma de decisiones a las autoridades para prevenir, mitigar y ayudar primeramente a la población a sobreponerse eficazmente ante un evento de inundación y subsecuentemente a maximizar su salvaguarda con una minimización del impacto económico inherente. Así, un SATI será utilizado para informar a la población sobre una inundación esperada y motivarles a tomar las precauciones y acciones necesarias para su autoprotección y la de sus bienes. Este tipo de fenómenos pueden ser analizados a través de la teoría de sistemas donde sus tres principales componentes son: hardware, software y orgware.

El hardware de un SATI está compuesto por el conjunto de artefactos físicos mediante los cuales se realiza el monitoreo y, en su caso, la difusión de la alerta de alguna situación en particular. El software, consiste en el conjunto de conocimientos, métodos y técnicas para tomar decisiones en el marco de un SATI. El orgware (Logística humanitaria y su cadena de suministro) se refiere a la definición de reglas, secuencia de acciones y asignación de responsabilidades, entre otros conceptos, que hacen de este protocolo convertirse en una capacidad de respuesta eficaz y efectiva contra el evento de inundación.

Debido al potencial de ocurrencia de inundaciones, particularmente las repentinas y las severas, y la consecuente pérdida de vidas en muchas áreas del mundo se han construido y puesto en marcha sistemas de alerta temprana los cuales comprenden un sistema de medición remoto en tiempo real, su recolección, transmisión y procesamiento. Su objetivo es obtener observaciones pluviométricas e hidrométricas con intervalos de tiempo a cada diez minutos para realizar simulaciones y pronosticar las características de la inundación. Este procedimiento tiene el fin de minimizar los tiempos

de respuesta y de evacuación y facilitar el conjunto de toma de decisiones en el marco de una respuesta que considere el análisis de las predicciones de inundación, sus planes de contingencia respectivos y minimice los impactos en la población y sus bienes. El sistema de medición remoto consta de un conjunto de estaciones pluviométricas e hidrométricas ubicadas estratégicamente en la cuenca, estas estaciones miden por lo menos las variables: precipitación acumulada, intensidad de precipitación y nivel de agua en los cauces. La Figura 2 muestra el esquema de un sistema de medición hidrometeorológica y transmisión remota en tiempo real. Bajo el análisis antes mencionado, cuando los pronósticos de inundación rebasen umbrales específicos se activarán alarmas indicando el inicio de protocolos de respuesta específica. Aquí, cabe destacar que el número de EMAs actualmente en México resultan insuficientes y se requiere de inversión por parte de todos los municipios y estados de la República Mexicana para fortalecer esta red de monitoreo hidroclimatológico que salva vidas. Igualmente se señala que la Universidad Autónoma del Estado de México, a través del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA-UAEM), concentra esfuerzos para el montaje de la Red Universitaria de Monitoreo Hidrológico Ambiental para el Estado de México y se espera que los municipios del Estado de México se adhieran a este importante proyecto de prevención de riesgos.

Figura 2. Esquema de un sistema de medición hidrometeorológica y transmisión remota en tiempo real



Fuente: elaboración propia.

Medidas de control y adaptación a las inundaciones.

Las medidas para el control de inundaciones pueden ser del tipo estructural y no estructural. Las estructurales son aquellas que modifican el sistema fluvial a través de obras en la cuenca (medidas extensivas) o en el río (medidas intensivas y localizadas) para evitar el desborde hacia el lecho mayor del flujo proveniente de las crecidas. Las medidas no estructurales, o de adaptación, son aquellas en que los impactos son reducidos por la mejor convivencia de la población con las crecidas, a través de acciones preventivas como la alerta de inundación, la zonificación de las áreas de riesgo, el seguro contra inundaciones y las medidas de protección individual (Tucci, 2007). Sin embargo, por su naturaleza, sería ingenuo pretender controlar totalmente una inundación ya que no habría nunca suficientes recursos y siempre existiría la probabilidad de falla. Por ello sería más adecuado hablar de medidas de mitigación con el objetivo de minimizar las consecuencias negativas del fenómeno. En consecuencia, es inminente la necesidad de contar con Planes y Protocolos Estratégicos Integrados de Gestión de Inundaciones que contengan medidas de control combinadas que incluyan medidas estructurales y no estructurales como sistemas de alerta temprana contra inundaciones y de planes de evacuación que consideren la instrumentación mínima de medición de variables hidrometeorológicas, aspectos logísticos y de cadena de suministro respectivos.

Las medidas estructurales son obras de ingeniería implementadas para reducir el riesgo de afectación por crecidas. Estas medidas pueden ser extensivas o intensivas. Las medidas extensivas son aquellas que se implementan en la cuenca modificando las relaciones entre precipitación - territorio - caudal, tales como el incremento de la cobertura vegetal del suelo (reforestación), que reduce y retarda los picos de crecidas, y el control de la erosión en la cuenca, contribuye a mantener las geometrías de las secciones transversales de los canales y las capacidades de flujo y almacenamiento de canales y embalses respectivamente en la cuenca, o bien acciones de reubicación de asentamientos humanos altamente vulnerables. Las medidas intensivas son aquellas que actúan en el río y pueden ser de tres tipos (Tucci, 2007): a) *acelerando el flujo:* construcción de diques, aumento de la capacidad de descarga de los ríos y corte de meandros; b) *retardando el flujo*: embalses y cuencas de amortiguamiento; *c) desviando el flujo:* obras como canales de desvíos temporales.

En el Cuadro 1 se presentan las principales características de las medidas estructurales. Es importante subrayar que las medidas estructurales no pueden ser proyectadas para dar una protección completa, pues siempre existirá la probabilidad de ocurrencia de un evento superior al del diseño. Una protección infalible es física y económicamente inviable. Adicionalmente,

se señala que una medida estructural puede crear una falsa percepción de seguridad y con ello favorecer la ocupación de planicies inundables con probabilidad de desastrosas consecuencias futuras.

Cuadro 1
Características principales de medidas estructurales de mitigación de inundación

Medida	Aplicación	Principal ventaja	Principal desventaja
Medidas extensivas			
Incremento de la cobertura vegetal y mejoramiento de cuencas	Cuencas pequeñas e incluyen reforestación, terraceo, presas de gaviones, zanjas infiltrantes, etc. (mayor efecto en áreas <10 km^2).	Favorece la infiltración, disminuye escurrimientos superficiales y amortigua el pico de crecida.	Insuficiente para grandes cuencas y / o periodos de retorno > 10 años.
Control de la pérdida de suelo	Cuencas pequeñas	Reducción de erosión y sedimentación.	Insuficiente para grandes cuencas y / o periodos de retorno > 10 años.
Programas de reubicación de asentamientos humanos[1]	Cuencas altamente vulnerables	Reducción del riesgo y costo de la inundación y salvaguarda de vidas humanas.	Costos elevados y posibles conflictos sociales.
Medidas intensivas			
Diques	Grandes ríos y en la planicie de inundación.	Alto grado de protección del área específica.	Daños significativos en caso de falla. Cuando además se forman terrazas se incrementa el valor de la infraestructura instalada y con ello el riesgo.
Mejoras en la morfología del río			
Reducción de la rugosidad y eliminación de obstrucciones	Ríos pequeños	Aumento del caudal con poca inversión.	Efecto localizado y posible traslado de inundación aguas abajo.
Corte de meandro	Área de inundación estrecha	Amplia el área protegida y facilita el flujo.	Impacto negativo en ríos con fondo aluvional.
Espigones	Ríos con flujo a gran velocidad y curvas importantes.	Reduce la velocidad del flujo y facilita la sedimentación.	Efecto localizado y colmatación.
Construcción de embalses			
Todos los embalses	Cuencas medianas	Control aguas abajo	Difícil ubicación por aspectos relacionados a la propiedad privada del territorio afectado.
Embalses con compuertas	Proyectos de usos múltiples	Mayor eficiencia con el mismo volumen gestionado.	Vulnerable a errores humanos.
Embalses rompe picos	Únicamente diseñado para el control de crecidas.	Operación con un mínimo de piedras.	Inversión difícilmente compartida.
Cambio del canal de flujo			
Sobre el curso de la crecida	Grandes cuencas	Amortiguación del volumen transitado.	Depende de la topografía.
Desvíos	Cuencas medianas y grandes	Reducción del caudal transitado por el canal principal.	Depende de la topografía.

Nota: [1] la reubicación de asentamientos humanos puede ser considerada conceptualmente como una medida estructural debido a los requerimientos de construcción de obra, y puede ser no estructural pues no se realizan modificaciones al cauce ni al flujo.

Fuente: Modificada de Tucci, 2007.

Las medidas no estructurales de control de inundaciones no actúan directamente sobre las características del flujo de crecida, sino sobre el incremento de la resiliencia del sistema ante la ocurrencia de un evento de inundación. Es decir, sobre la modificación de la susceptibilidad del territorio y contenidos inundables, dichas acciones son de carácter preventivo tales como:

a) Sistema de pronóstico y alerta temprana (para mayores detalles consultar Díaz-Delgado & Gaytán-Iniestra, 2015),
b) Plan de evacuación y ubicación de albergues (referirse a Gaytán-Iniestra & Rodríguez, 2012),
c) Zonificación de áreas de riesgo de inundación,
d) Estimación de daños tangibles e intangibles (directos e indirectos) por inundación (consultar Baró Suárez *et al.,* 2011; Díaz-Delgado *et al.,* 2012),
e) Diseño de sistema de indemnizaciones justas y suficientes para damnificados,
f) Contratación de pólizas de seguro contra inundación (particularmente en zonas agrícolas),
g) Planes de contingencia por enfermedades ocasionadas por calidad del agua de inundación,
h) Constitución de fondos de prevención o reparación de daños y protección individual contra inundación.
i) Concientización a no verter desechos sólidos y / o aguas residuales crudas a los cauces de ríos,
j) Otras.

Las medidas no-estructurales también se refieren a la definición de políticas públicas sobre restricciones de crecimiento urbano en planicies inundables, restricciones de uso de suelo, gestión de la cuenca, implementación de redes de monitoreo hidroclimatológico, modelación matemática del fenómeno lluvia-escurrimiento, actualización permanente de estudios de riesgo, capacitación de brigadas de atención de emergencias, incremento de inversión en ciencia y tecnología aplicada al fenómeno de eventos hidrometeorológicos, modificación de la susceptibilidad al daño de infraestructura estratégica existente y, por último, la inspección sistemática de posibles afectaciones en hospitales, comercios, infraestructura de suministro de agua potable, edificios, monumentos arqueológicos, etc. Pero, sobre todo, es importante documentar, comunicar y actualizar todas las acciones de mitigación de daños por inundación a fin de que la población y las autoridades competentes en turno estén informadas y adiestradas en caso de emergencia.

Recomendaciones y elementos concretos mínimos para considerar en el análisis de inundaciones

El análisis de inundaciones y la elaboración del diseño de un SATI requieren de un conjunto de elementos indispensables que las autoridades competentes deben proporcionar a los especialistas. Entre estos elementos se destacan los siguientes:

a) Información topográfica al mayor nivel de detalle posible, particularmente en zonas urbanas, con curvas de nivel a cada 10 o 20 cm.
b) Información de las redes de drenaje pluvial, sanitario o combinado que incluyan diámetros, materiales que lo constituyen, trazo de la red, pendientes de rasantes, pozos de visita, fases históricas de crecimiento e instalaciones urbanas que se encuentran debajo de las calles.
c) Urbanización actual y fases de crecimiento históricas.
d) Planes de desarrollo urbano municipal
e) Evolución histórica de las zonas urbanas y poblaciones asociadas,
f) Programas de capacitación del personal responsable de la evaluación de proyectos de drenaje e hidrología urbanos.
g) Es altamente recomendable la contratación, por parte de los municipios, de personal calificado y certificado por un Colegio de profesionales para la evaluación y ejecución de proyectos de hidrología urbana, tales como el Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de México (CICEM, A.C.)
h) Garantizar que los nuevos proyectos urbanización sean realizados por un profesional certificado en la materia y cumpla con las normativas vigentes y el estado del arte en hidrología urbana.

Bibliografía

Aon Benfield. (Editores), 2013. *Impact forecasting: December 2013 global catastrophe recap.* Disponible en: http://thoughtleadership.aonbenfield.com/Documents/-20140107_if_december_global_recap.pdf. Consultado el 20 de junio de 2020.

Baró-Suarez, J.E., Diaz-Delgado, C., Calderon-Aragon, G., Vicenta Esteller-Alberich, M., & Cadena-Vargas, E., 2011. "Most probable cost of flood damage in residential areas in Mexico". *Tecnología y ciencias del agua*, 2(3), 201-218.

Bitrán, D. B., 2000. *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99* (Vol. 1). Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de http://www.cenapred.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/SerieImpacto/Impacto1.pdf. Consultado el 20 de junio de 2020.

Centro de Investigación sobre Epidemiología de Desastres (CRED), 2009. "Welcome to the EM-DAT website". Disponible en: https://www.emdat.be/. Consultado el 6 de diciembre de 2020.

CONAGUA. 2011. *Manual para el control de inundaciones*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, México). México, DF.329 pp. Disponible en: http://www.freshwateraction.net/sites/freshwateraction.net/files/-SGT-1-11Manual-para-el-control-de-inundaciones.pdf. Consultado el 20 de junio de 2020.

Díaz-Delgado, C., & Gaytan-Iniestra, J., 2015. "Flood risk assessment in humanitarian logistics process design". *Journal of Applied Research and Technology*. UNAM, Mexico. En *Press*.

Díaz-Delgado, C., Esteller Alberich, M.V., López-Vera, F., 2005. *Recursos hídricos: conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica*. Montevideo/Toluca, Piriguazú ediciones/CIRA-UAEM, 2005, 747 p. Seccion II, Capítulo II.11.

Díaz-Delgado, C., Gómez Albores, M. A., & Hernández-Pérez, J. A., 2012. "Modelado hidrológico-hidráulico de inundaciones con estimación de daños directos tangibles". *XXII Congreso Nacional de Hidráulica*. Disponible en: http://revistatlaloc.org.mx/amh_congreso/planea_pol.htm. Consultado el 20 de junio de 2020.

EM-DAT, 2018. *The OFDA/CRED International Disaster Database*, Université Catholique de Louvain, Brussels (Belgium). Disponible en: http://www.emdat.be/. Consultado el 20 de junio de 2020.

Gaytán-Iniestra, J., & Rodríguez-Espíndola, O., 2012. "Metodología para la ubicación de albergues, centros de distribución y determinación de la política de abastecimiento inicial en inundaciones en México". En: *La importancia de las inundaciones en la gestión integrada de los recursos hídricos en México*. González-Sosa, E., Díaz-Delgado, C., Guerra-Cobián, V.H., Gutiérrez-López, M.A., & Ramos Salinas, N.M. (Eds.). Universidad Autónoma de Querétaro, Queretaro, México. pp. 131-154:

IPCC, 2008. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis.* (Pachauri, R. K. y Reisinger, A. –editores-). 1a. impresión 2008, 114p. Suecia.

Neussner O., 2009. *Local flood early warning systems. Manual: Experiences from the Philippines*: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH German Technical Cooperation Environment and Rural. Disponible en: http://www.planet-action.org/automne_modules_files/polyProjects/public/r5886_93-_gtz_phil_lfews_manual_dec09_low_res.pdf. Consultado el 20 de junio de 2020.

Palmer, T. N., & Räisänen, J., 2002. "Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate". *Nature*, 415(6871), 512-514. doi:10.1038/415512a.

Tucci, C.E.M., 2007. *Gestión de inundaciones urbanas*. Organización Meteorológica Mundial (OMM), 315 pp. Disponible en: http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/-Publicaciones/Gesti%C3%B3n%20de%20Inundaciones/Gestion-de-Inundaciones-Urbanas-esp.pdf. Consultado el 20 de junio de 2020.

United Nations, 2011. *World Urbanization Prospects: the 2011 Revision*. United Nations. Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

3.2. Sequía: causas, efectos, impactos y método para construcción de planes de gestión en México [1]

Carlos Díaz Delgado
Aleida Yadira Vilchis Francés
Khalidou M. Bâ
Roció Becerril Piña
Carlos Alberto Mastachi Loza
Ricardo Arévalo Mejía
Alondra Balbuena Medina

Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua
Universidad Autónoma del Estado de México

José Emilio Baró Suárez

Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

El objetivo principal de este capítulo es presentar de manera simple el concepto de la ocurrencia de sequías y las condiciones que provocan que regiones geográficas sean vulnerables ante este fenómeno. Igualmente se establecen los criterios para distinguir las sequías con otros estados de condiciones de escasez de agua. Por último, se proponen recomendaciones para la construcción de un plan para la gestión de la sequía.

1 Esta investigación estuvo financiada bajo los proyectos: i) "*Análisis de sequía y diseño de una herramienta hidrogeomática como soporte para la toma de decisiones*", con clave UAEMex 4212/2016E patrocinado por la *Fiducie de Recherche en hydrologie* (*Quebec-Canadá*); Por lo que se agradece a las respectivas instituciones donadoras del recurso para que este trabajo se realizara con éxito.

Hoy en día, los requerimientos hídricos están en aumento acelerado y el déficit de este vital líquido es un problema de gran envergadura. En efecto, la competencia entre las diferentes necesidades de volúmenes de agua, por los cada vez más escasos recursos, es más severa y ello coloca a los gestores del agua en situaciones complejas, requiriendo mayor y mejor información para la toma de decisiones.

La población mundial, hacia el año 2050, será de 9,550 millones de personas, es decir 3,423 más que al inicio del siglo. Este incremento, por sí solo, aumentará sustancialmente las necesidades hídricas de la sociedad, no solo para el uso directo humano, sino también para la producción de alimentos, energía, servicios y usos industriales (Martínez-Austria, Díaz-Delgado y Moeller-Chávez, 2019). En el caso de México, la población estimada en 2050 será de 143.925 millones de personas, esto es 43.965 millones de personas más que al inicio del siglo XXI (*United Nations*, 2011). La proporción de la población mundial que habita en zonas urbanas se incrementará notablemente, pasando de 46.6% en el año 2000 a 66.4% en el año 2050. En el caso de México, la proporción de la población urbana ya era muy alta en el año 2000, 74.7%, 77% para 2015 y continuará creciendo hasta alcanzar el 86.4% en el año 2050. Esta nueva población urbana en México, adicionalmente, se asentará en su mayoría en colindancia con los principales centros urbanos. De las 186,316 localidades actualmente existentes en México, el 48% de la población se ubica en 65 centros urbanos. Sin embargo, en solamente 36 localidades se ubica el 28% de la población. Esta tendencia continuará aumentando. Los principales problemas, que ya se observan y se verán agravados, se encuentran en las grandes ciudades y megalópolis, principalmente las de la ciudad de México, Monterrey, Guadalajara y Puebla. Igualmente, se estima que la explotación de aguas subterráneas se incrementará, al igual que su costo asociado por extracción, en un 50% para países en vías de desarrollo y un 18% para los industrializados. De acuerdo con el reporte 2008 del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2008), muy probablemente se presentarán episodios de sequía más severos y prolongados en el mundo, teniendo como consecuencia una reducción de agua disponible tanto espacial como temporalmente agudizando la competencia y disputas por este recurso.

El fenómeno de la sequía no debe verse como un problema, sino como una condición natural y recurrente de algunas regiones. Su complejidad, lento desarrollo temporal y amplia cobertura espacial dificulta su análisis y suele suceder que los gobiernos incrementen la vulnerabilidad de la región, involuntariamente o por negligencia, al no contar con políticas adecuadas de gestión hídrica. Por lo general, estas acciones gubernamentales son de tipo reactivo o de emergencia y se utilizan exclusivamente cuando se está profundamente inmerso en el evento.

La sequía

El fenómeno de sequía puede ser clasificado en cuatro tipos: meteorológica, agrícola, hidrológica, y socioeconómica. La sequía meteorológica es la primera en ocurrir y en la que el humano no tiene una injerencia directa. Sin embargo, los otros tres tipos de sequía son considerados como consecuencia de la sequía meteorológica e impactada directamente por las políticas públicas de operación en la región, o bien por su ausencia.

Antes de definir la sequía, es necesario señalar la diferencia conceptual entre *aridez* y *sequía* pues aun cuando ambos tratan sobre ausencia de agua, existen diferencias significativas entre ambos conceptos. De acuerdo con Bâ *et al.* (1995), la aridez es un estado climático permanente, es decir ausencia de humedad en agua y aire, y la sequía es un proceso extremo que se presenta en el tiempo y en el espacio. La diferencia puede ser muy clara si se expresa en grados de sequedad, de disponibilidad de agua, de transformaciones en el medio ambiente y de permanencia en el tiempo tal como se muestra en la Figura 1.

Así pues, la sequía puede definirse como un periodo prologado de escasez de recursos hídricos muy por debajo de niveles normales registrados, que provoca efectos adversos sobre los sistemas de producción de recursos (Valiente, 2001; Pereira y Paulo, 2006; y IPCC, 2008).

La *sequía meteorológica* se presenta por un periodo de tiempo suficientemente prolongado con condiciones meteorológicas anormalmente secas que son la causa de un grave desequilibrio hidrológico.

La *sequía agrícola* ocurre en un periodo de tiempo en el cual no existe la suficiente humedad en el suelo para permitir el desarrollo adecuado de un determinado cultivo, en cualquiera de sus fases de crecimiento.

La *sequía hidrológica* estará presente para un periodo durante el cual, los flujos de agua (superficial y/o subterráneo) son insuficientes para satisfacer los usos establecidos bajo un determinado sistema de gestión de aguas.

La *sequía socioeconómica* existirá para cuando la disponibilidad de agua disminuya hasta el punto donde se generen impactos económicos y sociales a la población de la zona afectada.

Las sequías en México

En el país han ocurrido episodios periódicos de sequía desde siempre; se han registrado de alguna manera desde la época prehispánica. Incluso Sánchez-Mora (1980) comenta que la sequía del año 1052 contribuyó a la caída del imperio Tolteca. También señala que los impactos de la sequía ocurrida en 1450 se reflejaron hasta con la venta de personas a cambio de maíz; con la emigración en gran escala y como respuesta tuvo la construcción de una importante obra hidráulica de conducción para traer agua a la ciudad de México desde Chapultepec. Para

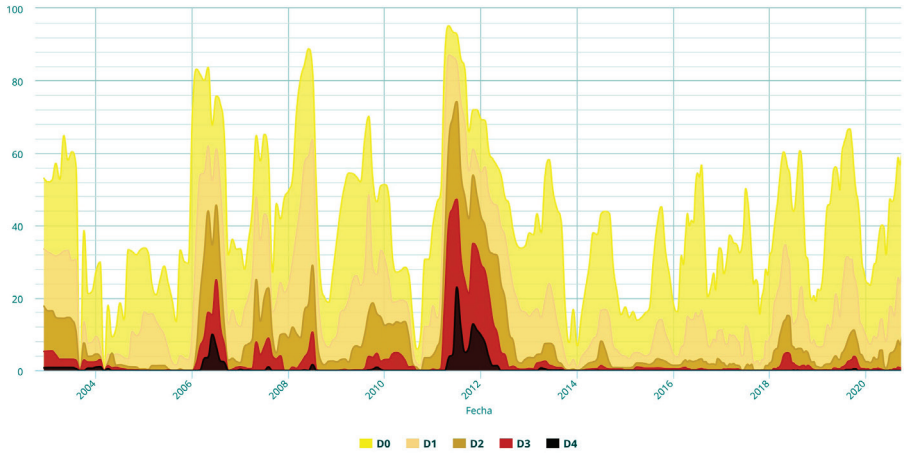
épocas más recientes, una de las sequías más severas en el país ocurrió en 1995, donde afectó a más de diez estados, murieron más de 359 mil cabezas de ganado, se dañaron casi 850 mil hectáreas destinadas a la agricultura, provocando que más de 1.2 millones de campesinos abandonaran sus tierras de cultivo. Asimismo, se incrementó el conflicto entre usuarios del agua en el norte del país, situación que exigió una reducción de 16 a 6 horas diarias del suministro de agua para la ciudad de Monterrey (Escalante y Reyes, 2005).

Figura 1. Grados de sequedad

Fuente: adaptado de Bâ *et al.*, 1995.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011), a través del Programa de Monitoreo de Sequías de América del Norte (donde colaboran México, Canadá y los Estados Unidos), en el año de 2011 la nación sufrió una de las sequías más graves desde 1941 (Figuras 2). Esta se clasificó como excepcional en 6% del territorio nacional; extrema en 15%; severa en 20% y moderada en 13% para un total de 54% de superficie afectada. Entre las entidades más impactadas se encontraron: Chihuahua; Nuevo León; Zacatecas; Aguascalientes; Durango; Jalisco; San Luis Potosí y Sonora.

Figura 2. Evolución y porcentaje de área del país afectada por una o varias categorías de sequía en México



Fuente: CONAGUA, 2021.

Efectos de una sequía

Los efectos de la sequía son categorizados en directos o indirectos. Los primeros se refieren a pérdidas de cultivos, menor producción forestal, mayor riesgo de ignición de masas forestales, volúmenes reducidos de agua disponible, creciente mortalidad de ganado y de fauna en general, así como daños severos a los ecosistemas. Como efectos indirectos se tienen la reducción en las cosechas, donde la baja productividad del bosque generará menores ingresos a los agricultores; ocurre un incremento de los precios en alimentos, aumenta el desempleo y la migración a centros urbanos. Sin embargo, otra forma de clasificar los efectos de la sequía es a través de los ejes de la sustentabilidad, es decir, de los impactos económicos, ambientales y sociales.

Impactos de una sequía

- Impactos económicos: desaceleración del desarrollo económico nacional; menor calidad de cosechas, disminución de producción de alimentos; incremento de precios e importaciones de alimentos; plagas de insectos; aparición o incremento de enfermedades de las plantas; pérdida de producción ganadera; desempleo en varias escalas; reducción de generación hidroeléctrica; limitación de navegación en ríos y canales, entre otros.
- Impactos ambientales: mayor sequedad con daños en las especies animales; reducción y degradación de ecosistemas; aumento de la depredación; pérdida de especies endémicas de plantas y animales; cantidad y severidad de incendios forestales; mayor erosión eólica e hídrica en los suelos.
- Impactos sociales: escasez de alimentos; pérdida de vidas humanas; suicidios; explosiones sociales; epidemias; conflictos políticos; conflictos entre usuarios del agua; incremento de la pobreza; migración; disminución significativa del nivel de vida de la población afectada; hambruna, entre otros.

Planeación de la gestión de la sequía

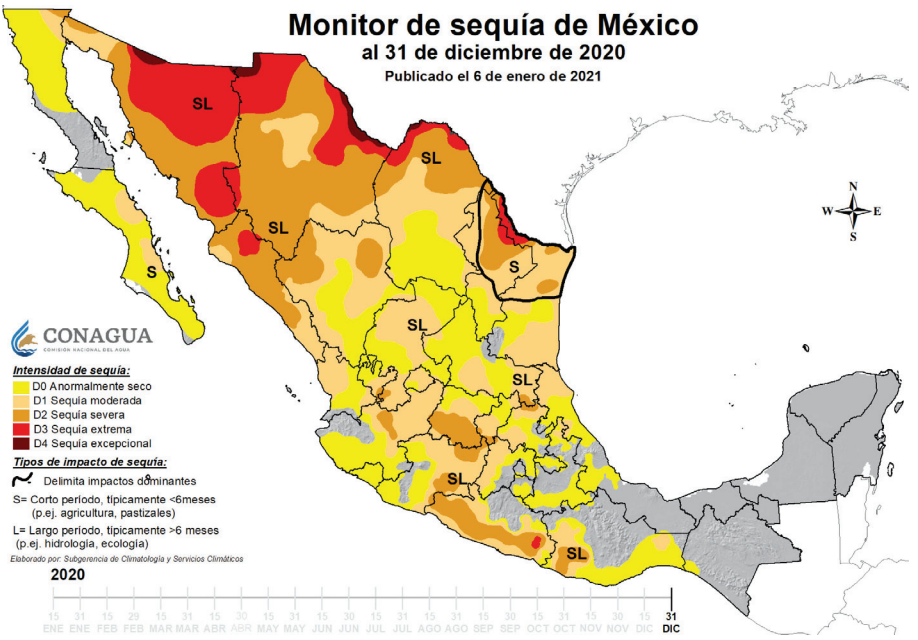
Una sequía no suele tener un comienzo, o final, claramente definido y es difícil de predecir. Durante los años normales y húmedos, los usuarios del agua suelen ignorar este fenómeno natural y no toman medidas precautorias para afrontar futuros episodios de sequía. Cuando la sequía se presenta, los usuarios del agua no están suficientemente preparados y a menudo es demasiado tarde para responder a ella. Como resultado, sus efectos potenciales son mucho más severos que si los usuarios del agua hubieran desarrollado por adelantado un programa de prevención y mitigación de la sequía que active una respuesta oportuna (IMTA, 2013).

Aquí es importante destacar que el objetivo perseguido por los esfuerzos de planeación para prevención y mitigación de la sequía es preservar los servicios públicos esenciales y minimizar los efectos adversos en el suministro de agua para la salud pública y la seguridad, en las actividades económicas, en los recursos ambientales y estilos de vida. Los programas de prevención y mitigación de sequías tienen como finalidad eliminar la "crisis" de la respuesta ante la sequía, reducir las dificultades causadas por el déficit de agua y generar confianza del público en las acciones adoptadas para hacer frente a la escasez de agua.

El proceso de planeación para enfrentar la sequía se basa en los siguientes principios: a) Períodos de precipitación por debajo del promedio ocurren y son inevitables, por lo tanto, se puede anticipar que la sequía se producirá en algún momento en el tiempo;

b) Los posibles riesgos e impactos del déficit hídrico pueden ser considerados y evaluados antes del evento real, mediante un monitoreo de los rangos de intensidad de acuerdo con los estándares internacionales (Anormalmente seco (D0), Sequía Moderada (D1), Sequía severa (D2), Sequía Extrema (D3) y Sequía Excepcional (D4)) (Figura 3).

Figura 3. Monitor de sequía en México



Fuente: CONAGUA, 2021.

Las características de rangos de intensidad de sequía son las siguientes:

- Anormalmente Seco (D0): Se trata de una condición de sequedad, no es aun propiamente un tipo de sequía. Es una sequedad de corto plazo, hay retraso de la siembra de cultivos anuales, limitado crecimiento de los cultivos o pastos incrementa el riesgo de incendios por arriba del promedio. Al concluir este periodo los pastos o cultivos no se recuperan completamente.
- Sequía Moderada (D1): ocurre cuando se presentan algunos daños en los cultivos y pastos, propicia un alto riesgo de incendios forestales, existen niveles bajos en arroyos, embalses y pozos e incrementa la escasez de agua. Se requiere la implementación de restricciones en el uso de agua de manera voluntaria.

- Sequía Severa (D2): Esta existe en el momento que se dan probables pérdidas en cultivos o pastos, genera un muy alto riesgo de incendios forestales, y la escasez de agua es común. Se recomienda se impongan restricciones de uso del agua.
- Sequía Extraordinaria (D3): Se caracteriza por la ocurrencia de mayores pérdidas en cultivos o pastos, un peligro extremo de incendios forestales. La escasez de agua o las restricciones de su uso se generalizan.
- Sequía Excepcional (D4): En esta clasificación de grado de sequía se presentan pérdidas excepcionales y generalizadas de los cultivos o pastos, el riesgo de incendios forestales es excepcional, la escasez de agua en los embalses, arroyos y pozos es generalizada y extrema, se crean situaciones de emergencia debido a la falta de agua.

Las medidas de respuesta ante la presencia de una sequía pueden ser de carácter permisivo (voluntario), de restricción, o bien imperativas (incluso con sanciones asociadas). Sin embargo, los protocolos de implementación y operación deben ser definidos anticipadamente en el marco del plan de gestión correspondiente.

La planeación de la gestión incluye la mitigación de la sequía y de la respuesta ante esta. La mitigación se refiere a las medidas adoptadas antes de que ocurra una sequía y que reducen el potencial de los impactos de esta cuando se produce el evento. La planeación de la respuesta se refiere a las condiciones bajo las cuales ocurre una sequía y se especifican las acciones que se deben ejecutar como respuesta.

El proceso de planeación para la gestión de una sequía se compone de las ocho etapas siguientes (IMTA, 2013):

- Etapa 1. *Definición de partes involucradas, objetivos y principios del plan*. Se centra en los pasos preliminares necesarios para iniciar el desarrollo de un programa de gestión de la sequía. Incluye la formación de un equipo de planeación, asegurando la participación de los interesados y la definición de los objetivos y principios de funcionamiento.
- Etapa 2. *Sequía histórica y la evaluación del impacto.* Evaluación de la severidad de las sequías históricas y sus correspondientes efectos en el sistema de abastecimiento de agua. Esta etapa también incluye la identificación de impactos específicos relacionados con la sequía y una evaluación de las medidas de mitigación y estrategias de respuesta adoptadas en sequías históricas. Esta información es útil para la definición y selección de futuras medidas de mitigación y estrategias de respuesta en la Etapa 4.
- Etapa 3. *Evaluación de la vulnerabilidad de la sequía.* Revisión de la confiabilidad del proceso de planeación para el suministro de agua. Esto es útil en la identificación de mecanismos de activación de la sequía (alerta temprana y factores detonantes) y las metas de las acciones de respuesta (Etapa 5). También incluye la identificación de los posibles impactos de

la sequía y la percepción de su gravedad o severidad, lo que es útil en la identificación de las acciones de respuesta y mitigación (Etapa 4).

- Etapa 4. *Estrategias de mitigación y respuesta ante la sequía.* Comprende la selección de una combinación de estrategias de mitigación y de respuesta. La mitigación de la sequía debe implementarse previo a la manifestación de la sequía para evitar y/o reducir los posibles impactos futuros de esta. Las estrategias de respuesta ante sequía se mejoran en la etapa 6 y en función de la severidad del fenómeno. Esta etapa también incluye una guía para la implementación de una estrategia de educación al público en general y otra de alerta.
- Etapa 5. *Grado de la sequía, los detonadores y las respuestas meta*. Esta etapa comprende la identificación del grado de sequía, los correspondientes detonadores y las respuestas meta. Estos elementos pueden ser criterios específicos o simplemente guías que los administradores de los servicios de agua pueden incorporar durante el monitoreo de la sequía y en los esfuerzos de respuesta.
- Etapa 6. *Programa de respuestas, por etapa, ante la sequía.* Comprende el desarrollo de medidas específicas de respuesta para cada grado de sequía mediante la implementación de estrategias de respuesta desarrolladas en la etapa 4. Estas medidas de respuesta deben describir las acciones necesarias para que los administradores del servicio de agua y los usuarios reduzcan su demanda y garanticen el suministro de agua durante cada etapa específica. Este paso puede incluir también el desarrollo de una campaña de educación e información pública.
- Etapa 7. *Implementación y Monitoreo*. Comprende la implementación de las estrategias de mitigación y prevención. Esta etapa también incluye programas de acción para: mitigación, monitoreo de indicadores, protocolos para declaración de sequía, implementación de programa de respuesta por etapas, la planeación de los ingresos y egresos, así como el programa de monitoreo y evaluación de los esfuerzos y acciones de respuesta.
- Etapa 8. *Revisión del plan y actualizaciones.* Comprende el establecimiento del proceso formal para revisar, aprobar y actualizar el plan de gestión de la sequía.

Conclusiones

A pesar de la compleja situación a la que se expone una sociedad por causa de sequías, por lo general la población se encuentra mal informada y poco preparada para afrontar una ocurrencia de tal fenómeno. Adicionalmente, cuando el período crítico ha pasado, frecuentemente se olvida y mientras más severo haya sido el episodio, se contempla como poco probable que vuelva a ocurrir, pues este comportamiento social es soportado por sentimientos y creencias muchas veces sin fundamento. Por ello como respuesta, es necesaria la formulación de Planes de Gestión Integrada de Sequías con la finalidad de

reducir los impactos negativos de tan importante fenómeno natural. Estos planes deberán incluir la capacitación, la generación de información, monitoreo de indicadores, formulación de protocolos de alerta y operativos para fases de prevención, mitigación, restauración y adaptación. Planes que implican una muy alta coordinación entre instituciones y usuarios, pero que son acciones insustituibles e impostergables. Afortunadamente, hoy día en México se cuenta con especialistas en la academia y la investigación que poseen conocimientos y metodologías para acompañar a las autoridades correspondientes y a la sociedad en general en la lucha contra la sequía. Entidades de la talla del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) y la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, así como el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, entre otras, están desarrollando modelos matemáticos de sequía y construyen indicadores como soporte en la toma de decisiones sobre la sequía. Sin embargo, falta el elemento detonador, o la voluntad política, para hacer que dicha iniciativa rinda los frutos esperados para reducir el sufrimiento humano y ambiental.

Bibliografía

Bâ K. M., Díaz C., Llamas J. y Llanos H., 1995. "Zonas semiáridas y su modelación hidrológica (lluvia-escurrimiento)". *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. X, Núm. 2 mayo-agosto 1995, pp. 21-31.

CONAGUA, 2011. Comisión Nacional del Agua. Disponible en: http://www.conagua.gob.mx/SalaPrensa.aspx?id=925|NotaP|. Consultado el 19 de octubre de 2011.

CONAGUA, 2021. *Monitor de sequía en México*. Disponible en: https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico. Consultado el 8 de enero de 2021.

Escalante S., C. y Reyes Ch., L., 2005. *Análisis de sequías*. Volumen I y Volumen II. 1110p. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 2013. *Guía para la formulación de Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía*. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99848/PMPMS_Cuernavaca_Mor.pdf. Consultado el 1 de octubre de 2014.

IPCC, 2008. Cambio climático 2007: *Informe de síntesis*. (Pachauri, R. K. y Reisinger, A. –editores-). 1a. impresión 2008, 114p. Suecia.

Martínez-Austria, P.F., Díaz-Delgado, C., Moeller-Chávez, G., 2019. "Water security in Mexico: general diagnosis and main challenges". *Ingeniería del agua*, 23(2), 107-121. https://doi.org/10.4995/Ia.2019.10502

Pereira, L. S. y Paulo, A. A., 2006. "Droughts: concepts, indices and prediction. Centro de investigación de ingeniería agrícola", 20p. *Instituto de agronomía*. Universidad técnica de Lisboa. Portugal.

Sánchez-Mora, E., 1980. “Las sequías en el México antiguo”. En Sancho y Cervera, J. (coord.), *Análisis histórico de las sequías en México*, Documentación de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y recursos Hidráulicos, núm. 22, México, pp. 15-20.

UNEP, 2007. “Fourth Global Environment Outlook: Environment for Development. Geneva, Switzerland”. En van Leeuwen, C.J. Frijns, J., van wezel, A. and van de ven F.H.M, (DOI 10.1007/s11269-012-0009-1) *Water Resources Management Journal*, (2012).

United Nations, 2011. *World Urbanization Prospects: the 2011 Revision*. United Nations. Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

Valiente, O M., 2001. “Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación”. *Investigaciones Geográficas.* No. 26 (2001), pp. 59-80. España.

3.3. Huracanes: amenazas desde dos océanos

Armando Antonio Domech González

Universidad de Guadalajara, Jalisco

José Emilio Baró Suárez

Facultad de Geografía

Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

¿Qué es meteorología?

Es el estudio de los fenómenos atmosféricos y de los mecanismos que producen el clima, orientado a su predicción. Proviene del griego, *meteoros* (alto) y *logos* (tratado) (*Educalingo*, 2020). Los fenómenos atmosféricos o meteoros pueden ser: aéreos, el caso del viento: acuosos, cuando se trata lluvia, nieve o granizo; luminosos, al tratarse de la aurora polar o el arco iris y eléctricos, como el rayo.

La presión, la temperatura y la humedad son los factores climáticos fundamentales en el estudio y predicción del clima. La temperatura, sometida a numerosas oscilaciones, se halla condicionada por la latitud y por la altura sobre el nivel del mar. La presión atmosférica, que depende en gran medida de la altitud, varia también en el transcurso del día, es registrada en los mapas meteorológicos mediante el trazado de las isobaras, o puntos de igual presión, que permiten identificar los centros de baja presión o borrascas, cuya evolución determina en gran parte del clima reinante (Nimbus, 2012).

La meteorología utiliza instrumentos esenciales, como el barómetro (para medir la presión) el termómetro (para medir la temperatura) y el higrómetro (para medir la humedad), lo que permite determinar los valores absolutos, medios y extremos de los factores climáticos. Para el trazado de mapas y la elaboración de predicciones es fundamental la recogida coordinada de datos en amplias zonas, tradicionalmente en las "estaciones meteorológicas y actualmente, con el impulso de las tecnologías espaciales, con la ayuda de los satélites meteorológicos (Nimbus, 2012).

Es innecesario destacar que para abordar el estudio de un fenómeno tan devastador como lo son los ciclones, es la meteorología la ciencia encargada, en la medida de las posibilidades, de estudiar un fenómeno tan escurridizo como impredecible, como lo son los ciclones.

Los huracanes y su incidencia en los riesgos socionaturales

Un desastre es un evento destructivo que afecta significativamente a la población, en su vida o en sus fuentes de sustento y funcionamiento. Es el resultado de una ruptura ecológica importante de la relación entre los humanos y su ambiente, un evento serio y súbito de tal magnitud que la comunidad afectada requiere de esfuerzos extraordinarios para hacerle frente, a menudo con ayuda externa o apoyo internacional (*World Health Organization,* 1995 y Programa Urgencias Epid. y Desastres, 2009).

Se llama peligro (P) a la probabilidad de que se presente un evento de cierta intensidad, tal que pueda ocasionar daños en un sitio dado. Se define como grado de exposición (E) a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio considerado y que es factible que sean dañados por el evento. Se llama vulnerabilidad (V) a la propensión de estos sistemas a ser afectados por el evento; la vulnerabilidad se expresa como una probabilidad de daño. Finalmente, el riesgo es el resultado de los tres factores, que se obtiene como:

Formula: Riesgo = peligro x exposición x vulnerabilidad;

$$R = P \times E \times V$$

Los desastres no son naturales, se derivan de una condición de riesgo. Por su inmenso poder destructivo, por su limitada posibilidad de prevención y por las casi siempre escasas posibilidades de enfrentar sus consecuencias de manera adecuada en tiempo y espacio, sobre todo cuando los niveles de pobreza son comparables también a los efectos de una catástrofe natural, estos desastres han sido objeto de la atención de la población desde tiempos inmemoriales.

La estrecha relación entre las consecuencias de un evento calificado de desastre y la pobreza han sido sufridas por millones de personas, no solo a través de la historia, sino hasta la hora actual (Cuadro 1).

Son los fenómenos hidrometeorologicos los que más perjuicios económicos y sociales han causado en Mexico, y quizás en el resto del mundo, como se puede observar en el Cuadro 1 y 2.

Cuadro 1
Impacto de desastres, 1920-2011

Siniestro	Lugar y año	Muertes
Terremoto 7.8	China -1920	200
Terremoto 7.9	Japón -1923	145
Terremoto 7.3	Rusia -1948	110
Huracán	Bangladesh -1970	500
Terremoto 7.5	China -1976	655
Terremoto 8.5	México -1985	10
Huracán	Bangladesh -1991	140
Tsunami	Tailandia, Indonesia -2004	230
Huracán	Birmania -2008	140
Terremoto 7.1	Haití -2010	316
Tsunami	Japón -2011	18

Nota: el más catastrófico: Inundación en China en 1931. El río Yangtsé, el río Amarillo y el Huai se desbordaron, destrozando miles de millas cuadradas de tierras, eliminando villas completas y todas las cosechas de arroz de la zona. Entre las inundaciones, la hambruna y las enfermedades asociadas unas 3'700,000 personas perdieron la vida (Wikipedia, 2020a).

Fuente: Statista, 2020.

Cuadro 2
Monto de daños por tipo de evento en México

Tipo de fenómeno	Total de daños (millones de pesos)				
	2008	2009	2010	2011	2012
Geológicos	78.2	72.0	8,821.8	416.6	1,555.3
Hidrometeorológicos	13,890.1	14,041.8	82,540.0	39,543.8	15,265.9
Químicos	241.7	319.9	924.3	1,376.1	370.1
Socioorganizativos	79.7	153.8	86.3	74.5	118.1
Total	14,289.7	14,587.5	92,372.4	41,411.0	17,309.4

Fuente: base de datos de impacto económico y social del Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, 2014.

Huracanes

La definición de huracán de acuerdo a la Real Academia Española RAE, (2020) es "Viento muy impetuoso y temible que, a modo de torbellino, gira en grandes círculos, cuyo diámetro crece a medida que avanza apartándose de las zonas de calma tropicales, donde suele tener origen". También es "Viento de fuerza extraordinaria" y "Suceso o acontecimiento que causa destrucciones o grandes males".

Asimismo, la palabra "huracán" utilizada en el hemisferio occidental tiene varios orígenes. La procedencia de esta palabra se la debemos principalmente a los tainos, ya que estos hacían uso del vocablo Juracán para referirse a un Dios maligno (El Nacional, 2017).

Los huracanes reciben nombres diferentes en otras partes del mundo. Por ejemplo, Ciclón es el nombre que recibe en la India y todo el Golfo de Bengala, en Filipinas se denomina "baguio", en Australia se identifica como "Willy-Willy" y en el Oeste del Pacífico se conoce como tifón (National Oceanic and Atmospheric Administration U.S. Department of Commerce Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory).

Cronología de Huracanes. Primeras referencias históricas a huracanes del Atlántico

Los viajes de Colón

El 3 de agosto de 1492, Colón llegó a las Islas Canarias. Allí, se mantuvo hasta el 6 de septiembre, abasteciendo a la flota de agua y alimentos y reparando el timón y las velas de La Pinta. A los treinta y tres días de la partida de Canarias, la expedición llegó a la isla de Guanahani de las Bahamas, bautizada por los viajeros como San Salvador. El tiempo de los días anteriores, con pocas excepciones, se había comportado sin contratiempos, con vientos del este, propios de la corriente del flanco meridional del anticiclón de las Azores (IAI, 2019).

Después de identificar varias islas, entre ellas Cuba y La Española, emprende el viaje de regreso a España el 16 de enero, tras sufrir el embate de fuertes temporales, pero no de un ciclón (IAI, 2019).

En 1502, durante su cuarto viaje, Colón advirtió al gobernador de Santo Domingo, don Nicolás de Ovando, del peligro de un huracán que se aproximaba. Solicitó resguardarse en La Española, permiso que le fue negado. Colón encuentra refugio en una caleta que llamó Puerto Hermoso. Por no seguir el incipiente pronóstico meteorológico de Colón, la flota de Ovando, de 20 embarcaciones, cargada de tesoros para España y con 500 hombres a bordo, naufragó totalmente. Esta fue la primera referencia histórica del fenómeno (IAI, 2019).

¿Puede decirse que Colón tuvo suerte al no encontrase con un ciclón en ninguno de sus viajes? Una publicación en la revista Nature sugieren que la

actividad de los huracanes en el Atlántico alcanzó un máximo durante la época medieval (alrededor de 900-1100 d.C.), para aplacarse notablemente después del año 1500 d.C. (y volver a incrementarse después de 1850, y en particular a partir de 1980). El pico del Medioevo rivaliza con los niveles recientes de actividad. El máximo medieval está asociado con un período en que las temperaturas de la superficie del mar (SSTs) en el Atlántico fueron más elevadas, mientras que el período de baja actividad coincide parcialmente con la Pequeña Edad de Hielo, que tuvo lugar entre los siglos XVI y XIX (IAI, 2019).

Huracanes más destructivos que han afectado a la república mexicana

Huracán de Colima

En el año 1959, durante el mes de octubre, entre los días 25 y 27, fue observado el llamado "huracán de Colima". El día 25 alcanzó la categoría 5 en la escala de Saffir-Simpson; con esta misma intensidad, el día 27 de octubre tocó tierra en las inmediaciones de Manzanillo, Colima. Derivado de sus fuertes efectos, el pueblo Minatitlán de dicho estado fue destruido por completo, además de ocasionar la muerte a más de 2000 personas. Este huracán ha sido uno de los más fuertes conocidos dentro del Pacífico oriental (García, 2018).

Patricia

En el año 2015, Patricia fue uno de los ciclones tropicales más poderosos que impactó territorio mexicano. El viento máximo registrado tuvo una velocidad de 325 km/h con rachas de 400 km/. Durante la noche del día 22 de octubre se intensificó a categoría 5 y para el día 24 de octubre a las 18:15 horas tocó tierra al sur del estado de Jalisco como huracán categoría 4. Afectó directamente a los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Durango, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro. Aunque no hubo pérdidas humanas, las afectaciones en flora, fauna y áreas urbanas fueron destacables (García, 2018).

Gilberto

El huracán Gilberto se formó el 8 de septiembre de 1988, cerca de las Islas Barlovento. Tocó tierra por primera vez el 12 de septiembre en Jamaica y dos días después llegó a Yucatán, convertido en un huracán de categoría 5. Alcanzó vientos de hasta 295 kilómetros por hora y es considerado por la Organización Meteorológica Mundial como uno de los más intensos, devastadores y mortíferos registrados en el océano Atlántico durante el siglo XX. Los daños tras su paso se calculan en 5.5 mil millones de dólares. Gilberto fue un fenómeno tan impresionante en extensión y amplitud que sus bandas nubosas alcanzaron un área de 1250 kilómetros. A su paso por nuestro país dejó casi 200 muertos (Cordero, 2011).

Wilma

Ha sido el ciclón más errático y destructivo que ha golpeado México. Tocó tierra como categoría 4, con vientos superiores a los 250km/h, el 21 de octubre de 2005, cerca de Playa del Carmen, Quintana Roo. Acometió la Riviera Maya con poderosos vientos durante más de 70 debido a que un frente frío impedía que se moviera. Wilma dejó ocho muertos y más de 10 mil millones de dólares en pérdidas (*Televisa. News,* 2017).

Janet

Las características fueron las siguientes: su duración: 21 de septiembre de 1955 a 30 de septiembre de 1955. Los vientos máximos fueron de 280 kilómetro por hora (durante 1 minuto), la presión mínima 914hPa. Los daños $65.8 millones (USD). Fallecieron 1023 personas. Áreas afectadas, México, Belice, Barbados, Península de Yucatán e Islas de Barlovento (Gobierno de México, 2020) (Cuadro 3).

Cuadro 3
Comparación entre dos desastres provocados por huracanes SS-5 en regiones geográficas diferentes

Huracanes	Andrew	Micht
Fecha	21OCT -5 NOV 1992	AGOSTO 25 1998
Presión (mínima)	932 Hpa	905 Hpa
Viento (s)	260 km/h	287 k/h
Países	2	6
Muertes	18	11 000
Pérdidas económicas	16x 10 (9) USD	3,5 x 10 (9)

Nota: Por cada dólar perdido en Centroamérica, se perdieron 5 en Estados Unidos y por cada muerte en Estados Unidos, ocurrieron 611 en Centroamérica.

Fuente: Luis E. Ramos Guadalupe, Sociedad Meteorológica de Cuba.

¿Qué es un ciclón tropical?

Es una masa de aire cálida y húmeda con vientos fuertes que giran en forma de espiral alrededor de una zona central, en el hemisferio norte en sentido contrario a las manecillas del reloj. Se forman en el mar, cuando la temperatura es superior a los 26º C. Los ciclones son, tal vez, la perturbación más característica de la zona de circulación tropical. Su diámetro no es demasiado grande y la frecuencia de su ocurrencia es pequeña en un lugar

específico. Esto quiere decir que un habitante de la zona tropical está más influido por las ondas tropicales que por los ciclones. Sin embargo, los ciclones, que según su intensidad se clasifican como depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes, constituyen un fenómeno meteorológico peligroso que pueden provocar un fuerte impacto con pérdidas de vidas humanas, daños ecológicos y perjuicios económicos (CENAPRED, 2018).

Los huracanes, a diferencia de los ciclones tropicales más débiles, se caracterizan por tener una zona central de poca nubosidad y vientos débiles llamada ojo. Alrededor del ojo, se extiende la pared nubosa de gran altura, a partir de la cual la nubosidad se extiende hacia fuera de forma espiralada (CENAPRED, 2018).

Los vientos intensos rodean a la pared del ojo y van disminuyendo hacia fuera su rapidez de forma subhiperbólica. Dentro del ojo la temperatura del aire es mayor que fuera de él, por ello se dice que los ciclones tropicales son sistemas de núcleo caliente. Este efecto es más notable en los niveles medios de la troposfera (CENAPRED, 2018).

La irrupción de frentes fríos en la zona tropical se asocia con los cambios de tiempo en el invierno, la ocurrencia de lluvias en el periodo poco lluvioso del año y la génesis de tornados. En el extremo sur de los frentes fríos se dan condiciones favorables para el surgimiento de ciclones tropicales (CENAPRED, 2018).

Los ciclones tropicales presentan un campo de viento asimétrico, de modo tal que si definimos un sistema de coordenadas orientado según la dirección del movimiento del ciclón los vientos más intensos (y también las lluvias más intensas) se concentran en el semicírculo derecho y particularmente en el cuadrante derecho delantero. Los vientos más débiles ocurren en el cuadrante izquierdo trasero (CENAPRED, 2018).

Riesgos asociados con los ciclones tropicales

Relacionados especialmente con los huracanes: marejadas, vientos fuertes, intensas precipitaciones, deslizamientos e inundaciones. La intensidad de un huracán es un indicador que generalmente refleja el potencial destructor del mismo.

Los ciclones tropicales (CTs) son vórtices atmosféricos intensos de núcleo caliente, que se forman sobre los océanos tropicales. La parte interna de la tormenta es aproximadamente simétrica con respecto al eje; conforme la tormenta alcanza la madurez, sus vientos más fuertes rodean al ojo, que se encuentra en relativa calma. El diámetro del ojo varia típicamente entre 20 y 100 kilómetros, el déficit de presión en el ojo puede alcanzar hasta el 10% de los alrededores, produciendo que el núcleo cálido del ciclón se extienda profundamente en la tropósfera (Haurwitz, 1935). El ojo está parcial o totalmente rodeado por un anillo de nubes convectivas que se extienden casi desde la superficie del océano hasta la tropopausa. Es en este anillo donde se

localizan los vientos más fuertes. Esto se conoce como la circulación primaria simétrica con respecto al eje. La circulación secundaria consiste en un flujo entrante a lo largo de la capa frontera, que se levanta en la pared del ojo y en las bandas espirales, y un flujo saliente en una delgada capa justo por debajo de la tropopausa (Kepert, 2010).

La estructura de un huracán se puede describir de la siguiente forma: en el centro se encuentra el ojo o vórtice, una zona que varía entre 10 y 100 kilómetros de diámetro, según el tamaño del huracán, en esta zona no sopla el viento, el cielo está despejado, la temperatura es muy elevada y la presión muy baja. Alrededor se extiende la pared del ojo, un sector de aproximadamente 20 kilómetros de ancho en la cual hay densas formaciones de nubes y soplan los vientos más violentos, esta zona es relativamente fría en relación con las altas temperaturas del ojo. De la pared del ojo hacia afuera, hasta unos 150 kilómetros del centro del huracán, los vientos no son tan intensos pero producen grandes mareas de tempestad y fuerte oleaje. Más allá de los 150 kilómetros los vientos son de mucho menor intensidad y el oleaje es casi normal pero caen abundantes lluvias (Morales, 2012).

Cuando un huracán se acerca a una localidad, el observador ve que de hora en hora se incrementa la frecuencia y la intensidad de los chubascos y tormentas eléctricas, los vientos van aumentando y el tiempo en general va deteriorándose rápidamente. Después vendrá el huracán en toda su intensidad, y si el ojo pasa por la localidad, entonces abruptamente vendrá la calma, saldrá el sol si es de día o se vean las estrellas y la luna si es de noche, pues el cielo estará despejado o con nubes altas. Tiempo después, volverá el huracán en toda su furia, y a veces lo peor ocurre después de pasar el ojo (Morales, 2012).

El ojo no existe en los estados de Depresión Tropical y Tormenta Tropical, únicamente en huracanes cercanos a la Categoría 2. Esto ocurre porque es necesaria una velocidad apreciable del viento que genere en el centro de rotación una zona donde las fuerzas se equilibren, y el aire descienda seco y más cálido, formando la zona sin nubes del ojo (Morales, 2012).

La pared del ojo

La densa pared de tormentas eléctricas y chubascos que rodea al ojo es la zona de mayor convergencia del aire superficial, por tanto, es donde se encuentran los vientos más intensos. Un cambio en la estructura del ojo y la pared del ojo durante cualquier momento de la vida de un huracán puede alterar la velocidad del viento, que es una indicación de la intensidad del sistema. El diámetro del ojo puede aumentar o disminuir en tamaño y es posible que se formen dos paredes concéntricas alrededor. En los sistemas débiles pueden aparecer hasta dos y tres ojos o centros de circulación, pero por poco tiempo (Portela, M A, Insmet, 2006).

El tamaño de un huracán se mide por la distancia, medida a partir del centro del ojo, hasta el área donde la velocidad del viento alcanza por lo menos intensidad de tormenta tropical, esto quiere decir, velocidades mayores o iguales a 63 kilómetros por hora. Aunque el tamaño no necesariamente está relacionado directamente con la intensidad; no hay relación entre dimensiones de un huracán y la intensidad de sus vientos (Portela, M A, Insmet, 2006).

Clasificación de los ciclones tropicales según su intensidad

La escala de huracanes de Saffir-Simpson es una escala que clasifica los ciclones tropicales según la intensidad del viento, desarrollada en 1969 por el ingeniero civil Herbert Saffir (Wikipedia, 2020b).

Cuadro 4. Herbert Saffir y el director del Centro Nacional de Huracanes (NHC) de Estados Unidos, Robert "Bob" Simpson.

Depresión tropical	Velocidad del viento	0-17 m/s	0-62 km/h	0-33 kt	0-38 mi/h
	Marea	0 m		0 ft	
	Presión central	>980 hPa		>28.94 pulg Hg	
	Nivel de daños	Lluvias que pueden llegar a causar graves daños e incluso inundaciones.			
	Ejemplos	Depresión tropical Diez de 2007 - Depresión tropical Siete - Depresión de Brasil.			
Tormenta tropical	Velocidad del viento	18–32 m/s	63–118 km/h	34–63 kt	39–73 mph
	Marea	0–3 m		0-12 ft	
	Presión central	>980 hPa		>28.94 "Hg	
	Daños potenciales	Lluvias abundantes que pueden provocar inundaciones devastadoras. Vientos fuertes que pueden generar tornados.			
	Ejemplos	Tormenta tropical Agatha - Tormenta tropical Andrea - Tormenta tropical Allison - Tormenta tropical Alma - Tormenta tropical Charley - Tormenta tropical Erika.			

Fuente: Wikipedia, 2020.

Los huracanes se clasifican según su intensidad por una escala de cinco categorías que indica el daño potencial que pueden provocar. Esta es la escala Saffir-Simpson que aparece en el Cuadro 5.

Nomenclatura

La costumbre de designar a los huracanes con nombres de personas quedo establecida en 1953. Anteriormente se identificaban por sus coordenadas geográficas mientras se encontraban en el mar, haciéndolo confuso debido al movimiento constante. Si entraban a tierra se les daba el nombre del poblado más cercano. Sin embargo, al asignarles nombre cuando alcanzan la categoría de tormenta tropical,

se les puede identificar con mayor precisión. Los nombres son tomados de una lista elaborada por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) y se aplican de la siguiente manera (Rodríguez, 2017: 82).

Cuadro 5. Escala Saffir-Simpson

ESCALA SAFFIR-SIMPSON PARA CICLONES TROPICALES DE ACUERDO A INTENSIDAD DEL VIENTO						
CATEGORIA	TIPO	PRESIÓN(hpa)	VELOCIDAD DEL VIENTO (KT)	(Km/h)	(m/s)	DAÑO
	DEPRESIÓN TROPICAL		<34	<63		
	TORMENTA TROPICAL		34-63	63-118		
1	HURACÁN	>980	64-82	119-153	32-41	Mínimo
2	HURACÁN	965-980	83-95	154-177	41.5-47.5	Moderado
3	HURACÁN	945-965	96-113	178-209	48-56	Extenso
4	HURACÁN	920-945	114-135	210-249	56.5-67.5	Extremo
5	HURACÁN	<920	>136	>250	>67.5	Catastrófico

Fuente: *Asociación Ecometta*, 2020.

Se asignan los nombres en orden alfabético, comenzando con la A y repitiéndose así cada seis años, los nombres son en los idiomas español, francés e inglés, masculino y femenino. Para evitar confusiones se elimina el nombre de huracanes notables y no se vuelven a usar. No se emplean denominaciones que empiecen con Q, U, X, Y Z, ya que son muy escasas (Rodríguez, 2017: 82) (Figura 1 y 2).

Hay varias condiciones que posibilitan que un ciclón tropical se forme y se desarrolle hasta convertirse en huracán. Hay al menos tres que son imprescindibles:

1) Una perturbación preexistente: área extensa de nubosidad con lluvias, chubascos y tormentas eléctricas.

2) Temperatura cálida de las aguas del océano: 26,6 ºC o superior, hasta una profundidad de al menos 45 metros.

3) Vientos en la atmósfera superior: que sean débiles y no cambien mucho de dirección y velocidad a través de la altura de la atmósfera (bajo cizallamiento). Si se pudiera rebanar un ciclón tropical, se vería parecido a la imagen que aparece a continuación (Figura 3).

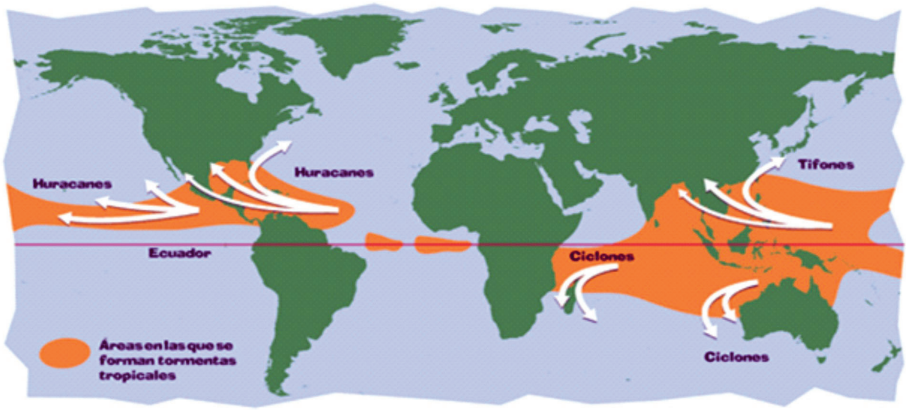
Como se observa en la imagen anterior las flechas rojas pequeñas muestran el aire cálido y húmedo que sube desde la superficie del océano y forma bandas de nubes alrededor del ojo.

Las flechas azules muestran cómo el aire frío y seco baja hacia el ojo y por entre las bandas de nubes (NASA, 2019).

Las flechas rojas grandes muestran la rotación de las bandas de nubes que se elevan a distintos niveles, desde la superficie hasta 10 a 12 kilómetros de altura. Entonces se dice que hay una fuerte cizalladura vertical del viento. También puede debilitarse si se desplaza sobre aguas más frías o sobre una zona más seca. Por lo general, una vez que un huracán alcanza tierra firme, pierde la fuente principal de humedad y la circulación superficial puede verse reducida por la fricción con la topografía del terreno. Un huracán o un ciclón

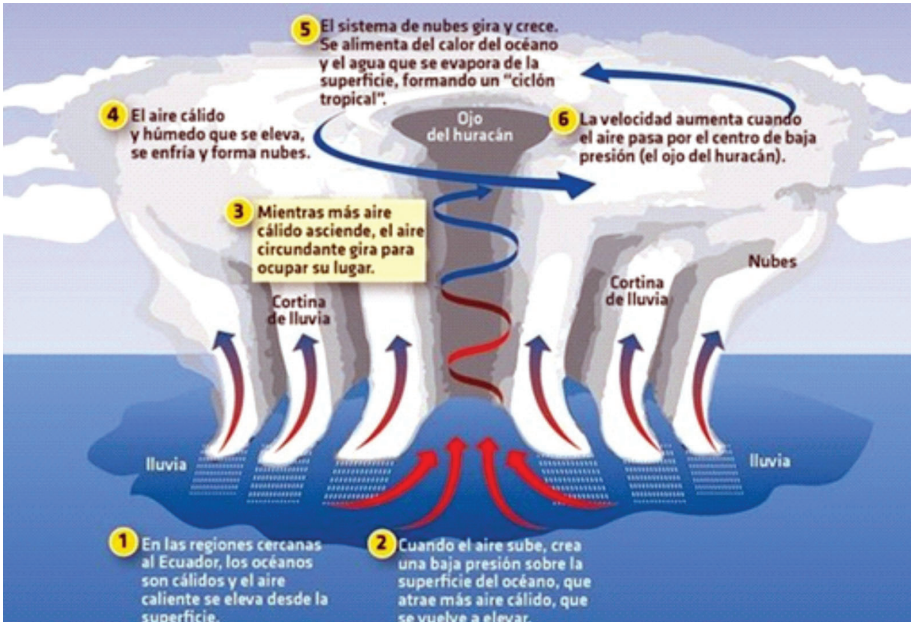
tropical que está debilitándose puede volver a cobrar mayor intensidad si se desplaza hacia una región más favorable o interactúa con un sistema frontal de las latitudes medias (*Red Climática Mundial*, 2017).

Figura 1. Las zonas del mundo donde se originan los huracanes y tormentas tropicales



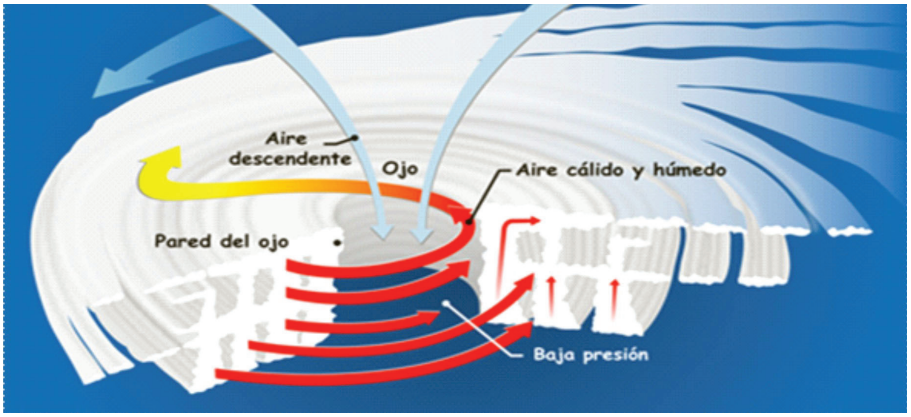
Fuente: NASA, 2019.

Figura 2. Condiciones que posibilitan la formación de un huracán



Fuente: Valentini, Georgette, 2018.

Figura 3. Corte de un ciclón tropical



Fuente: Red Climática Mundial, 2017.

Las condiciones generales de formación y desarrollo de los ciclones tropicales ocurren durante los meses de verano en los océanos tropicales del mundo, con la excepción del Atlántico Sur y de la porción Sudeste del Pacífico, debido a que, en estas zonas, a pesar de ser tropicales, las capas superficiales del océano son relativamente frías, con temperaturas por debajo de los 26.5 ^{o}C (Red Climática Mundial, 2017).

Vigilancia de los ciclones tropicales

Para la vigilancia de los CTs, la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1993), perteneciente a la Organización de las Naciones Unidas, se encarga de coordinar los esfuerzos de los países con el fin de tener una mejor vigilancia de la atmósfera. Esta ha dividido la superficie terrestre en zonas que quedan por encargo de diferentes organismos (lista de abajo y Figura 2.1). Los límites entre las regiones pueden ser algo arbitrarios y las tormentas ocasionalmente pueden atravesarlos, con interesantes consecuencias reflejadas en los datos. Aunque existen agencias diferentes de las oficiales, las regiones de vigilancia se encuentran distribuidas de la siguiente manera (Schreck et al., 2014). Zonas (Figura 4).

1) Atlántico Norte: Administración Nacional del océano y la atmósfera (NOAA), Miami.

2) Pacifico Este: Centro Nacional de Huracanes (NHC), Miami.

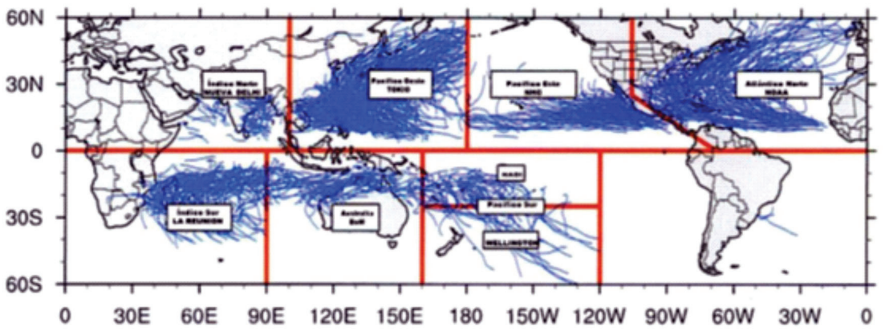
3) Pacifico Oeste: Centro Regional Especializado Meteorológico (RSMC), Tokio .

4) Índico Norte: Centro Regional Especializado Meteorológico (RSMC), Nueva Delhi.

5) Índico Sur: Centro Regional Especializado Meteorológico (RSMC), La reunión

6) Australia: Oficina Australiana de Meteorología (BoM)
7) Pacífico sur: Centro Regional Especializado Meteorológico (RSMC), Nadi.

Figura 4. Zonas de vigilancia de ciclones tropicales



Fuente: Schreck, 2014.

Daños y enfermedades provocados por los efectos de los huracanes[1]

En general, si la acción de los organismos encargados de la Protección Civil es adecuada y la información a la población es la correcta, las muertes ocasionadas por estos fenómenos deben ser mínimas (Erick, *et al.*, 2000). La mayor cantidad de muertes ocurre cuando las condiciones socioeconómicas son adversas. Lo anteriormente expuesto no es una regla sin excepción. En algunos casos, como el huracán Katrina, en Estados Unidos, una serie de factores previos no atendidos oportunamente, son causa de las grandes pérdidas humanas y materiales ocurridas.

Los fenómenos acompañantes del huracán, como inundaciones, marejadas y deslizamientos de tierra, pueden aumentar la mortalidad. Las lesiones que con mayor frecuencia se asocian a los vientos huracanados se deben a:

- Impacto de objetos arrastrados por el viento.
- Atascamiento en lodo.
- Aplastamiento por la caída de muros y viviendas.
- Avisos preventivos y la evacuación temprana reducen la morbilidad y letalidad ocasionadas directamente por los vientos huracanados.
- Los efectos en salud pueden presentarse hasta meses después (vectores).

1 Tomado de Noji Erick K; Baxter, Peter J, M.D *et al.* 2000. "EL impacto de los desastres en la salud pública" National Center for Environmental Health Centers for Disease Control and Prevention Atlanta, GA, Estados Unidos de América pg. Organización Panamericana de la Salud Carrera 13 No. 32 - 76, piso 5 Bogotá, D.C., Colombia. Organización Panamericana de la Salud.

Inundaciones súbitas. Presenta el 50% del total de las muertes de todos los desastres, 70% ocurren en la India y Bangladesh. La mayoría de las heridas, son producto de la corriente fuerte de agua acompañada por basura. La causa principal de muertes es:

- Asfixia por inmersión.
- Traumas.
- Hipotermia (con o sin sumergimiento).
- Aumento de mordeduras de animales subterráneos.
- Interrupción en la purificación de agua e incremento de aguas residuales

Inundaciones lentas. Rara vez ocasionan muertes y lesionados en humanos; daños graves a infraestructuras. Alteraciones ecológicas que favorecen la proliferación de la fauna nociva, y desplazamiento de animales silvestres.

Riesgos sanitarios por mortandad de animales. La morbilidad se incrementa por la humedad constante y proliferación de vectores.

En el mundo, los desastres relacionados con agentes perturbadores asociados a fenómenos hidrometeorológicos se cuentan entre los que mayor número de afectaciones registran. En México no somos ajenos a estos sistemas destructivos y en la actualidad esta situación prevalece y se mantiene como una constante que se ve agravada, por ser nuestro territorio especialmente susceptible a la acción de ciclones tropicales en ambos litorales (Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe) por un período que abarca más de la mitad del año (de mayo 15 a noviembre 30), así como por el aumento de la vulnerabilidad que muestran grandes conglomerados poblacionales debido a su exposición a los diversos peligros asociados a este fenómeno.

El objetivo del SIAT CT consiste en establecer un mecanismo de alertamiento y coordinación que, de manera consensuada, genere una respuesta organizada del Sistema Nacional de Protección Civil a la amenaza que constituye un ciclón tropical, mitigando los efectos de este agente perturbador.

Etapas y Acciones

Fase de acercamiento: parte delantera del ciclón. Se considera que el Sistema de Alerta Temprana está en esta fase cuando el ciclón se encuentra aproximándose a territorio nacional o acercándose a un área afectable. Se consideran 5 etapas de alertamiento en este cuadro, que se enuncian a continuación, junto con la descripción de cada una y las acciones generales a tomar tanto por el Sistema Nacional de Protección Civil, las autoridades gubernamentales, los organismos e instituciones sociales y privadas, como por la población (Figura 5).

Cuadro 6
Estimación de los posibles daños de un huracán

Fenómeno	Velocidad km por hora	Estimación de los posibles daños
Depresión tropical	Menor a 63 km/h	Daños mínimos locales.
Tormenta tropical	63 a 118 km/h	Daños mínimos.
Huracán categoría 1	118-152 km/h	Daños mínimos.E7:E15 Daños a la vegetación y muelles, así como algunas inundaciones en carreteras y caminos costeros.
Huracán categoría 2	153-178 km/h	Daños moderados. Daños mínimos a muelles y daños no estructurales en casas y edificios, derribos de vegetación, así como inundaciones en carreteras costeras.
Huracán categoría 3	179-209 km/h	Daños extensos. Destrucción parcial de casas, edificaciones costeras y muelles, derribo de árboles altos, anuncios dañados y llevados por el viento y marejadas inundan zonas costeras.
Huracán categoría 4	210-250nkm/h	Daños extremos. Colapso parcial de techos y paredes en casas, daños considerables a edificaciones costeras y muelles. Derribo de vegetación y señales, así como erosión parcial de playas e inundación en terrenos planos abajo de 3 m.
Huracán categoría 5	Superior a 250km/h	Daños catastróficos. Derrumbe total de techos y paredes en casas, las construcciones ligeras son llevadas por el viento, daños extremos a muelles, vegetación arrasada por el viento, erosión total de las playas e inundación en terrenos planos provocando daños graves hasta 460 m de la costa.

Fuente: Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT CT) del Sistema nacional de Protección Civil - México-Secretaria de Gobernación.

El ciclo de vida de un huracán puede durar más de dos semanas sobre las aguas del océano y en ese período puede recorrer una larga trayectoria. De la misma manera en que varios factores contribuyen a la formación de un huracán, existen otros que promueven su debilitamiento y disipación. El huracán puede debilitarse o disiparse sobre el mar debido a la existencia de fuertes vientos superiores o gran diferencia en dirección y velocidad entre los vientos a diferentes niveles, desde la superficie hasta 10 a 12 kilómetros de altura (INSMET, 1997-2020).

Figura 5. Tipo de alertas, 2017

Fuente: Sistema Estatal de Protección Civil del Estado de Quintana Roo, México.

La temporada ciclónica se divide en zonas de formación de ciclones tropicales, estos son: el atlántico norte, el mar caribe, el golfo de México y el pacífico mexicano. En México, la temporada de ciclones comienza oficialmente el 15 de mayo en el Océano Pacífico, mientras que, en el Océano Atlántico comienza el 1 de junio. Para ambas zonas, la actividad concluye el 30 de noviembre, (INSMET, 1997-2020).

Ciclones del Atlántico

La parte más activa de la temporada ocurre entre mediados de agosto y finales de octubre. Sin embargo, pueden producirse huracanes en cualquier momento durante la temporada.

En su mayoría, las zonas donde se forman los huracanes y las trayectorias que estos siguen están relacionadas con el mes en que se forman (INSMET, 1997-2020). Como regla, a comienzo y fin de la temporada (junio, octubre y noviembre) los ciclones tropicales se forman en el Mar Caribe occidental y en el Golfo de México, mientras que en los meses centrales de la temporada (julio, agosto y septiembre) se forman en el Atlántico, usualmente entre África y las Antillas Menores. Estas son las condiciones promedio, sin embargo, los huracanes pueden formarse en distintos lugares. Si se registra el patrón general, se podrá llegar a comprender mejor que en México los meses más

peligrosos son los del inicio y fin de la temporada por su formación en el Mar Caribe occidental (INSMET, 1997-2020).

Cada año, se forman como promedio diez tormentas tropicales sobre el Océano Atlántico, el Caribe y el Golfo de México, muchas de las cuales nunca salen de las aguas (INSMET, 1997-2020).

Ciclones del Pacífico

La actividad de los CTs en el Pacífico Noreste se da desde mediados de mayo a noviembre. Estos seis meses y medio se conocen como la estación "oficial" por el Servicio Meteorológico Nacional de los E.U.A. Durante los primeros meses, la formación de CTs se debe a que la Zona Intertropical de Convergencia (ZITC) empieza a intensificarse y subir de latitud proporcionando condiciones adecuadas para interactuar con las ondas del este y así formar los CTs. A la mitad de la temporada, además de las condiciones previas, la temperatura del océano ha aumentado considerablemente y proporciona un factor más para el desarrollo e intensificación de los CTs (Hernández Santes, 2016: 38).

La duración de las temporadas de CTs no siempre es de la misma extensión. Por ejemplo, el ciclón tropical que se formó más temprano se registró el 26 de enero de 1992; el último de esta temporada fue el del día 30 de octubre. Por otro lado, el ciclón tropical más tardío se disipó el 22 de diciembre de 2010 y la temporada había empezado el 28 de mayo de ese año (Hernández Santes, 2016: 38 y 39).

La mayoría de los CTs ocurren entre el 17 de mayo y el 1 de noviembre. Empezando el 15 de mayo, la formación de los CTs muestra un incremento casi invariable hasta el 21 de julio. Después, y hasta el 21 de septiembre, la formación es casi constante, notándose un mínimo relativo entre el 2 y el 14 de agosto; mientras que el máximo valor se encuentra el 28 del mes, con 14 eventos sucedidos. A partir del 21 de septiembre se tiene una pendiente de descenso aproximadamente constante hasta finales de noviembre (Hernández Santes, 2016: 39).

Elementos peligrosos en un ciclón tropical

Los principales fenómenos peligrosos que acompañan a un ciclón tropical son la surgencia, los vientos fuertes, las precipitaciones intensas, el oleaje y los tornados (EcuRed, 2020).

Surgencia

Es el fenómeno natural más dañino provocado por un ciclón tropical, tanto para la vida humana como para los bienes materiales de la sociedad. Consiste en una impresionante y repentina ola que llega junto con el organismo a tierra. Está constituida por una onda de longitud larga, que como promedio puede

afectar de 150 a 200 km. de costas, con una durabilidad de algunas horas, hasta alcanzar su mayor altura a la derecha de la trayectoria del organismo, en la región de los vientos máximos. Es provocada por la tensión de los vientos fuertes y la caída de la presión atmosférica al encontrarse este organismo tropical sobre una región de plataforma insular o continental de poca profundidad, pudiendo alcanzar alturas superiores a los 6 m (EcuRed, 2020).

Marea de Tormenta

Esta consiste en la combinación de la surgencia con la marea astronómica presente en el lugar donde está ocurriendo el fenómeno, produciéndose la mayor sobre elevación del nivel medio del mar ante la presencia de una pleamar. A los efectos devastadores de este dañino fenómeno natural debe de añadírsele la altura que alcanzan las olas provocadas por el ciclón tropical, las cuales se desplazan por encima de ella (EcuRed, 2020).

Las lluvias torrenciales

El ciclón tropical es un sistema productor de lluvia. Cuando un ciclón tropical toca tierra, es común que deje entre 100 y 300 mm o más de lluvia en una amplia zona. Sin embargo, la lluvia no depende de la intensidad del ciclón tropical. Sin embargo, un desplazamiento lento o errático sobre una misma área, una zona de topografía accidentada y la interacción con otros sistemas meteorológicos, ocasiona lluvias torrenciales que a su vez producen grandes y devastadoras inundaciones. El grado de peligro que representan las inundaciones depende, además del nivel de saturación del suelo, por lo que, si después de varios días con lluvias ocurre la afectación de un ciclón tropical, las inundaciones son mucho más extensas y mortíferas. Los deslizamientos de tierra en zonas montañosas es otro factor muy peligroso que se produce a consecuencia de las lluvias intensas (EcuRed, 2020).

En los estadios de Depresión Tropical y Tormenta Tropical, las lluvias generalmente están alejadas del centro y ocurren hacia la derecha de la trayectoria del organismo, entre 100 y 300 kilómetros de distancia del centro (EcuRed, 2020).

Los vientos intensos

Los ciclones tropicales se clasifican, como ya se vio, de acuerdo con la velocidad de los vientos máximos sostenidos promediados en un minuto. El poder destructor del viento aumenta rápidamente con su velocidad, ya que no depende de la velocidad del viento, sino del cuadrado de esa velocidad (EcuRed, 2020).

Los vientos de una Depresión Tropical son usualmente débiles y solo son capaces de ocasionar daños en estructuras débiles o en cultivos de poca raíz y

amplio follaje, como el plátano. En una tormenta tropical son lo suficientemente fuertes como para representar ya una cierta amenaza (EcuRed, 2020).

Los vientos de intensidad huracán pueden fácilmente destruir una casa o un edificio cuya estructura sea de mala calidad. Durante un huracán, los escombros, los carteles, las tejas y materiales que se desprenden de los techos, así como cualquier objeto pequeño que se haya dejado afuera, se transforman en proyectiles. Los vientos más intensos soplan generalmente en el lado derecho de la pared del ojo del huracán (INSMET, 1997-2020).

Las rachas son intensidades grandes del viento, con solo 2 a 3 segundos de duración; superan al viento máximo sostenido de 1.2 a 1.5 veces su valor. Son las que más daños ocasionan (INSMET, 1997-2020).

Los vientos de intensidad de huracán también pueden dañar los edificios altos ya que la fuerza del viento suele aumentar con la altura hasta en una categoría de la escala Saffir-Simpson (INSMET, 1997-2020).

El pronóstico de los huracanes y su impacto en la sociedad; los sistemas de aviso y mitigación en caso de ciclones tropicales; y las catástrofes en México: alertas y protección civil

Gracias a los adelantos que se han logrado en los últimos 20 años tanto en materia de tecnología, modelos de huracanes por computadora, tecnología satelital, como en conocimiento y experiencia de los pronosticadores, ha aumentado enormemente la precisión de los pronósticos. Pese a estos adelantos, aún no comprendemos plenamente las complejas interacciones que se producen en la atmósfera y no se pueden producir modelos adecuados de ellas, lo cual limita la exactitud de los pronósticos. Pronosticar huracanes sigue siendo una tarea muy difícil. Quiere decir que ningún pronóstico puede ser perfecto; por tanto, tienen un grado de incertidumbre con el que hemos aprendido a vivir, lo que ha contribuido a reducir considerablemente la cantidad de muertes que se pueden atribuir a los ciclones tropicales y a los peligros con ellos relacionados. Para pronosticar huracanes, igual que con otros sistemas meteorológicos, se emplean diferentes técnicas, modelos de pronóstico y seguimiento por satélite y radar. Los modelos de pronóstico son esquemas matemáticos que, a partir de condiciones atmosféricas dadas, prevén las futuras condiciones del desarrollo de los fenómenos. En el caso de los ciclones tropicales hay técnicas climatológicas persistentes, sinóptico estadísticas y dinámicas (INSMET, 1997-2020).

Las climatológicopersistentes están relacionadas con el archivo histórico de ciclones tropicales del pasado: cómo se comportaron según la época del año y el movimiento que presentaron en las 12 o 24 horas anteriores. Son esquemas que solo se usan cuando el ciclón tropical está en áreas muy distantes y se tienen pocos datos. Los esquemas sinóptico estadísticos parten de ecuaciones

estadísticas que toman en cuenta la configuración y valor de los sistemas atmosféricos y su interacción con el ciclón tropical (INSMET, 1997-2020).

Los modelos dinámicos son los de mejor funcionamiento en la actualidad y permiten vislumbrar el estado futuro de la atmósfera con bastante certidumbre en plazos de 72 horas, en especial los sistemas de altas presiones y ondas superiores que están próximos e influyen el ciclón tropical. Pero el meteorólogo no confía ciegamente en los modelos. Los analiza todos, conoce sus virtudes y defectos, y emplea su experiencia y habilidad a la hora de tomar la decisión y pronosticar la futura trayectoria y evolución del ciclón tropical. Es entonces, que se hacen los Avisos de Ciclón Tropical, los cuales son rápidamente transmitidos por la radio y la televisión (INSMET, 1997-2020).

Pronósticos de la trayectoria de un huracán

Los pronosticadores deben analizar una enorme cantidad de datos, incluidos los resultados de los distintos modelos numéricos, que pueden estar en conflicto entre sí, y luego realizar el mejor cálculo posible para brindar un pronóstico de trayectoria e intensidad para 72 horas. Al igual que nos resulta más fácil predecir dónde estaremos en 12 horas que en 72, es más fácil predecir dónde estará un huracán justo antes de que toque tierra (aunque su trayectoria puede cambiar inesperadamente). Cuando el período de pronóstico es breve, el error en la trayectoria pronosticada es relativamente menor, mientras que cuando el pronóstico es para un período más prolongado, el margen de error aumenta considerablemente. Si está consciente de la existencia de estos errores en las previsiones, podrá evaluar mejor el potencial de peligro (INSMET, 1997-2020).

Aunque la intensidad de un huracán ofrece una indicación de su capacidad de destrucción, el impacto de un huracán depende de dónde y cuándo azota (INSMET, 1997-2020).

Cono de trayectorias pronosticadas

Los pronósticos de trayectoria de un ciclón tropical, como todo otro pronóstico, están sujetos a errores. Estos errores son pequeños en las primeras horas, pero van creciendo con cada hora subsiguiente. Para ilustrar estas incertidumbres se emplea un cono representativo del haz de trayectorias (INSMET, 1997-2020).

Puede decirse que este cono representa de un 60% a 70% de probabilidad de que el centro del ciclón tropical está contenido por él en el plazo total del pronóstico. Para construir el cono se toma la trayectoria, el consenso de los modelos junto a una interpretación subjetiva basada en la experiencia del pronosticador y se extiende hacia ambos lados, de acuerdo con los errores promedios de cada plazo durante un período de muchos años. Esto es, en 12 horas 75 kilómetros; en 24 horas, 140 kilómetros; en 36 horas 200 kilómetros; en 48 horas, 265 kilómetros y en 72 horas, 400 kilómetros (Figura 6) (INSMET, 1997-2020).

Figura 6. Temporada de ciclones tropicales 2019

Fuente: CONAGUA, 2019.

Bibliografía

Asociación Ecometta, 2020. “Escala Saffir-Simpson”. Disponible en: http://www.eltiempodelosaficionados.com/SABIASQUE_JULIO.html. Consultado el 19 de mayo de 2020.

Gobierno de México, 2020. “Información histórica de huracanes”. Disponible en: https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica. Consultado el 19 de mayo de 2020.

CIENCIA (2019), *Un gran paso para la humanidad.* Este libro tiene una licencia Creative Commons. Madrid, abril.

CENAPRED, 2018. “Ciclones tropicales”. Disponible en: http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/107-CARTELCICLONESTROPICALES.PDF. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

Cordero, Laura, 2011. “Huracanes: los 10 más fuertes en México”. *Sinembargo*, Disponible en: https://www.sinembargo.mx/11-10-2011/54313. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

Dunn, 1940, *Boletín de la American Meteorological*

El Nacional, 2017. ¿Conoces el origen de la palabra "Huracán"? *El Nacional.* Disponible en: https://elnacional.com.do/conoces-el-origen-de-la-palabra-huracan/. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

EcuRed, 2020. Ciclones tropicales. Disponible en: https://www.ecured.cu/Ciclones_Tropicales. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

Educalingo, 2020. "Meteorología". Disponible en: https://educalingo.com/es/dic-es/meteorologia. Consultado el 19 de mayo de 2020.

García, Úrsula Pamela, 2018. Huracanes categoría 5 que han afectado a México. *Meteored.* Disponible en: https://www.meteored.mx/noticias/divulgacion/huracanes-categoria-5-que-han-afectado-a-mexico.html. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

Hernández Santes, 2016. *Climatología de los ciclones tropicales en el Océano Pacífico noreste*, (Tesis de Ingeniería geofísica) Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10470/TESIS.pdf?sequence=1. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

Instituto de Meteorología de la República de Cuba, 2020. Generalidades de los ciclones tropicales. Disponible en: http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=OPTION&TB2=/contenidos/ciclones%20tropicales/generalidades/generalidades.htm. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

Instituto Interamericano para la investigación del Cambio Global (IAI), 2019. "Huracanes". Disponible en: http://www.iai.int). Consultado el 19 de mayo de 2020.

NASA, 2019. "Las zonas del mundo donde se originan los huracanes y tormentas tropicales". Disponible en: https://spaceplace.nasa.gov/hurricanes/sp/. Consultado el 8 de mayo de 2019.

National Oceanic and Atmospheric Administration U.S., 2009. "Cambio climático, energía". National Oceanic and Atmospheric Administration U.S. Department of Commerce Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory. Disponible en: http://cambioclimaticoenergia.blogspot.com/2010/05/temperaturas-globales-del-ano-2009.html. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

Nimbus, 2012. "Capítulo 2. La meteorología". Disponible en: http://200.58.146.28/nimbus/weather/pdf/cap2.pdf. Consultado el 6 de diciembre de 2020

Real Academia Española (REA), 2020. "Huracán", Diccionario de la lengua española. Disponible en: https://dle.rae.es/huracán. Consultado el 6 de diciembre de 2020.

Televisa. News, 2017. "Los huracanes más poderosos que han devastado a México". *Televisa. News*, 2017. Disponible en: https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/los-huracanes-mas-poderosos-que-han-devastado-mexico/. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

Portela Meteorología, 1997-2019. INSMET ® Todos los derechos reservados.

Programa Urgencias Epidemiológicas y Desastres, 2009. SSA.

Red Climática Mundial, 2017. "Corte de un ciclón tropical". Disponible en: http://redclimaticamundial.blogspot.com/2017/02/. Consultado el 8 de mayo de 2019.

Statista, 2020. Estadística de terremotos en el mundo. Disponible en: https://es.statista.com/grafico/20450/terremotos-mas-mortiferos-del-mundo/. Consultado el 12 de diciembre de 2020.

Valentini, Georgette, 2018. "¿Cómo se forman los huracanes y cuáles son sus categorías?" Disponible en: https://news.culturacolectiva.com/ciencia/como-se-forman-los-huracanes-cuales-son-sus-categorias/. Consultado el 19 de mayo de 2020.

Wikipedia, 2020a. "Inundaciones en China de 1931 - 1931 China floods". Disponible en: https://es.qaz.wiki/wiki/1931_China_floods. Consultado el 12 de diciembre de 2020.

Wikipedia, 2020b. "Centro Nacional de Huracanes (NHC) de Estados Unidos, Robert Bob Simpson". Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Centro_Nacional_de_Huracanes. Consultado el 19 de mayo de 2020.

World Health Organization, 1995. Coping with emergencies: WHO strategies and approaches to humanitarian action. World Health Organization.

Sección 4
Geotecnología aplicada a la vigilancia y predicción de las dinámicas de los escenarios de riesgos socionaturales

4.1. Análisis de problemáticas ambientales y fenómenos naturales perturbadores a partir de imágenes satelitales MODIS y GOES: algunas aplicaciones de LANOT (Unidad Facultad de Geografía)

Francisco Zepeda Mondragón
Yered Gybram Canchola Pantoja
Miguel Eduardo García Reyna
Cristina Estrada Velázquez
Juan Carlos Garatachía Ramírez
Martin Pánfilo Soto Romero

Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

La complejidad para el estudio de las problemáticas ambientales y fenómenos naturales requiere de un enfoque multivariable y holístico, lo cual se sustenta en la utilización de diversas metodologías y herramientas geotecnológicas para su compresión hacia un acercamiento más coherente con la realidad, donde la utilización de la percepción remota a través del análisis geoespacial satelital resulta un enfoque novedoso y de última generación para poder analizar en tiempo casi real los acontecimientos perturbadores que ponen en situación de riesgo a las poblaciones.

En este sentido, a partir de la creación del Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT), unidad Facultad de Geografía, el pasado 10 de junio del 2019. Se ha tenido como propósito desarrollar productos

estratégicos geoespaciales para contar con información actualizada en el Estado de México, así como en el resto de la república, en cuanto a las condiciones meteorológicas en tiempo real, el análisis de fenómenos hidrometeorológicos, monitoreo de recursos naturales, identificación de riesgos ambientales, así como el impulso estudios geográficos especializados, mediante la utilización de imágenes meteorológicas de satélites de GOES-16 y satélites de órbita Polar Terra y Aqua para impulsar la investigación científica ambiental y de riesgos en el territorio nacional.

En este tenor, el objetivo principal es presentar los productos derivados del análisis geoespacial en cuanto a sequias, anomalías térmicas y degradación ambiental, que permita comprender la evolución y aplicación en cuanto al uso de los sensores remotos en los trabajos de investigación realizados en esta unidad del LANOT.

Antecedentes en el estudio de problemas ambientales

En las últimas décadas, los problemas ambientales se han convertido en complejos escenarios, a partir de los cuales se postulan varias reflexiones en torno a las circunstancias que enfrenta la sociedad moderna. Los efectos negativos derivados de los desarrollos tecnológicos y de un modelo del consumo y uso de los recursos naturales han generado un panorama de insostenibilidad que pone en peligro la propia base material de la vida humana, dando con ello paso a la denominada sociedad del riesgo (Beck 1998).

En la actualidad se presenta un momento histórico donde el acelerado ritmo de la industria y la tecnificación del quehacer cotidiano ha derivado en una crisis ecológica.

Según Garrido *et al.* (2007) esta crisis se expresa en eventos tangibles, como son: el efecto invernadero, el agujero de la capa de ozono, el derrame de los combustibles fósiles, la deforestación, la sobreexplotación de los recursos hídricos, contaminación atmosférica, la lluvia ácida y la erosión, por mencionar algunos.

La crisis ecológica se manifiesta a nivel territorial, en términos de una geografía del uso tecnológico (Ramírez 2006), en una escala global, regional y local. A nivel global, algunos autores identifican problemáticas ambientales tales como la alteración del ciclo del carbono mediante emisiones de dióxido de carbono (CO2) y metano (CH4) y la modificación de la cobertura de la tierra en el planeta (Rockström *et al.,* 2009). De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), dichas problemáticas son relevantes por el crecimiento demográfico y el desarrollo económico (PNUMA 2012).

De igual manera, resulta importante poder definir que es un fenómeno natural y a partir de qué momento se convierte en un proceso perturbador. Un fenómeno natural es el resultado de "extremos" en procesos geofísicos,

el sentido de la causalidad o dirección de la explicación va del ambiente físico hacia sus impactos sociales; el enfoque dominante relega los factores sociales a una posición dependiente. La iniciativa de una calamidad está con la naturaleza, esta decide dónde y cuáles condiciones sociales o respuestas se tornan significantes. La implicación parece ser que un desastre siempre ocurre por las recurrencias fortuitas de extremos naturales, modificados en detalle, pero fortuitamente, por consecuencias humanas (Lavell, 1993).

Por lo dicho anteriormente, los fenómenos naturales son todos aquellos procesos constantes de movimientos o transformaciones que tienen lugar en la naturaleza sin la intervención humana. Pueden ser cíclicos o pueden constituir un acontecimiento extraordinario e inusitado. Los fenómenos naturales suceden independientes del factor humano o, dicho de otro modo, no son fenómenos antrópicos (Mosquera, s/f).

En este tenor, los fenómenos naturales son estudiados por las ciencias en sus aspectos físicos, químicos y biológicos. Los fenómenos físicos son aquellos que suceden por la interacción de las partículas que conforman la materia. Este tipo de fenómenos, por lo tanto, dependen de las propiedades de la materia y se presentan en los diferentes estados de esta. Mientras, los fenómenos naturales que son producto de fenómenos físicos son, por ejemplo, los movimientos de las mareas, la evaporación del agua, la erosión terrestre, el arcoíris y la aurora boreal (Mosquera, s/f).

Por su parte, los fenómenos químicos son aquellos que ocurren debido a las reacciones entre elementos. Los elementos químicos, como el oxígeno y el carbono, son las partículas más pequeñas que forman, junto con otros, todas las reacciones químicas que conocemos (Mosquera, s/f).

En cuanto a los fenómenos biológicos se puede mencionar que son aquellos que reflejan en los ciclos biológicos de los organismos vivos. Estos pueden ser internos; por ejemplo, el ciclo de vida del ser humano dividido en nacimiento, juventud adultez y vejez (Mosquera, s/f).; o externos, causado o afectado por organismos vivos, como las migraciones de aves o cuando producen frutos los árboles. También pueden producir desastres como plagas, epidemias, pandemias, marea roja, etc. Por ello, y dada la derivación de fenómenos, se han generado divisiones de los fenómenos naturales, que es una forma de entenderlas mejor (por sus cambios físicos, químicos y biológicos), pero ellas no suelen presentarse en la naturaleza de forma aislada. De esta manera, existen los estudios de fenómenos meteorológicos, por ejemplo, que abarcan fenómenos atmosféricos y ambientales (físicos, químicos y biológicos) (Mosquera, s/f).

En este caso, la lluvia es un fenómeno atmosférico porque se presentan las condiciones físicas en la atmósfera (ciclo del agua) para que llueva. También se denomina un fenómeno ambiental, ya que cambia el ambiente, mojando la tierra y haciendo que las plantas crezcan. A su vez, es un fenómeno

meteorológico cuando es relevante para la vida diaria de las personas, como pueden ser las lluvias torrenciales que provocan inundaciones. Cuando los pronósticos meteorológicos indican cambios anormales de los ciclos naturales que conocemos debido a la ciencia, y pueden afectar las casas de poblaciones, se les denomina como desastre natural. Los desastres son eventos que afectan los ciclos normales de la naturaleza. Su clasificación es idéntica al de los fenómenos naturales, de manera general, pero enfatiza en los efectos negativos que pueden provocar consecuencias devastadoras. Algunas de ellas son (Mosquera, s/f):

- Los fenómenos meteorológicos: ocurren en la atmósfera y en el ambiente, como vientos, precipitaciones (lluvias, granizadas, nevadas), tormentas eléctricas, huracanes, aquellos causados por el fenómeno del niño y muchos más.
- Los fenómenos hidrológicos: son aquellos que ocurren en el agua o las grandes masas de agua, es el caso de oleajes, tsunamis o inundaciones.
- Los fenómenos geofísicos: son aquellos que se forman o surgen desde el interior del planeta o en su superficie, estos son: avalanchas, derrumbes, deslizamientos, terremotos, erupciones, hundimientos de tierra, etc.

Estas concepciones teóricas permiten comprender el espectro de análisis de las problemáticas ambientales, donde la inclusión de los sensores remotos ayuda al entendimiento geoespacial sistemático por las capas de información espectral que de ellos se puede obtener. Esto permite desarrollar investigaciones especializadas mediante el procesamiento de sistemas de información geográfica, algoritmos y softwares especializados para el tratamiento de las bandas de información derivadas de las imágenes satelitales que han venido evolucionado en las últimas décadas.

Concepciones y tendencias

Con el transcurso del tiempo, la necesidad de explorar nuevas tierras, de conocer los recursos con los que cuenta un territorio y hasta la localización de puntos de interés, ha generado una evolución geotecnológica que va desde la captura de la primer fotografía en el mundo obtenida por ingeniero francés Nicéphore Niépce en 1826 (Maison Nicéphore Niépce, s/f), pasando por la invención del avión, llegando finalmente a las telecomunicaciones, a la aplicación de la fotogrametría aérea para la generación de mapas topográficos, hasta la primer computadora creada en 1936 por el ingeniero alemán Konrad Zuse (Jaimovich, 2019).

No puede obviarse el lanzamiento del satélite SPUTNIK en 1957 o la llegada del hombre a la luna el 20 de junio de 1969 en la misión Apolo 11 (País, 2019); o la implementación del internet, los drones y los nuevos satélites con sensores multi e hiper espectrales. Todo lo anterior ha permitido desarrollar nuevas herramientas para la obtención, procesamiento,

integración y análisis de información espacial, que sirven como insumos al estudio, modelación y tendencias de las actividades humanas y de las interacciones físicas que se presentan en un territorio.

En la actualidad, es indispensable la aplicación y la utilización de imágenes de satélite para evaluar el riesgo de desastres asociados a fenómenos perturbadores de carácter hidrológico, geológico, atmosférico y ambiental, que son recurrentes en el territorio mexicano por el contexto geográfico en el que se localiza. La percepción remota, los Sistemas de Información Geográfica y otras geotecnologías forman parte primordial como herramientas potenciadoras en el tratamiento de información geoespacial, que permite la generación de productos para la generación de estrategias de mitigación, indicadores de vulnerabilidad y perspectivas a corto, mediano y largo plazo sobre la dinámica social, ambiental, cultural y económica.

La disponibilidad de acceso a diferentes plataformas de información de carácter libre y de paga, da la posibilidad de realizar estudios con mayor resolución espacial. Por ejemplo, en el Estado de México se han realizado actualizaciones en la cobertura o uso de suelo, como son los bosques, cultivos, zonas urbanas, agua y pastizales. Este tipo de información coadyuva en el análisis del territorio, su ordenamiento y planificación. Lo anterior con la finalidad de contribuir en el desarrollo de sociedades sustentables y resilientes.

En este sentido, las imágenes de satélite han contribuido enormemente a mejorar nuestro conocimiento de distintos territorios, generando una herramienta de gran utilidad para distintas aplicaciones. Hoy en día, es posible tomar imágenes de la tierra de una gran nitidez, así como de la superficie de otros planetas. Como su nombre lo indica, estas imágenes se toman con artefactos que son enviados al espacio y que orbitan alrededor del planeta, estos toman las correspondientes fotografías y luego pueden transmitirlas al planeta Tierra (*Importancia*, 2020).

De igual manera el uso de las imágenes puede ser visto como una herramienta de gran utilidad para distintas aplicaciones. Ya sea el estudio de fenómenos meteorológicos, la elaboración de mapas fidedignos para planificación urbana, la vigilancia del medio ambiente para prevenir o monitorear desastres, entre otros.

En la actualidad, las imágenes de satélite abarcan más aspectos y los expertos en desarrollo, mencionan que las imágenes son muy importantes. Si se combinan con los datos disponibles pueden agregar información que mejore la medición sobre la pobreza en los diferentes países. Esta fue la hipótesis detrás del estudio Estimación de la pobreza local utilizando imágenes satelitales del Banco Mundial.

"Las imágenes satelitales podrían convertirse en una herramienta para ayudar a identificar dónde hay pobreza, ya que se pueden realizar acercamientos a los pueblos más pequeños y monitoreo constantes, que no son posibles con los

estudios tradicionales", explica Andrea Coppola, uno de los autores del estudio y economista del Banco Mundial (Banco Mundial, 2015).

Tal como explica Coppola, muchas veces los datos disponibles sobre la pobreza no son lo suficientemente actuales o rigurosos. De acuerdo al experto, son pocos los países que logran realizar con frecuencia encuestas de hogares. Además, los encuestadores o censistas suelen tener dificultades para acceder a los pobres, y muchas veces la calidad de esos datos no es del todo rigurosa. Por el contrario, los satélites recogen datos a un ritmo constante durante todo el año, independientemente de los peligros físicos o sociales (Ojeda, 2015).

Otro ejemplo del análisis de las imágenes de satélite en cuestiones de población, son con la ESA (Agencia Espacial Europea), que ha presentado un mapa de la Tierra elaborado con más de 180000 imágenes satelitales de alta definición, el cual permite localizar prácticamente todos los asentamientos humanos del planeta.

Este mapa, bautizado como *Global Urban Footprint* (GUF), en español Mapa del Impacto Urbano Mundial, se diferencia de otros porque no solo se muestran los centros urbanos, sino también las aldeas rurales. Esta característica permite tener una mayor comprensión de la distribución demográfica y sus implicaciones en temas relacionados con la salud (difusión de enfermedades), la ecología (presión sobre la biodiversidad) o las dinámicas poblacionales.

En este sentido, los satélites MODIS y GOES-R16 han resultado esenciales, sus instrumentos están diseñados de forma específica para la cartografía de la vegetación global. El análisis geoespacial del que es capaz ha sido fundamental para informarnos a tiempo casi real de los incendios forestales.

Uno de los más conocidos son los MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) de la NASA, se trata de un instrumento científico a bordo del satélite Terra (1999) y del satélite Aqua (2002). Otro de ellos es el VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) también de la NASA, es un sensor diseñado y fabricado por la Compañía Raytheon a bordo del *Suomi National Polar-orbiting* (Suomi NPP) y NOAA-20, y que junto con los MODIS proporcionan datos sobre los incendios forestales dentro del programa de la NASA. *Fire Information for Resource Management System*, dedicado de forma exclusiva a darnos información puntual y muy precisa en tiempo casi real (NRT) de los incendios forestales, dentro de las 3 horas posteriores al paso del satélite.

Otro de los satélites que están siendo de gran ayuda en este campo y de facturación europea, son los Sentinel del programa Copérnico, dirigido conjuntamente por la ESA y por la Unión Europea a través de la Agencia Europea del Medioambiente. Con todo lo anterior se puede observar la utilidad de imágenes de satélite, en cuestiones sociales y lo importante que es su uso en pleno siglo XXI.

Objeto del LANOT (Unidad Facultad de Geografía) y la contribución de productos geoespaciales

El Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT) tiene sus orígenes en la Ley de Ciencia y Tecnología (LCYT) que como parte de sus atribuciones considera el desarrollo del Programa denominado "Apoyos Complementarios para el Establecimiento y consolidación de Laboratorios Nacionales" del cual se aprueba la creación del proyecto denominado LANOT, con número de registro ante CONACYT: 281270.

A partir de este momento, la Universidad Autónoma del Estado de México firmó un convenio de colaboración con la Universidad Nacional Autónoma de México, donde se estipuló su participación en el consorcio LANOT a través de la Facultad de Geografía en el pasado año 2017.

El Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT) Unidad Facultad de Geografía fue instalado en enero del 2019 e inaugurado el 10 de junio de ese mismo año. Se estipularon que los principales objetivos de esta Unidad so: la generación de productos estratégicos espaciales para contar con información actualizada del país y el estado en cuanto a las condiciones meteorológicas en tiempo real, el análisis de fenómenos hidrometeorológicos, el monitoreo de recursos naturales, la identificación de riesgos ambientales, así como el impulso estudios geográficos especializados.

La principal función del LANOT es la recepción de imágenes meteorológicas de satélites de GOES-16 y satélites de órbita Polar Terra y Aqua, así como desarrollar algoritmos para dar respuesta inmediata a problemáticas ambientales y fenómenos naturales perturbadores, generar un observatorio ambiental en tiempo real vinculado a diversas instituciones, la vinculación científica para el desarrollo de proyectos internacionales con universidades convenidas con la Universidad Autónoma del Estado de México, con el propósito de integrar un sistema de alerta temprana vinculada instituciones de la entidad para la adecuada toma de decisiones. Esto es la base para el desarrollo de un visualizador y un observatorio ambiental que conjunte proyectos de investigación científica para la consulta y divulgación de información, tanto en instancias académicas, gubernamentales y privadas.

Materiales y métodos en la generación de productos geoespaciales hacia la toma de decisiones (LANOT)

El satélite GOES 16 está equipado con seis sensores que captan información de manera constante. Cada sensor tiene una finalidad, por ejemplo el equipo EXIS detecta erupciones solares que pueden afectar las comunicaciones; el sensor SUVI monitorea la actividad solar en el rango del ultravioleta que permite observar erupciones solares y filamentos solares, que permite una

detección temprana de impactos directos o cercanos al planeta Tierra; el mapeador de rayos geoestacionario (GLM, por sus siglas en inglés) es un dispositivo que captura en el canal del infrarrojo cercano la actividad de rayos, permite medir y pronosticar tormenta severas.

El sensor ABI (*Advanced Baseline Imager*) obtiene información multiespectral de una parte de la Tierra. El ser geoestacionario obtiene datos del continente americano cada cinco minutos, esto posibilita ver la casi en tiempo real la dinámica de la atmosfera. Este sensor cuenta con 16 canales que registran y mandan a la Tierra imágenes meteorológicas y de condiciones de la superficie. Por otra parte, obtiene una imagen CONUS que abarca los países de América del Norte y gran parte de Centro América cada cinco minutos, con una resolución espacial y temporal de 2 km por 2 km a nivel de píxel.

Uno de los productos que recibe el LANOT Unidad Facultad de Geografía es el de Temperatura superficial de la tierra (LST, por sus siglas en inglés), en el cual, se muestra la radiación neta en la superficie de la Tierra, lo que permite conocer el flujo de energía y la condición de esta de acuerdo con la concentración. Este producto se encuentra en grados Kelvin, en condiciones diurnas y nocturnas, lo que permite obtener esta información en cualquier momento. La única limitante es cuando se presenta nubosidad, las zonas que se encuentras cubiertas de nubes son huecos sin datos.

Otro sensor que transmite imágenes con fines meteorológicos y de baja resolución espacial (cubre mayor área) es MODIS, que se encuentra montado en los satélites Aqua, que orbita la tierra de sur a norte, y Terra, que lo hace de norte a sur. Ambos pasan por el Ecuador, pero en diferente horario.

Este instrumento multiespectral captura treinta y seis canales del espectro electromagnético en diferentes longitudes de onda. Permite comprender la dinámica de la atmosfera y el comportamiento de la superficie terrestre y los océanos. Se puede generar un mosaico de imágenes de todo el planeta en un periodo de uno a dos días. La resolución espacial varía en los diferentes canales: 250 m en los canales 1 y 2; 500 m en los canales 3 al 7) y 1000 m en los canales 8 al 36).

MODIS, genera cuarenta y cuatro productos distintos, lo que nos permite tener información de la atmosfera; esto incluye nubes, aerosoles, cobertura de nieve, temperatura superficial del mar y de la tierra, tipo de cobertura terrestre, índices de vegetación, evapotranspiración, incendios y anomalías térmicas, entre otros.

El Índice Normalizado de la Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) se obtiene del cálculo de la división del canal infrarrojo cercano (NIR) menos el canal rojo. Esto permite conocer la cantidad, calidad y la distribución de la vegetación mediante la medición de la intensidad de radiación que la vegetación de acuerdo con su estado de salud y vigorosidad refleja.

Este producto es el resultado de una adquisición que comprenden un conjunto de imágenes de una serie de tiempo de dieciséis días con una resolución

espacial de 250 m, donde, de forma automatizada y respetando los criterios de nubes bajas, ángulo de visión bajo y el valor más alto en NDVI, busca y hace una selección de los mejores píxeles en esa serie y genera una sola imagen.

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio) y FAS (Servicio Agrícola del Extranjero) comparten el resultado de un proyecto en conjunto sobre el Monitoreo Agrícola Global, denominado GLAM, que provee una base de datos con la serie temporal de índices de vegetación a nivel mundial del año 2000 a la fecha.

Estudios geoespaciales ambientales y de riesgos en el Estado de México

Desde la instalación del LANOT Unidad Facultad de Geografía se tenido la visión de generar productos especializados, enfocados al análisis de problemáticas ambientales y fenómenos perturbadores, en aras de contar con insumos cartográficos a partir del tratamiento de imágenes sensoriales para generar productos de monitoreo para la adecuada toma de decisiones. A continuación, se presenta algunas aplicaciones de estudios geoespaciales elaborados desde esta Unidad.

Monitoreo de sequía, NDVI y se relación con anomalías térmicas de la FIRMS

Uno de los proyectos desarrollados en el LANOT Unidad Facultad de Geografía consiste en el monitoreo de la sequía que se presenta en las zonas forestales del Estado de México, esto se hace mediante el cálculo del Índice de Condición de la Vegetación (VCI) de acuerdo con el siguiente algoritmo:

$$VCI = \frac{NDVI\ x, y - NDVI_{min} x, y}{NDVI_{max}\ x, y - NDVI_{min} x, y} * 100\%$$

En donde:
NDVI: es el mínimo y máximo del Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación observada durante el mismo periodo de 16 días.

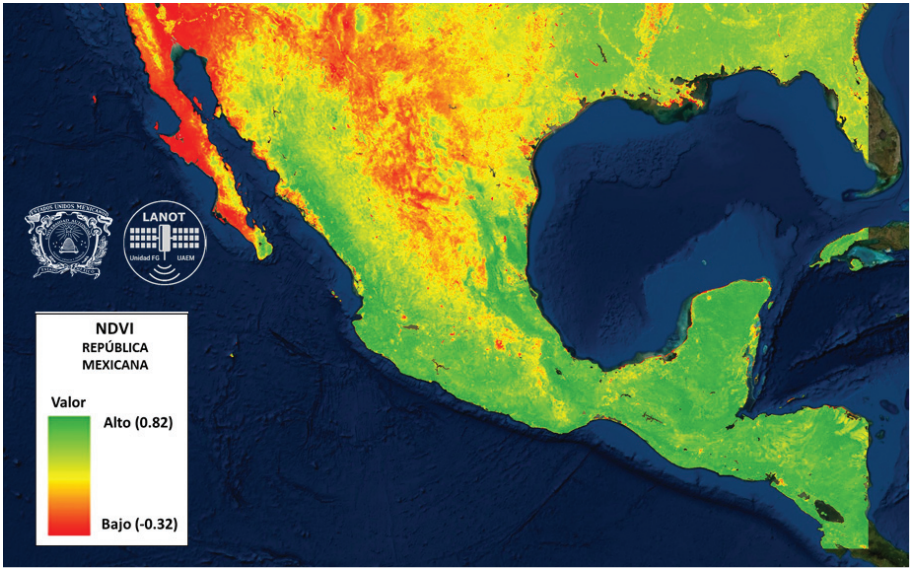
Para este proyecto se descargaron los NDVI de cada 16 días obtenidos de la GLAM, éste índice mide la respuesta espectral de la vegetación a través de la radiancia capturada por el sensor, sirve para cuantificar las condiciones del déficit o exceso de agua debido al proceso fotosintético de las plantas y se calcula a partir de la siguiente formula:
Donde:

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS}$$

NIR: es el canal de infrarrojo cercano
VIS: es canal que captura el reflejo en la región visible del rojo

A continuación, se presenta un mapa resultado del procesamiento de las bandas espectrales y la formula aplicada para el caso del territorio de la República Mexicana, donde se observan los valores de NDVI. Los que aparecen en color rojo muestran la poca existencia y calidad de la cobertura vegetal y los valores más tendientes al 1 presentan mejores condiciones vegetativas representadas en colores tendientes a verde (Figura 1):

Figura 1. Imagen NDVI de la República Mexicana



Fuente: LANOT (Unidad Facultad de Geografía de la UAEM), 2019.

Debido a que las imágenes del sensor MODIS realizan un barrido de toda la superficie, se cuenta con información de todos los usos de suelo que se presentan en la zona de estudio. Debido a lo anterior, se realizó un proceso para discriminar todo lo que no fuera cubierta forestal, utilizando información vectorial del Inventario Estatal Forestal y de Suelos, Estado de México 2014, elaborado por la CONAFOR (Comisión Nacional Forestal).

En el Cuadro 1 se muestran los resultados obtenidos del cálculo del Índice de Condición Vegetal para el mes de mayo del 2019, donde la sequía moderada es la que se presenta en mayor cobertura, pero la diferencia de superficie entre la sequía severa y extrema es mínima. La superficie forestal en el Estado de México ocupa 10653.669 km^2 de la extensión total de la entidad; de acuerdo con lo arrojado en el modelo VCI, el 38.11% de la zona forestal

que se encuentra al Suroeste de la entidad federativa (ver Imagen 1), sufrió de estrés hídrico debido al déficit de agua, lo cual, mantiene estrecha relación con la temporada de estiaje prolongada y el retraso de las lluvias. Todo esto provoca un ambiente seco en las zonas con vegetación, lo que vulnera su capacidad para resistir incendios.

Cuadro 1
Resultados del Índice de Condición Vegetal en Zonas forestales del Estado de México para mayo de 2019

Porcentaje	Nivel	Cobertura (km^2)
30% - 40%	Sequía Leve	960
20% - 30%	Sequía Moderada	1,049,423
10% - 20%	Sequía Severa	1,041,681
0% - 10%	Sequía Extrema	1,009,421

Fuente: LANOT (Unidad Facultad de Geografía de la UAEM), 2019.

En relación con datos publicados por la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), para el año 2019 la temporada de lluvias se estimó para los meses de mayo a noviembre; pero en el Estado de México presentó una baja precipitación media mensual (Cuadro 2).

Cuadro 2
Precipitación media (mm) por entidad federativa

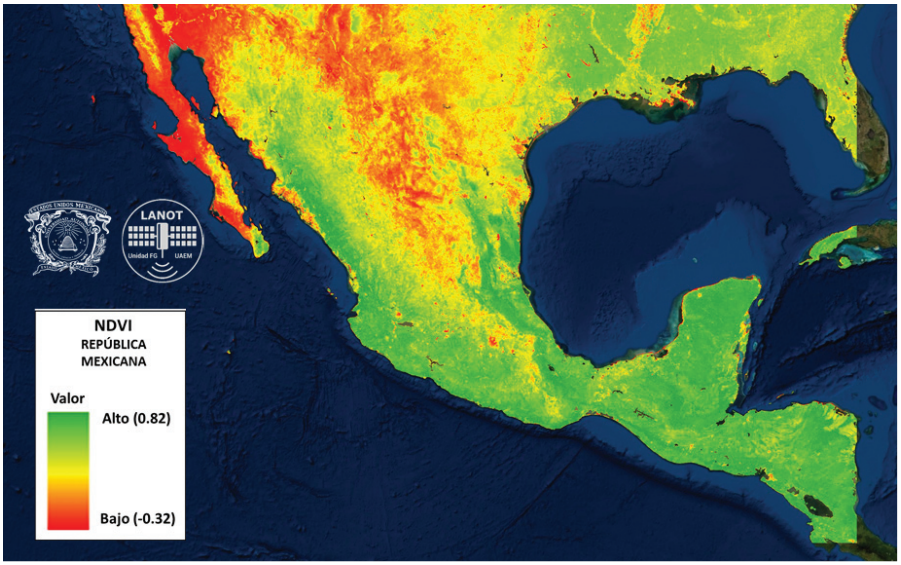
Entidad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Estado de México	4.1	5.8	6.7	7.3	33.3
Guerrero	1	0.4	0.7	0.4	44.4
Oaxaca	14.9	4.7	9.6	8.5	96.9

Fuente: CONAGUA, 2019.

Al sobreponer con los focos de calor o anomalías térmicas registradas el 13 de mayo del año 2019, como se muestra en la Figura 2, se puede apreciar la relación que se presenta en ambos fenómenos. Estas condiciones no solo se presentaron en el Estado de México, también en los estados de Guerrero,

Oaxaca, Puebla, Morelos y la CDMX; se manifestaron incendios en zonas agrícolas y forestales, provocando una densa capa de humo y mala calidad del aire (Figura 2 y 3).

Figura 2. Imagen que muestra el Índice de Condición Vegetal (VCI) en Estado de México, mayo 2019



Fuente: LANOT (Unidad Facultad de Geografía de la UAEM), 2019.

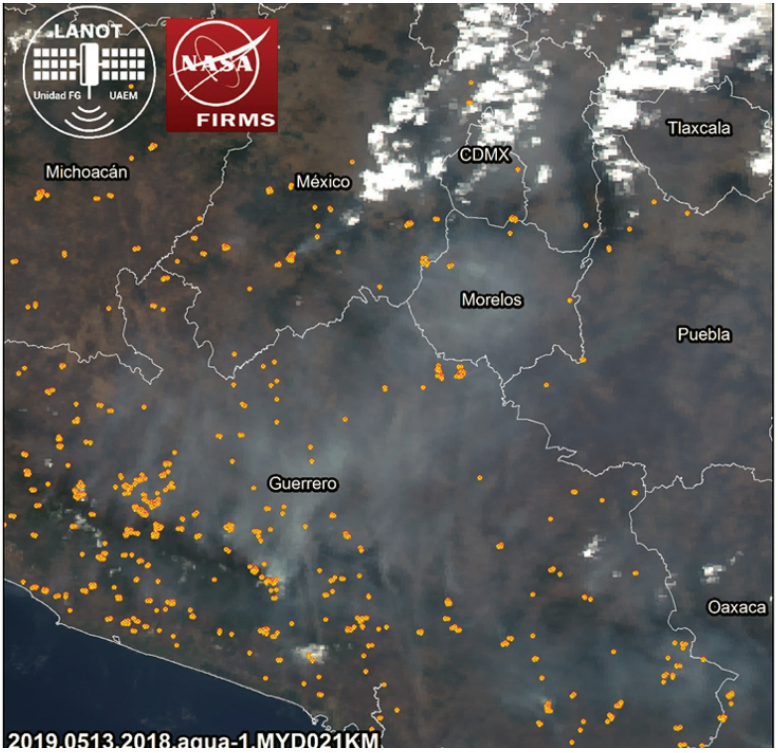
El uso de imágenes MODIS y en particular los productos generados a partir de operaciones entre canales, permite tener información en tiempo casi real, sobre la situación actual de una zona de interés. La resolución espacial con la que trabaja este sensor ayuda a interpretar los fenómenos desde una perspectiva general y amplia, debido a la gran cobertura que se tiene. Lo anterior, en combinación con otros datos, puede ayudar a generar diversos modelos predictivos y de tendencias, que siente las bases para generar y operar un sistema de alerta temprana que permita tener información actualizada ante un fenómeno perturbado de carácter meteorológico.

Islas de calor

Islas de calor es un proyecto en conjunto con LANOT Unidad Facultad de Geografía y Coordinación Estatal de Protección Civil del Estado de México. Consiste en medir la temperatura superficial de las zonas metropolitanas en la República Mexicana. La variedad de temperaturas tiene diferentes motivos, algunos de estos están relacionados con la densidad de construcción en las

ciudades, el material con el cual lo están, la extensión del suelo de concreto y la disminución de áreas verdes y cuerpos de agua, lo que facilita que la radiación solar y dificultad de la dispersión del calor por la noche.

Figura 3. Imagen de satélite AQUA del sensor MODIS y Anomalías Térmicas del 20 de mayo del 2019



Fuente: LANOT (Unidad Facultad de Geografía de la UAEM), 2019 y FIRMS (https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/).

Este fenómeno es monitoreado diariamente, en cuatro diferentes horarios, debido a que las islas no se presentan durante todo el día y dependen de condiciones meteorológicas como cielos despejados, viento, la oscilación térmica y os gases contaminantes que se convierten en una barrera que evita que se disipe el calor.

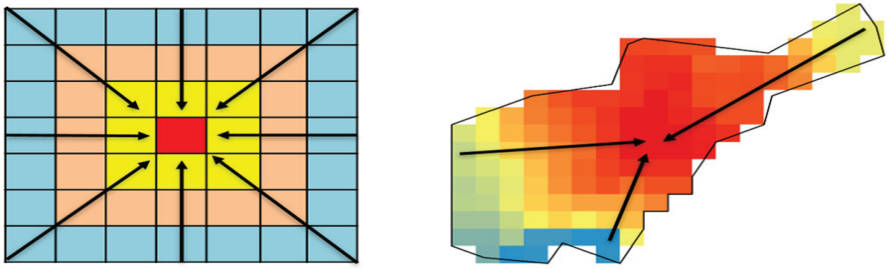
En este proyecto, LANOT evalúa las horas en donde hay presencia de radiación solar en zonas metropolitanas urbanas, que va desde las 6 de la mañana a las 6 de la tarde. Para realizar el monitoreo del efecto islas de calor urbanas, se utilizan imágenes del GOES 16, pues permite monitorear la misma

porción de la tierra mediante la obtención de una imagen de Land Surface Temperature cada 10 minutos.

El tratamiento de estas imágenes para la obtención de las islas de calor urbanas consiste en descargar imágenes en intervalos de 3 horas, a las cuales se les aplican el siguiente procesamiento:

- Primero se obtiene la imagen LST promedio para el periodo de tiempo, mediante la aplicación de la media aritmética de todas las imágenes. A continuación, se realiza una selección por atributos de los valores mayores a cero, lo anterior para utilizar los valores positivos de temperatura.
- El siguiente paso es convertir los valores de la imagen en números negativos por lo cual se multiplica por -1. Con esto se busca que al generar las direcciones de flujo estás vayan de los valores más bajos a los más altos como se muestra en la Figura 4.
- Una vez que se tienen los flujos, se realiza la delimitación de las cuencas de temperatura, el resultado son conjunto de polígonos que muestran el límite espacial de la concentración de las temperaturas.

Figura 4. Modelo de dirección de flujo



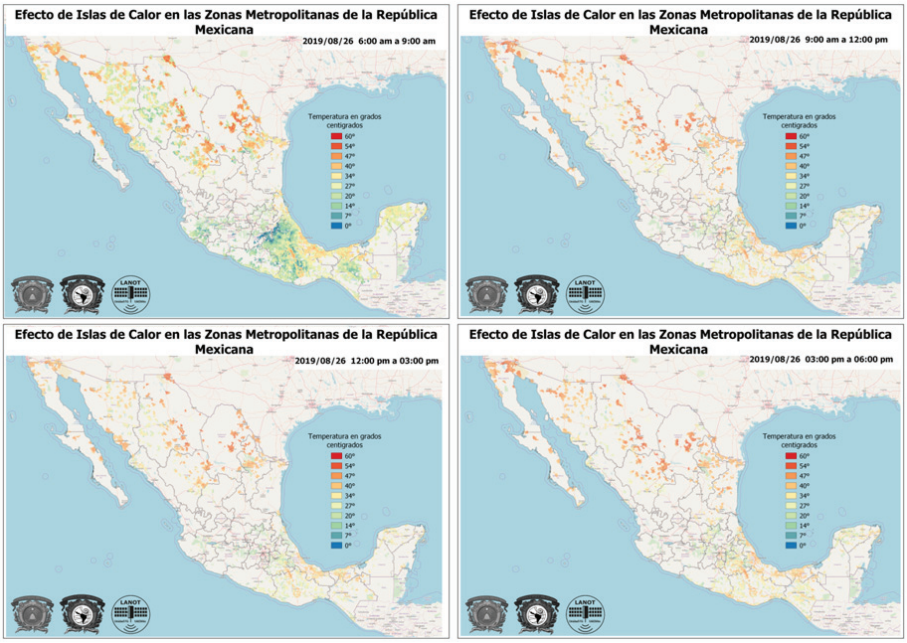
Fuente: LANOT (Unidad Facultad de Geografía de la UAEM), 2019.

Derivado de la aplicación de esta metodología se están realizando estudios que se enfocan a zonas metropolitanas urbanas, donde se realiza una selección de los polígonos de cuencas que interceptan y se extraen los valores de la imagen LST media en las principales 58 ciudades metropolitanas del país para dar seguimiento al comportamiento lo largo del día. Esto se realiza en los siguientes horarios: de 06:00 a 09:00; de 09:00 a 12:00; de 12:00 a 15:00 y de 15:00 a 18:00 horas (Figura 5).

Los aportes de este producto hacen se enfocan en identificar el comportamiento del efecto de las concentraciones de temperaturas altas y su grado de incidencia para poder determinar cuáles poblaciones urbanas son

vulnerables ante este efecto. Por otra parte, se convierte en un referente para los tomadores de decisiones en cuanto en la generación de propuestas de mitigación.

Figura 5. Efectos de islas de calor en las zonas metropolitanas urbanas de la República Mexicana



Fuente: LANOT (Unidad Facultad de Geografía de la UAEM), 2019.

Conclusiones

La evolución de las geotecnologías ha permitido tener acceso al entendimiento de los problemas ambientales y fenómenos perturbadores en tiempo casi real. Esto ayuda a comprender la dinámica presente con miras a un alertamiento temprano que, en conjunción con las instancias gubernamentales tomadoras de decisiones, contribuye a reducir el riesgo de desastres.

Se reconoce que el uso actual de las geotecnologías para el estudio del ambiente, así como para los análisis de peligros y vulnerabilidad asociados a fenómenos perturbadores, es esencial para la generación de diagnósticos y la propuesta de escenarios de riesgo de desastre. En este sentido, el uso de sensores remotos y las consecuentes imágenes satelitales de última generación como las que provee el satélite GOES 16, han demostrado ser un insumo de gran valor ya que dan soporte a la toma de decisiones en materia de gestión de riesgos.

Por lo anterior, los productos generados del Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT) Unidad Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, se han generado para generar información que dé soporte a la toma de decisiones en materia de problemáticas ambientales y de riesgo, tanto a nivel estatal como nacional. Asimismo, el laboratorio busca, en conjunto con otras instancias, fomentar una cultura de Gestión Integral del Riesgo y Protección Civil entre actores gubernamentales, privados y sociales.

En otro orden de ideas, es importante mencionar que la generación de la información geoespacial se sustenta en el tratamiento de imágenes satelitales con base en la interpretación cuantitativa y cualitativa de datos que evidencian el estado actual de las condiciones ambientales y el entendimiento de los fenómenos perturbadores, donde la calibración de los productos es esencial.

Actualmente también se emplean datos de sensores remotos de acceso abierto en conjunción con la utilización de plataformas privadas que posibilitan trabajar a diferentes escalas y resoluciones espaciales para comprender de manera más práctica la dinámica territorial.

Por último, la visión a largo plazo de esta Unidad del LANOT es continuar con la generación de una gama de productos en los diferentes tópicos ambientales, basados en algoritmos específicos, para dar respuesta inmediata a problemáticas geoecológicas y fenómenos naturales perturbadores plasmados en un observatorio ambiental en tiempo real, vinculado a instancias gubernamentales y científicas, para el desarrollo de proyectos internacionales, aunado a la generación de material didáctico enfocado a fortalecer la enseñanza de las geociencias a niveles básico, medio superior y superior, posicionando así al laboratorio como un referente de consulta a nivel nacional.

Bibliografía

Ariza, D., Duran, J.A., 2011. *Historia de la teledetección*. Universidad de la Paz.

Banco Mundial, 2015. "Así se ve la pobreza desde un satélite". Disponible en: https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2015/09/08/asi-se-ve-la-pobreza-desde-un-satelite. Consultado el 9 de diciembre de 2020.

Beck U., 1998. *La sociedad del riesgo: hacia una nueva modernidad*. Paidós, Barcelona, España, 304 pp.

Canuta, N., 1995. *Cuadernos de Geografía. La percepción remota y el análisis del espacio geográfico*.

Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales Organización de Estados Americanos, 1993. "Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado" "Capitulo 4". *Percepción remota en la evaluación de peligros naturales*. Washington, D.C

Garrido F., González de Molina M., Serrano J. y Solana J., 2007. *El paradigma ecológico en las ciencias sociales*. Icaria Editorial, Barcelona, España.

Lavell, Allan, 1993. "Ciencias sociales y desastres naturales en América Latina: un encuentro inconcluso", en Andrew Maskrey, *Los desastres no son naturales*, Colombia, La Red, ITDG, Tercer Mundo Editores.

Importancia, 2020. Importancia de las Imágenes de Satélite. Importancia. Una guía de ayuda. Disponible en: https://www.importancia.org/imagenes-de-satelite.php. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

Jaimovich, Desirée, 2019. "Cuál fue la primera computadora de la historia". Disponible en: https://www.infobae.com/america/tecno/2019/10/14/cual-fue-la-primera-computadora-de-la-historia/#:~:text=La%20Z1%20est%C3%A1%20considerada%20como,le%C3%ADa%20instrucciones%20de%20cintas%20perforadas. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

Maison Nicéphore Niépce, s/f, "Niépce y la invención de la Fotografía". Disponible en: https://photo-museum.org/es/niepce-invencion-photografia/. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

Mas, Jean- François, 2011. *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. Disponible en: http://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/aplicacionesMODIS.pdf.

Mendoza Mejía, Jesús Baruch, & Orozco Hernández, María Estela, 2014. *Análisis de la vulnerabilidad biofísica a los riesgos por inundación en la zona metropolitana de Toluca, México*.

Mosquera Moreno, Heiler, s/f. "La física al alcance de todos". Disponible en: http://elmundodelafisicaalalcancedetodo.weebly.com/fenoacutemenos-naturales.html. /. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

NASA, 2020. "MOD13A2 v006", "MODIS Vegetation Index Products (NDVI and EVI)", "VI Time Series Database from the Global Agriculture Monitoring (GLAM) Project" y "GLAM—Global Agricultural Monitoring". Disponible en: https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v006/; https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod13.php; y http://pekko.geog.umd.edu/usda/beta/; y https://ipad.fas.usda.gov/glam.htm

Ojeda, María Victoria, 2015. **"**Así se ve la pobreza desde un satélite**"**. *El País*. Disponible en: https://elpais.com/internacional/2015/09/06/actualidad/1441490939_710866.html. Consultado el 9 de diciembre de 2020.

País, Ana, 2019. "Llegada del Apolo 11 a la Luna: los 13 minutos en los que toda la misión estuvo a punto de fracasar". *BBC News Mundo*. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias-48882605. Consultado el 7 de diciembre de 2020.

PNUMA, 2012. "GEO 5. Perspectivas del medio ambiente mundial". *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*, San José de Costa Rica, Costa Rica, 528 pp.

Probosque, 2014. *Inventario Estatal Forestal y de Suelos*. Disponible en: http://probosque.edomex.gob.mx/sites/probosque.edomex.gob.mx/files/files/inventarioFtal/inventarioEstatalFtalSuelosEdoMex2014.pdf.

Ramírez O., 2006. "Reflexiones sobre el monocultivo de soya transgénica en Argentina: Una aproximación desde la geografía del azar tecnológico". *Revista Gestión y Ambiente* 9, 81-90.

Rivera, R.; Vargas, E.; Terrazas, S.; Gavi, F., 2003. *Utilización de imágenes de satélite para determinar áreas con problemas de lixiviación de nitratos*.

Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin S., Lambin E., Lenton T., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber H., Nykvist B., De Wit C., Hughes T., Van Der Leeuw S., Rodhe H., Sörlin S., Snyder P., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell R., Fabry V., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P. y Foley J., 2009. "A safe operating space for humanity". *Nature* 461, 472-475.

UNESCO, 2020. "¿Cómo se calcula el vci?" disponible en: https://www.climatedatalibrary.cl/maproom/monitoring/ndvi/vci.html#tabs-2.

4.2. El Sistema de Alerta Temprana de Tabasco (construcción a la Fase 1 del módulo hidrometeorológico). Estado de Tabasco

Jorge Mier
Terán Suarez
Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco

Introducción

Los sistemas de alerta temprana (SAT) son dispositivos complejos que avisan con antelación acerca de la eventualidad de un suceso, natural o humano, que, en interacción con la vulnerabilidad, puede causar un desastre (Ocharán, 2007).

Un sistema de alerta temprana consiste en la transmisión rápida de datos que active mecanismos de alarma en una población, previamente organizada y capacitada, para reaccionar de manera temprana y oportuna. El suministro de información se realiza por medio de las instituciones encargadas, lo que permite a las personas expuestas a la amenaza tomar acciones para reducir el riesgo y prepararse para una respuesta efectiva (OEA, 2010).

De acuerdo con la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD), cuyo objetivo primordial es la reducción del número de muertos y heridos que causan los desastres provocados por fenómenos naturales, un sistema de alerta temprana necesariamente comprende cinco elementos fundamentales: conocimiento del riesgo; seguimiento o monitoreo de la amenaza; análisis y pronóstico de las amenazas; comunicación o difusión de las alertas y los avisos; y capacidades locales para responder frente a la alerta recibida. Una debilidad en cualquiera de estos elementos da por resultado que falle todo el sistema.

Es imperioso para el buen funcionamiento de los SAT que, sin importar de cual tipo se trate, exista una participación de las comunidades en la operación de estos, desde la identificación y evaluación del riesgo, el diseño del SAT, el monitoreo de los indicadores, la colecta de datos, hasta la comunicación de la alerta y la respuesta.

Tabasco es una entidad federativa con una alta probabilidad de ocurrencia de emergencias porque conviven múltiples amenazas. Destacan

las hidrometeorológicas, las químico-tecnológicas y las ambientales. Estas, combinadas con los niveles de vulnerabilidad existentes, agravan cualquier situación de desastre debido a la alta exposición de los asentamientos humanos presentes en el territorio. Los riesgos naturales y antropogénicos identificados en la geografía estatal, como son las inundaciones, lluvias, deslizamiento de laderas, sequías, derrames de hidrocarburos e incendios, entre otros, representan el espacio propicio para apoyar la implementación de medidas preventivas y de protección civil.

De los fenómenos perturbadores mencionados con anterioridad, los que mayor peligro representan para el territorio son, sin duda alguna, los hidrometeorológicos. Para comprender esto se necesita entender el contexto hidrometeorológico del estado, el cual está dominado por un complejo sistema de planicies de inundación de naturaleza transfronteriza, y con una geografía y orografía que complican aún más el análisis de estos fenómenos perturbadores. Grosso modo, la mayor parte del territorio tabasqueño es una llanura de inundación, compuesta por un sinfín de cuerpos de agua: lagos, canales intermitentes, vasos de inundación y, por supuesto, ríos. El estado posee un promedio de precipitaciones anual de 2,550 mm, lo que favorece la ocurrencia de eventos de inundaciones fluviales o desbordamientos de ríos, así como encharcamientos provocados por lluvias extremas y erosión fluvial. Sin embargo, río arriba, en la zona serrana, el paradigma cambia, y a los ríos se les atribuye la característica de "respuesta rápida" pues pueden subir varios metros en cuestión de horas y volver a bajar su nivel con la misma velocidad, además, las lluvias pueden detonar otro tipo de eventos como deslaves, desprendimiento de rocas, formación de vados en carreteras, entre otros. Aún se dejan de lado otros factores que se retomarán más adelante, pero esto es suficiente para concebir un primer acercamiento sobre los escenarios variados que la población afronta y la importancia que un sistema de alertamiento temprano significaría en este contexto (Figura 1).

El estado de Tabasco está integrado por 17 municipios que son: Balancán, Cárdenas, Centla, Centro, Comalcalco, Cunduacán, Emiliano Zapata, Huimanguillo, Jalapa, Jalpa de Méndez, Jonuta, Macuspana, Nacajuca, Paraíso, Tacotalpa, Teapa y Tenosique. Su territorio comprende desde la llanura costera del Golfo de México hasta las sierras del norte de Chiapas, ubicándose geográficamente en las latitudes 18°39´ al norte y 17°15´ al sur y en la longitud -91°00´ al este y -94°07´ al oeste. Básicamente, Tabasco se encuentra dividido por las Regiones Grijalva y Usumacinta, las cuales se subdividen en 5 regiones que son Centro, Chontalpa, Sierra, Ríos y Pantanos.

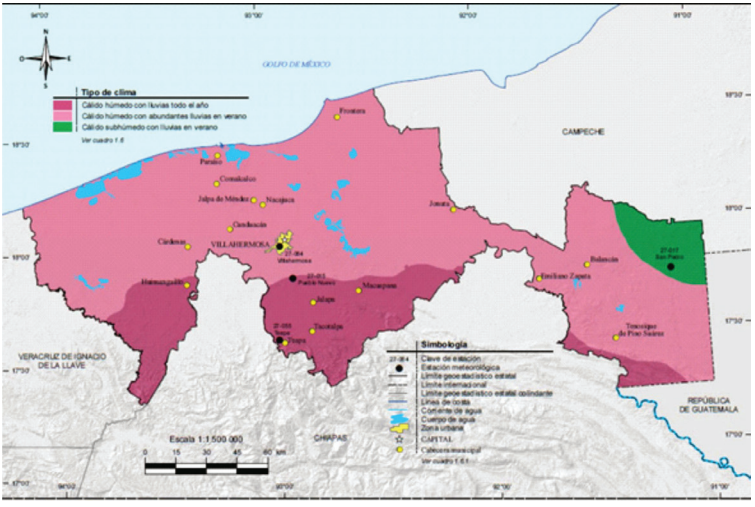
El 95.5% de la superficie del estado presenta clima cálido húmedo, el restante 4.5% es clima cálido subhúmedo hacia la parte este del estado. La temperatura media anual en la entidad es de 27° C, la temperatura máxima promedio es de 36° C y se presenta en el mes de mayo, la temperatura mínima promedio es de 18.5 °C durante

el mes de enero. La precipitación media estatal es de 2550 mm anuales, las lluvias se presentan todo el año, siendo más abundantes en los meses de junio a octubre.

Figura 1. Contexto hidrometeorológico de Tabasco

Fuente: INEGI. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Hidrológica de Aguas Superficiales. Escala 1:250000, serie I; INEGI-CONAGUA, 2007. Mapa de Red Hidrográfica Digital de México. Escala 1:250000; e INEGI. Información Topográfica Digital. Escala 1:250000.

Figura 2. Tipo de clima



Fuente: INEGI. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Hidrológica de Aguas Superficiales. Escala 1:250000, serie I.

El balance hídrico climático indica que el estado de Tabasco tiene regiones con excesos de agua todo el año, déficit bajo, déficit moderado y déficit alto, como son: Oxolotán, Tenosique, Vicente Guerrero y Poblado C29. Para las otras regiones se identifica un período seco y otro húmedo; cuyas duraciones difieren para cada región. Con los resultados obtenidos del balance hídrico, se generaron mapas estatales de distribución de las principales variables climáticas, los mayores excesos se registran al sur del Estado, principalmente hacia las montañas del norte de Chiapas, donde se ubican Dos Patrias, Puyacatengo, Kilómetro 262, Oxolotán, Tapijulapa y Teapa. En relación con los déficits, los valores más altos se presentan al centro, norte y noreste del Estado.

Dada las extensas zonas de planicie, es común que se tengan masas de aire entrantes del mar, lo que genera el mayor aporte de la precipitación alcanzando valores máximos en la zona intercontinental con lluvia promedio de 4000 mm. Estas lluvias tienen lugar en el verano y principios de otoño con variaciones promedio de 40 mm en la costa y de 100 mm en las laderas de las sierras. De octubre a marzo tienen lugar frentes fríos (FF) originados por Vientos Norte, los cuales aportan lluvia por lo general de baja intensidad (INEGI, 2000).

Por su ubicación geográfica, el Estado de Tabasco es afectado tanto por sistemas polares como por sistemas tropicales, es decir, por frentes fríos y ondas tropicales, principalmente. De octubre a marzo tienen lugar frentes fríos originados por masas de aire polar procedentes del norte, los cuales aportan lluvia de forma constante, pero por lo general de baja intensidad (INEGI, 2000); en cuanto a los sistemas tropicales, su período de ocurrencia suele ser junio a noviembre, siendo muy frecuentes el efecto de las ondas tropicales (e incluso de la zona de convergencia intertropical), y de forma bastante menos frecuente la presencia de tormentas tropicales o huracanes.

Los frentes fríos describen el límite entre dos masas de aire con diferente temperatura y/o contenido de vapor de agua. La masa de aire frío al ser más denso empuja por debajo a la masa de aire caliente, obligando a este aire cálido a elevarse. Si existe suficiente humedad en la atmósfera, la nubosidad y la posibilidad de tormentas eléctricas podrían desarrollarse. Los frentes fríos suelen acompañarse con zonas de baja presión, donde los vientos soplan en sentido contrario a las manecillas del reloj alrededor del área de baja presión en el hemisferio norte. Derivado de lo anterior, la dirección del viento antes del paso del frente frío por lo general es del sur o suroeste, con temperaturas cálidas. Después del paso del frente frío, los vientos cambian de dirección al oeste o noroeste y la temperatura del aire tiende a decaer.

El seguimiento diario de frentes fríos que ingresan al territorio Nacional inicia en septiembre y continúa hasta el mes de mayo del siguiente año. Este reconocimiento tiene como fin registrar el número de sistemas frontales que tuvieron impacto a escala mensual sobre el país, además de mostrar el pronóstico de FF por mes durante toda la temporada. La perspectiva de

FF toma como base el Método de Años Análogos, las fases de osciladores durante el invierno, así como las perspectivas de temperaturas mínimas y heladas emitidas para esa estación. Típicamente, la perspectiva en su versión preliminar es emitida en el mes de septiembre, posteriormente se realiza una segunda edición en noviembre, donde formalmente se da a conocer el pronóstico para la temporada, el pronóstico puede incluir modificaciones de acuerdo con las condiciones atmosféricas y oceánicas recientes. Finalmente, en enero se hace una tercera revisión.

Por su parte, el ciclón tropical es un sistema giratorio, organizado por nubes y tormentas. se origina sobre aguas tropicales o subtropicales y tiene un centro de circulación cerrado en los niveles bajos de la atmósfera. Los ciclones tropicales rotan en contra de las manecillas del reloj en el hemisferio norte. Estos son clasificados como:

- Depresión Tropical — Un ciclón tropical con vientos máximos sostenidos de 38 mph (33 nudos) o menos.
- Tormenta Tropical — Un ciclón tropical con vientos máximos sostenidos de 39 a 73 mph (34 a 63 nudos).
- Huracán — Un ciclón tropical con vientos máximos sostenidos de 74 mph (64 nudos) o más fuertes. En el Pacifico Noroeste, los huracanes son llamados tifones; tormentas similares en el Océano Indico son llamadas ciclones.
- Huracán Intenso — Un ciclón tropical con vientos máximos sostenidos de 111 mph (96 nudos) o más fuertes, correspondiendo a las Categorías 3, 4 o 5 en la Escala de Vientos de Huracán de Saffir-Simpson.

Los ciclones tropicales son unos de los fenómenos más poderosos y destructivos en la naturaleza. Aún aquellas áreas que se encuentran apartadas de la costa pueden estar amenazadas por vientos destructivos, tornados e inundaciones, derivado de estas tormentas.

Pese a que los huracanes son la mayor amenaza a la vida y la propiedad, las tormentas tropicales y depresiones también pueden ser devastadoras. Las inundaciones por lluvias torrenciales y el tiempo severo pueden causar daños extensos y pérdida de vidas humanas.

En los períodos de transición, cuando interactúan los sistemas polares y los tropicales, suelen presentarse choques de masas de características distintas, lo que se traduce en eventos peligrosos: lluvias extremas, inundaciones e incluso deslizamiento de laderas. A las lluvias constantes ocasionadas por los FF, que pueden durar varios días, se les suman los eventos tropicales que pueden derivar en lluvias localizadas, pero de muy alta intensidad.

En la zona costera donde se forma el delta de Tabasco, ubicado en el puerto de Frontera, cabecera del municipio de Centla (el cual se encuentra rodeado de terrenos bajos y pantanosos), los eventos norte ocasionan que el agua de las mareas ingrese tierra adentro, generando inundaciones (GET 2008).

Existe un período de pocas precipitaciones, entre mediados de marzo y mayo. Este período se ha extendido en los últimos años, afectando a la entidad con periodos prolongados de sequía, causando problemas sociales y económicos en las zonas bajas, que tienen mayor déficit de humedad. Durante esta época, el nivel de tirante de los ríos se ve seriamente disminuido; la extracción de agua para que, una vez potabilizada, se suministre a la población se complica por el azolve de los ríos y acumulación de ramaje y basura en sus bajos cauces.

El nivel freático en casi toda la región es somero, lo que da lugar a la presencia de lagos y lagunas con profundidades variadas; las más profundas contienen lentes o capas de arcilla que le confieren condiciones de semi confinamiento al acuífero (INEGI, 2000). No obstante la importancia del acuífero, la principal fuente de agua en el estado es la de origen superficial, presentando una red hidrográfica muy compleja, con abundancia de escurrimientos relacionados con fenómenos de carácter geológico, climático y biológico que están en constante interacción.

Así, Tabasco se divide en dos regiones hidrológicas, la 29 o Coatzacoalcos y la 30 o Grijalva-Usumacinta, definidas por los principales ríos que las forman. La RH29 se divide a su vez en siete subcuencas, de las cuales la del río Tonalá y las lagunas del Carmen y Machona son las que influyen en Tabasco, con aproximadamente 24.8% de extensión territorial. La corriente principal es el río Tonalá, el cual tiene su origen en la sierra chiapaneca a 1000 m s. n. m., donde recibe el nombre de Tancochapa, y desemboca en el Golfo de México. Este río es la frontera con el estado de Veracruz y tiene una longitud de 150 km, de los cuales 120 están por abajo de los 200 m s. n. m. Sus principales afluentes son los ríos Zanapa, Blasillo y Chicozapote antiguas derivaciones del Mezcalapa, hoy desagües pluviales y de zonas pantanosas. En su origen, la cuenca presenta un drenaje dendrítico debido a la presencia de material litológico homogéneo. Sin embargo, en la región norte se tiene una red de drenaje radial centrípeto con material detrítico tipo palustre y aluvial (INEGI, 2000) favorecido por la entrada de la marea a tierra, dando lugar a la formación de dunas, barras y esteros en la costa. Estos últimos son alimentadas por los escurrimientos de los ríos Santana, Naranjeño y su afluente el San Felipe. La calidad del agua es mala debido a las descargas municipales y al aporte de la actividad petrolera (GTE, 2008; Maza, 1997). La RH30 comprende el 75.2% de la superficie del estado y se subdivide en tres cuencas: Río Usumacinta (29.2%), Laguna de Términos (4.5%) y Río Grijalva-Villahermosa (41.5%).

La cuenca Laguna de Términos es la que menor área del estado ocupa, con tan solo 4.5% de la superficie total, y se divide en las subcuencas Lagunas del Pom y Atasta, Río Chumpán, y Varias (zonas de inundación y escaso escurrimiento al inicio de las corrientes San Joaquín y El Pimiental).

El río Usumacinta se considera un río maduro debido al equilibrio que presenta entre la pendiente y la deposición de material, otros ríos principales incluyen el Santa Ana, Palizada, San Pedro, El Lagartero, Pimiental, Tepetitlán y Tacotalpa. Se debe considerar que, debido a la baja altitud de las planicies, las corrientes divagantes menores pasan a ser tributarias del sistema Grijalva-Usumacinta al no estar interconectadas directamente (INEGI, 2000). El río San Pedro presentaba para el siglo pasado un caudal promedio de 2304.45 mm^3/año, mientras que el río Usumacinta de 56113.74 mm^3/año (estación hidrométrica Boca del Cerro). El volumen de escurrimiento se consideró de 7,021.83 mm^3 al año como resultado de escurrimientos variados debido a la densidad de la vegetación y a la permeabilidad de la zona; 10% a 20% de escurrimiento en el oriente y sur de Tenosique de Pino Suárez debido a una media cobertura vegetal y media permeabilidad, de 20% a 30% en el centro y noroeste de la cuenca y alrededor de Tenosique de Pino Suárez; y mayor de 30% con una baja cobertura vegetal y baja permeabilidad al noroeste - sureste al centro de la cuenca misma (INEGI, 2000).

La cuenca río Grijalva-Villahermosa, que es la de mayor extensión territorial (41%), y donde todos sus ríos drenan hacia el Golfo de México con altos porcentajes de escurrimiento (20% o mayor debido a permeabilidad media con escasa vegetación o permeabilidad baja con densa vegetación), se divide en las subcuencas formadas por los ríos: Grijalva, Viejo Mezcalapa, Mezcalapa, Paredón, Pichucalco, De la Sierra, Tacotalpa, Almendro, Puxcatán, Macuspana, Tulijá, Chilapa, Chilapilla, Tabasquillo, Carrizal, Samaria, Cunduacán y Caxcuchapa.

El río Grijalva con origen en Chiapas cambia su nombre a Mezcalapa después de la presa Malpaso (Nezahualcóyotl), al norte de Chiapas, hasta la ciudad de Villahermosa para posteriormente retomar otra vez el nombre de río Grijalva. El Mezcalapa tuvo sus primeras salidas al mar por las Barras de Tonalá (ríos Coatajapan-Zanapa, Blasillo y Chicozpote), Santa Ana (ríos San Felipe y Santa Ana), y Tupilco (ríos Tortuguero, Tular y Cocohital y Dos Bocas) (GTE, 2008).

El Mezcalapa, aguas arriba de la presa Peñitas, recibe aportaciones del río Tzimbac y del río Sayula; mientras que aguas abajo, el río Platanar es el de mayor aporte, junto con el río Camoapa que tiene su origen cerca de Pichucalco. El río Grijalva entra a Tabasco como corriente de llanura aluvial, por lo que tiende a divagar y a dividirse. Una de estas ramificaciones es el Río Seco, que desembocaba en la laguna de Mecoacán. En 1881, tuvo lugar una rotura del río Mezcalapa que dio forma al río Carrizal, el cual desemboca en la Barra de Chiltepec con el nombre de río González. En 1932, el río Mezcalapa sufre otra bifurcación originando a su margen izquierda el río Samaria, el cual descarga en el río Cañas y, a su vez, este lo hace en el río González para desembocar en la Barra de Chiltepec. Durante la bifurcación, el Samaria derramó sus aguas por la

margen izquierda e inundó lo que se conoce como la Olla de La Chontalpa, zona de gran importancia agrícola. La ramificación en la margen derecha se dividió en dos corrientes: la del norte que recibió el nombre de Nuevo o Carrizal y la del sur, río Viejo o Mezcalapa, los cuales bordean la ciudad de Villahermosa y unen aguas debajo de esta (INEGI, 2000 y Maza, 1997).

Posteriormente, sobre la margen izquierda se tienen los efluentes Cunduacán y Cedro que dan lugar a lagunas y pantanos, y sobre la margen derecha tiene al río Pichucalco como principal afluente. Otro es el río La Sierra, el cual recibe varios nombres desde su origen en Chiapas, uno de ellos el de Tacotalpa; a 23 km aguas arriba de la desembocadura del río Grijalva, este recibe el aporte del río Teapa, el cual por su margen derecha tiene la afluencia del río Puyacatengo. Antes de la confluencia con el río Usumacinta, 20 km aguas arriba, el Grijalva recibe el afluente del río Chilapa, el cual presenta un recorrido complejo desde su origen. Posterior a la unión con el río Usumacinta, el Grijalva da lugar a la formación de desembocaduras de carácter deltaico, con la bifurcación de sus escurrimientos en varios canales antes de llegar al mar. Cabe destacar que esta generación de canales es el sustento de marismas y zonas palustres (INEGI, 2000 y Maza, 1997).

Antes de seguir adelante en el desarrollo del sistema, hay algunos conceptos indispensables que deben ser mencionados para poder usarlos con claridad ya que suelen utilizarse como sinónimos erróneamente.

Conceptos básicos y definiciones

Riesgo

Lavell (2003) propone que el "riesgo", es la probabilidad de daños y pérdidas en el futuro, antecede al desastre y lo anuncia. A su vez, el desastre es la concreción de un riesgo, una realización de determinados niveles de riesgo en la sociedad, en que el evento físico sirve de detonador, pero no es la causa única que le da origen. Los enfoques holísticos tienen otra visión del riesgo; plantean los escenarios de riesgo: permiten distinguir las relaciones dinámicas entre el peligro y la vulnerabilidad en el que se incluyen la exposición al daño, perspectivas de daños adversos y condiciones que contribuyen a potenciar el daño. El CENAPRED precisa que el riesgo de desastre: existe cuando hay una probabilidad de que un fenómeno o suceso se vuelva una amenaza y que esta evolucione para que potencialmente afecte a una población, la cual, a su vez, ha construido socialmente vulnerabilidades (acumuladas y diferenciales), que la exponen a esa amenaza específica. La población posee ciertas capacidades específicas para enfrentar y reponerse de dicho impacto (resiliencia) a través de estrategias adaptativas (CENAPRED 2001). Si esas capacidades no están desarrolladas, entonces hay un factor más de vulnerabilidad ante un riesgo de desastre.

Desastre

Kreps (1995) lo define como un evento concentrado en tiempo y espacio, en donde una sociedad o alguna de sus subdivisiones experimentan un daño físico o quebranto social tal, que son deterioradas todas o algunas de las funciones esenciales de la sociedad. En el marco institucional, el CENAPRED postula que el desastre es un evento destructivo que afecta significativamente a la población, en su vida o en sus fuentes de sustento y funcionamiento (CENAPRED 2001).

Peligro

El sistema meteorológico nacional define el concepto de peligro como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino en un lapso determinado. El potencial de peligro se mide con su intensidad y periodo de retorno. El peligro, según Smith (1992), es el resultado de los conflictos de los procesos geofísicos con la gente. De acuerdo con el CENAPRED, se trata de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino, de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado, e involucra medir el fenómeno (magnitud, intensidad, periodo de retorno, tasa de excedencia) (CENAPRED, 2004). Las Naciones Unidas (1984) conceptualizaron peligro o amenaza como la probabilidad de que se produzca, dentro de un periodo determinado y dentro de una zona determinada, un fenómeno natural potencialmente dañino. Es el potencial de existencia u ocurrencia de un suceso severo, cuya evaluación requiere un pronóstico de corto plazo a través de la interpretación de señales y en el mediano plazo un análisis probabilístico de los indicadores de ocurrencia. En el largo plazo, la amenaza se evalúa mediante el estudio del comportamiento físico de la fuente generadora (fenómeno o peligro), en un periodo y territorio especifico, se utiliza información de eventos del pasado. También pueden hacerse modelos de impacto de posibles amenazas con base en la determinación del suceso máximo probable durante un periodo de tiempo en una zona afectable de aquellos sistemas urbanos involucrados (CENAPRED 2001).

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad, para las instituciones gubernamentales, puede tratarse de condiciones de inequidad que predisponen a una comunidad o grupo de individuos a sufrir un daño diferencial y acumulado por sus condiciones (de género, sociales, económicas, físicas, ambientales, políticas, ideológicas, técnicas, institucionales, culturales, entre otras) y por exponerse ante una amenaza que pueda generar un desastre (CENAPRED 2001).

Fenómenos Hidrometeorológicos

Son los que se generan por la acción violenta de los fenómenos atmosféricos, siguiendo los procesos de la climatología y del ciclo hidrológico. Estos fenómenos, paradójicamente, son adversos y benéficos a la vez para la humanidad. En las costas llegan a ser extremadamente destructivos y en otras zonas son benéficos, ya que la lluvia favorece la recarga de presas y mantos freáticos, acelerando la actividad agrícola y ganadera, mitigando los incendios de pastizales y bosques. (Protección Civil de Guanajuato, http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx).

Definición de un sistema de alerta temprana

Los sistemas de alerta temprana (SAT) son sistemas integrados creados de forma especializada para el monitoreo, previsión y predicción de amenazas, además de la evaluación de los escenarios de riesgo de desastre. Se vinculan con procesos de comunicación y preparación con la sociedad, los gobiernos y el sector privado para reproducir protocolos de acción en los que se lleven a cabo medidas y actividades oportunas para reducir el riesgo de desastre, evitando la pérdida de vidas humanas y recursos económicos.

Las alertas tempranas forman parte de los planes de emergencia en diferentes niveles de riesgo. Su eficacia depende de la relación entre la visión que puedan tener científicos y técnicos sobre la posibilidad de que ocurra un evento amenazante y la percepción que tengan las autoridades y la comunidad en general sobre ese mismo hecho (EIRD, 2008). De acuerdo con lo anterior, oficialmente no existe una alerta temprana si esa condición no ha sido previamente declarada por la autoridad formal o legalmente responsable de dicha declaración.

Ante la importancia de los sistemas de alerta temprana, en la ciudad de Bonn, en el año 2006, se llevó a cabo la Tercera Conferencia Internacional sobre Alerta Temprana, misma en la que EIRD y el Ministerio Federal de Relaciones Exteriores de Alemania establecieron los "Elementos principales de los sistemas de alerta temprana", centrados en la población. Se trata de elementos vinculantes que ofrecen canales de comunicación entre sí para logar un eficaz sistema de alerta temprana. El objetivo fundamental de un SAT es reducir o evitar la posibilidad que se produzcan lesiones personales, pérdidas de vidas, daños a los bienes y al ambiente, mediante la aplicación de medidas de protección y reducción de riesgos. Los Planes de Gestión de Riesgo o Respuesta de Emergencias son medidas indispensables para que una alerta sea efectiva.

Componentes de los sistemas de alerta temprana

Existen cuatro pilares sobre los cuales se formalizan los sistemas de alerta temprana, estos son: el conocimiento del riesgo; los servicios de seguimiento, monitoreo y alerta; la difusión y comunicación y, finalmente, la capacidad de respuesta.

Se hará una breve descripción de cada elemento, así como la identificación de las acciones que deben de realizar en cada uno de ellos para lograr la construcción del engranaje del sistema de alerta temprana, acciones propuestas por Enrique Guevara en 2017.

Conocimiento de Riesgos

El riesgo se debe a la interacción de las amenazas y las vulnerabilidades en una zona y tiempo determinado. Para poder evaluar el riesgo es necesario recopilar y analizar información sobre la frecuencia, magnitud e intensidad de las amenazas; también hace falta identificar y analizar los procesos que generan la vulnerabilidad ante esas amenazas, como el cambio de uso de suelo, la degradación ambiental, una desordenada urbanización, entre otros. Con esta información se generan mapas en donde se determinen las zonas de riesgo, se ubican puntos estratégicos para las necesidades de los sistemas de alerta que sirvan como herramienta para la toma de decisiones, no solo para los preparativos en la atención y respuesta a emergencias y desastres, sino en la planificación territorial de bajo riesgo.

Para ello, se deben cubrir una serie de acciones: identificar los riesgos asociados con fenómenos; contar con un atlas de riesgos actualizado; realizar una determinación de escenarios; basar las acciones futuras en datos técnicos y científicos (como los pronósticos y predicciones) y cuantificar los riesgos.

Servicios de seguimiento , monitoreo y alerta

Constituyen el componente fundamental del sistema de alerta. Para este elemento es esencial que se cuente con una base científica para prever y prevenir los fenómenos perturbadores y las amenazas mediante el seguimiento continuo de las condiciones ambientales que permiten su generación y desarrollo, de este modo se crean pronósticos y alertas precisas y oportunas las 24 horas. Los servicios de alerta deben de compartirse a través de procedimientos y redes de comunicación institucionales.

Dentro de las acciones a realizar, es fundamental conseguir o rentar equipos de medición, monitoreo, comunicación y transmisión.

Difusión y comunicación

Mediante una definición de los canales oficiales de comunicación, las alertas deben de entregarse a personas amenazadas por algún fenómeno

perturbador. En ellas se deben de difundir mensajes claros que ofrezcan información sencilla y útil para promover respuestas adecuadas que ayuden a salvaguardar sus vidas y sus medios de vida. El empleo de múltiples canales es indispensable para garantizar que la alerta llegue al mayor número de población en riesgo y reforzar el mensaje de la alerta. Además, contar con múltiples canales evita que fallos en algún canal que obstruya la entrega de la alerta a la población.

El sistema de alerta temprana debe ser operado por autoridades competentes. Para su manejo, se deben establecer protocolos, así como múltiples canales de comunicación que cubran a toda la población en riesgo. Ello requiere de información clara y útil, que se difunda usando los instrumentos necesarios (equipos receptores y de difusión).

Capacidad de respuesta

Es de suma importancia que las comunidades comprendan el riesgo, que vinculen el mensaje de alerta con su percepción del riesgo para que sepan cómo reaccionar. Por lo que es necesario que, con premeditación, se trabajen programas de educación y preparación ante emergencias y que se generen planes de reducción de riesgos en los que participe la comunidad para que pongan en práctica estos conocimientos. La población debe estar informada sobre los efectos de los fenómenos perturbadores en su región, conocer las rutas de evacuación existentes, los lugares seguros y formas de evitar daños o pérdida de bienes.

Las acciones que se deben realizar enfocadas para lograr lo anterior son:

- Facilitar el entendimiento de riesgo (orientación), así como el conocimiento de los sistemas (difusión).
- Crear programas de planeación y manuales de procedimientos.
- Capacitar a la población para reacción ante la alerta.
- Mantener una revisión constante de los programas de prevención (mejora continua).

Retomando lo dicho con anterioridad, es de suma importancia la vinculación y coordinación de estos elementos entre sí, debido a que el fallo en cualquiera de estos pone en riesgo el buen funcionamiento de los elementos restantes y por lo tanto la funcionalidad del sistema.

Tipos de Sistemas de Alerta Temprana.

Centralizado

El Sistema de Alerta Temprana Centralizado es aquel que utiliza tecnología que requiere de un conocimiento técnico experto en lo que se refiere a la observación y monitoreo del fenómeno y en la elaboración del pronóstico de crecida.

La observación y monitoreo se basa en redes telemétricas de estaciones de lluvia y nivel de los ríos. Esto facilita pronósticos de crecida precisos y con anticipación. Se apoya en redes de observación global, como el radar, que permiten desarrollar modelos y pronósticos de tiempo, y utiliza una base científica que requiere la participación de profesionales con conocimiento y entrenamiento avanzado para desarrollar modelos hidrometeorológicos, en los cuales se basan los pronósticos de crecidas. Estos pronósticos permiten la difusión de avisos con antelación a las alertas, aumentando así el tiempo de preparación. El objetivo de los sistemas de alerta centrados en la gente es empoderar a los individuos y a las comunidades amenazadas para tener la posibilidad de actuar a tiempo y de forma apropiada, de manera que se reduzca la posibilidad de perdidas personales y daños en la propiedad, el medioambiente o en los medios de vida (Ochara, 2007).

Comunitario

Es un sistema de carácter sencillo. Se caracteriza por el uso de equipos de bajo costo y de fácil manejo, operados por miembros de las comunidades tanto en los componentes y el monitoreo del evento, así como en la comunicación de la alerta. Este tipo de sistemas se basa en la participación de voluntarios de las comunidades que viven dentro de la cuenca donde se instaló el SATI, los voluntarios desempeñan funciones de trabajo en la repuesta, pero también participan en tareas de prevención con trabajos de mitigación de bajo costo y que no requieren de conocimiento técnico experto. El papel desempeñado por los voluntarios es primordial en el control y monitoreo hidrometeorológicos; los avisos y alertas deben ser oportunos, así como la preparación de los planes de contingencia y respuesta son imperativos.

Los sistemas de alerta temprana son aplicables a eventos naturales, a aquellos provocados por la actividad humana y por la interacción de ambos elementos, cuyas características permiten su vigilancia y monitoreo. Entre las amenazas o eventos más comunes a los cuales se aplican SAT tenemos las inundaciones, deslizamientos de tierra, huracanes, volcanes, tsunamis, incendios forestales y el fenómeno del niño y de la niña.

Estos sistemas son herramientas cruciales de la protección civil, han demostrado su eficacia habilitando a la gente para actuar con prontitud para protegerse a sí mismos y a sus bienes contra los riesgos inminentes. Deben estar apoyados por capacidades de pronóstico y monitoreo de fenómenos naturales con la capacidad para sumar datos a la información de riesgos, que pueda comunicarse como mensajes de alerta adecuados. Estos sistemas deben estar apoyados por campañas paralelas para garantizar que los receptores entiendan cuáles medidas deben tomar. La eficacia depende de la planeación de los procesos de colaboración y coordinación entre las dependencias técnicas, las autoridades de protección civil, los medios de comunicación y la población en general.

Antecedentes

Es claro ver cómo en el territorio de Tabasco están presentes la mayoría de los fenómenos perturbadores hidrometeorológicos, los cuales a su vez pueden detonar otros del tipo geológicos, ecológicosanitarios e incluso químicotecnológicos.

Tabasco contribuye con más del 33% del total de agua dulce que existe en el territorio nacional, el 42% del territorio tabasqueño son cuerpos de agua. El 95.2% del área total no sobrepasa los 30 metros sobre el nivel del mar, la precipitación media anual oscila entre los 1500 y 3000 mm, compartimos con Chiapas y Guatemala los dos ríos más caudalosos del país, el Grijalva y el Usumacinta. Además de contar con una extensa red de cuerpos acuícolas, se registran grandes volúmenes de precipitación pluvial y todo eso se complica debido a que la red de drenaje urbano en la capital y las principales ciudades es muy antigua y, por lo tanto, obsoleta e insuficiente, lo que hace que la planicie tabasqueña sea vulnerable a los fenómenos hidrometeorológicos.

A lo largo de los años se han realizado obras de mitigación, la gran mayoría enfocadas en un aspecto estructural, tales como: bordos de protección en márgenes de ríos, compuertas chicas y grandes, creación de zonas de regulación, entre otras. Sin embargo, no se ha podido atacar el problema de fondo, por lo que el peligro de inundación prevalece prácticamente en todo el estado debido a la alta vulnerabilidad de la mayoría de las comunidades.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) catalogó a las inundaciones del 2007 como una de las 20 tragedias más costosas ocurridas en el mundo; la entidad fue nuevamente afectada en los años 2008, 2009 y 2010. El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) estimó en más de 46 mil millones de pesos los daños y pérdidas en esos 4 años. Tabasco es considerada una de las entidades mayormente afectadas en los últimos 20 años en nuestro país.

El Servicio Meteorológico Nacional proporciona información ágil y oportuna, pero es generalizada para todo el estado, sin tomar en cuenta que, pese a ser una entidad relativamente pequeña, cuenta en su geografía con una diversidad de características que obliga a tomar en cuenta las condiciones específicas de cada región. Por ejemplo, en la región de La Sierra, colindante con el estado de Chiapas, atraviesan al menos cuatro ríos (Teapa, Pichucalco, Puyacatengo y Tulijá o Puxcatán) que son de rápida reacción y no están controlados por las presas del Alto Grijalva, frecuentemente ocasionan problemas en las comunidades aledañas. Asimismo, en la región de Los Ríos, que abarca la cuenca del Usumacinta, periódicamente se presentan desbordamientos que afectan la agricultura y la ganadería. En la cuenca del Samaria, cuando se incrementa la extracción de la Presa Peñitas, se ven afectadas las zonas bajas de la Chontalpa y Nacajuca. Las áreas urbanas de las ciudades más importantes

constantemente presentan encharcamientos e inundaciones por la falta de drenaje, la acumulación de basura y las fallas en los cárcamos, además de la carencia de obras de mitigación, entre otros problemas.

Actualmente, el estado de Tabasco no cuenta con un sistema de alerta temprana que permita a las autoridades anticipar, de manera confiable y oportuna, las condiciones meteorológicas que puedan representar un peligro a la sociedad, tomando en cuenta la situación geográfica y la vulnerabilidad de cada municipio y comunidad.

Desarrollar un sistema de alertamiento temprano parece el paso lógico a seguir con tal de ayudar a tomar medidas que prevengan y mitiguen los daños ocasionados por los agentes perturbadores hidrometeorológicos, y así contar con información oportuna, confiable y de primera mano en la toma de decisiones. Si esto se lograse, el Sistema Estatal de Protección Civil cumpliría con su misión de proteger y salvaguardar la vida, la integridad y el patrimonio de los ciudadanos. Es decir, al contar con los datos que permitan realizar pronósticos climatológicos relacionados con la intensidad de las lluvias, su trayectoria y posibles afectaciones, los niveles de los ríos y otros fenómenos de origen hídrico, se podrían emitir los avisos precautorios y alertas para que autoridades y población actúen de manera preventiva.

Los gobiernos de los estados están obligados a proporcionar a la población todas las herramientas que les permitan conocer los peligros a los que están expuestos y señalarles la mejor forma para evitar sufrir daños y reducir la vulnerabilidad física y social. Sin duda, los sistemas de alerta temprana permiten a ambos, gobernantes y gobernados, conocer de manera anticipada los peligros y amenazas, para actuar de manera oportuna.

El conocimiento de los peligros, las vulnerabilidades, los riesgos y el proceso de gestión de estos, nuestro entorno y el medio ambiente, ayudará a inculcar en la ciudadanía la cultura de la protección civil y el entendimiento de la responsabilidad que tenemos cada uno de protegernos.

Proceso constructivo

Un sistema de alerta temprana no es algo que se pueda desarrollar de la noche a la mañana; incluso si se contara con un financiamiento ilimitado para conseguir los equipos técnicos y realizar los estudios científicos, tan solo el factor social lo volvería una tarea de años para lograr permear en la población. Sin lugar a duda, lo primero es tomar cartas en el asunto de los fenómenos perturbadores hidrometeorológicos, por ello el primer módulo será enfocado a atenderlos. Asimismo, para buscar ser efectivos con la implementación de este sistema de alertamiento, lo más sensato es trabajar por partes, delimitando alcances, retos y áreas de oportunidad.

Por ello, la primera fase del módulo hidrometeorológico se enfocará en cubrir los aspectos técnicos y científicos, así como generar lazos con las entidades oficiales

que prevén las condiciones meteorológicas e ir creando productos propios que el Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco pueda difundir y le ayuden a ganar presencia en la prevención de estos eventos. También se deberán crear unos protocolos de actuación en la medida que empiecen a obtenerse resultados, mismos que se deberán ir actualizando constantemente.

Esto será la base para avanzar a otras fases enfocadas a puntos específicos o bien a los procesos entrelazados necesarios para una coordinación efectiva ante distintos fenómenos perturbadores, sin mencionar que se a futuro también se espera volver al sistema de alertamiento temprano uno multi riesgos.

Cabe mencionar que se parte de un punto de vista positivista principalmente porque presenta un interés tecnológico y además se está valorando que podemos medir de forma cuantitativa las causas de los riesgos, así como recolectar información estadística para estudios posteriores. Sin embargo, dado las situaciones comentadas anteriormente, también se tendría un componente pragmático importante, en el sentido de que con los recursos limitados que se tienen y los antecedentes, se tendría que trabajar y pulir primero lo que se tiene para seguir avanzando.

Los objetivos concretos para esta primera fase del módulo hidrometeorológico son:

- Realizar la puesta en operaciones de equipos que puedan ayudar a prever y anticipar la ocurrencia de fenómenos perturbadores hidrometeorológicos.
- Realizar la puesta en operaciones del radar meteorológico (este objetivo se maneja aparte por el costo y la complejidad de la tarea, a comparación del resto de equipos).
- Compartir información de estos equipos con el servicio meteorológico nacional para retroalimentar sus datos, además de estrechar vínculos con ellos, con el objetivo de lograr pronósticos cada vez más precisos para Tabasco.
- Explorar las amenazas por fenómenos hidrometeorológicos que pueden generar factores de riesgo en el estado de Tabasco, desde un punto de vista epistemológico, para identificar los mecanismos de previsión y gestión del riesgo en función de las vulnerabilidades.
- Modificar la cultura de la atención de emergencias, por la de la gestión del riesgo, planteando soluciones que permitan reducir, no solo las pérdidas económicas ocasionadas por lluvias e inundaciones y sus efectos adyacentes, sino que también salvaguardar la vida y la integridad de las personas y su patrimonio.

Retos y aprendizaje

Lo primero que se tiene en mente para lograr los objetivos planteados es el financiamiento, sin embargo, dejando ese tipo de luchas temporalmente de lado, ¿cómo ejercer de forma correcta y efectiva los recursos si no hay personal capacitado que pueda lidiar con las tareas técnicas?

En materia de recursos humanos lo idóneo para solucionar este tipo de problemas sería encontrar gente con perfiles de programadores para las labores de automatización de datos, electromecánicos por temas de mantenimiento de equipos, meteorólogos para poder aplicar la infraestructura planteada para los pilares de conocimiento y monitoreo de fenómenos perturbadores hidrometeorológicos y hasta geógrafos y estadistas para aprovechar y crear datos georreferenciados para futuros análisis. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, los recursos son limitados, empezando por las ofertas de salario, que podrían no ser tan atractivas para personas con este tipo de perfiles, lo cual resulta algo irónico pues uno de los objetivos es evitar pérdidas económicas. Resulta aún más irónico que a pesar del contexto hidrometeorológico de Tabasco los meteorólogos escaseen.

La estrategia para este problema ha sido echar mano de los estudiantes de carreras afines a través de sus programas de servicio social o prácticas profesionales y recientemente se ha buscado trabajar con el programa federal "jóvenes construyendo el futuro". La apuesta tiene desventajas visibles: falta de experiencia. Sin embargo, más allá de la ventaja obvia de ajustarse al presupuesto, representa también una oportunidad para encontrar recursos humanos que puedan crecer en el ámbito de la protección civil.

Se han obtenido buenos resultados, contratando a dos egresados de ingeniería geofísica de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Uno de ellos, si bien no tiene alguna de las especializaciones mencionadas antes, funciona como principal interprete y técnico de los equipos, mientras que el otro se dedica más a los temas de cartografía y elaboración de atlas de riesgos, proyecto conjunto al sistema de alerta temprana que se mencionará brevemente más adelante. Adicional a esto, varios geocientistas han entrado a realizar su servicio social o prácticas profesionales y han colaborado en el proyecto para que este salga adelante. Claro que brindarles las oportunidades para que puedan empaparse en el contexto de la protección civil es fundamental, pues suelen ser jóvenes con perfiles más técnicos, y no tan integrales, quienes pueden aprender mucho de la experiencia que tenemos nosotros los mayores y así, tal vez, crear relevos completos para estas tareas complejas.

Otra razón importante para invertir en los recursos humanos adecuados es para poder operar de forma autosuficiente el sistema de alerta. Este principio rige gran parte de las acciones que se han llevado a cabo en la construcción y operación del sistema de alerta temprana y ha sido una solución factible a muchos problemas menores y mayores que han surgido por el camino.

Un ejemplo de esto fue el reto que surgió con el manejo de modelos numéricos para realizar pronósticos. Normalmente es posible guiarse a través de los pronósticos oficiales del servicio meteorológico nacional, sin embargo, es algo frecuente que dos o más pronósticos oficiales discrepen, a veces con mucha diferencia. Para poder generar un criterio propio de interpretación

de pronósticos, es necesario entender cómo se hacen y de dónde se toman los datos, prácticamente hacer un pronóstico propio y de ahí trabajar con los oficiales. En pocas palabras, se necesita hacer meteorología de primera mano, y por ello se requiere de gente capacitada. Es claro que este reto va más allá de tener a alguien que opere los equipos meteorológicos, ¿qué hacer cuando no se tiene el respaldo continuo ante un fenómeno perturbador de parte de las fuentes oficiales? ¿qué hacer si se necesita actualizar la situación global aparte de operar los equipos en estas circunstancias? Se tiene que ganar independencia en cuanto a la interpretación meteorológica, no hay más.

Cierto que para crear un modelo numérico meteorológico se necesita mucho poder de cómputo y una gran cantidad de datos fiables y, en esta etapa, el Instituto de Protección Civil no puede realizar esta tarea. Sin embargo, la solución por la cual se ha optado es la de aprovechar la miríada de recursos meteorológicos que hay en internet, creados por diferentes laboratorios y supercomputadoras, estudiándolos y seleccionando aquellos que logran predecir mejor la realidad. Por supuesto que ningún modelo es infalible ni preciso en todo: algunos son buenos prediciendo dónde lloverá, pero no cuánto (y viceversa); otros son buenos estimando temperaturas y velocidades de vientos; unos más son buenos en temporada de frentes fríos o en temporada de ciclones tropicales. Claro que se toman en cuenta los modelos oficiales, no obstante, la realidad es la que manda, y con base en eso se han seleccionado, descartado y ponderado diferentes recursos informáticos. Para esta tarea es de vital importancia dar libertad de estudio a la persona que se embarcará en entender estos sistemas, pues así se lograrán encontrar los fallos y aciertos más sutiles que lograrán regionalizar los pronósticos con cada vez mayor detalle. Esto se ve reflejado en uno de los productos que se emiten de nuestra parte: un semáforo hidrometeorológico por municipios. A esto nos referimos con el pragmatismo: hacer lo mejor con lo que se cuenta y, una vez afianzado esto, pulir, mejorar, actualizar y crecer.

El reto principal ha sido lograr poner en operación los equipos, pues después del tiempo en desuso de los equipos, muchas actividades de mantenimiento correctivo tuvieron lugar, algunas más complejas que otras. Además, problemas de inventario con administraciones pasadas entorpecieron el proceso.

Lo primero que se puso en operación fueron las estaciones meteorológicas, renovando muchos sensores para completar esta tarea. Cabe mencionar que las estaciones tuvieron que reubicarse a lugares públicos, tenerlas en propiedad privada a la larga causó muchos problemas, incluso dándose casos en los cuales se complicó la recuperación de la estación. Posteriormente, se procedió a hacer la instalación del equipo de radiosondeo. Después de realizar las instalaciones físicas en la base de operaciones dónde también se ubicó el radar meteorológico, con ayuda de personal del Servicio Meteorológico Nacional se logró esta puesta en operación, tomando unos

7 meses para hacerlo. Finalmente, la puesta en operación del radar fue algo mucho más complejo y hasta dramático, pues se presentaron muchos retrasos relacionados con pérdida y daño en las piezas del radar, las cuales iban desde temas mecánicos con los engranes hasta tener que reemplazar componentes altamente sofisticados y costosos. Este proceso duró cerca de un año, hablando estrictamente de las cuestiones técnicas, con varias visitas de la empresa intermediaria que suplió los equipos, Disime. S.A. de C.V. y mucho esfuerzo de buena parte de personal del Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco (IPCET).

Para estas tareas ha sido vital fortalecer los lazos Disime, optando por un enfoque de cooperación y respeto mutuo. Así mismo, y con base en la misma filosofía de ser actores de primera mano en el aspecto técnico, personal de protección civil ha estado presente durante la gran mayoría de las jornadas, ganando una cierta capacidad técnica que permite solucionar problemas en todos estos equipos sin necesidad de que personal externo se traslade al territorio, aunque es muy frecuente solicitar apoyo a distancia, compartiendo ideas, hipótesis y soluciones. Trabajando de forma conjunta y cercana bajo este enfoque, los resultados han sido ventajosos para ambas partes en el largo plazo.

Cultura de la gestión de riesgos

Un pilar de suma importancia para el éxito del sistema es todo el factor social y cultural que gira en torno a este. Tabasco es un estado con muy alta susceptibilidad de fenómenos perturbadores hidrometeorológicos, pero al ser esta a su vez tan recurrente, gran parte de la población está, en cierto modo, acostumbrada a padecer de estos embates y existe una idiosincrasia que raya entre la resiliencia y la necedad. La gente sabe que en tiempos de lluvia se pueden inundar o anegar (sobre todo en las comunidades alejadas de las cabeceras municipales y la capital), lo que significa que suelen resguardar sus cosas y esperar a inundarse para después regresar a la "normalidad". Esto podría ser tomado a primera vista como un ejemplo de resiliencia, sin embargo, en la práctica, esto es algo que se suele tomar como oportunidad para solicitar despensas o apoyos económicos, apoyos que podrían ser paliativos más que alguna solución real. Más allá de las discusiones éticas que pudieran surgir de este tipo de actividades, hay una realidad aún mayor que suele escapar de la vista de quienes suelen tomar estas vías cortas a la ayuda externa. ¿Qué pasa si el fenómeno perturbador es lo suficientemente grande para devastar hasta lo que se considera seguro? En la práctica esto se traduce en que hay personas que se reúsan salir de sus casas aun cuando personal de protección civil les va a buscar para una evacuación, y es justamente esto lo que hace de este modo de "prevención" una medida de doble filo, pues hay situaciones que sencillamente escapan de nuestro control durante las emergencias, lo que torna en un imperativo el tornar la protección civil hacia la prevención y

mitigación, además de respuesta a la emergencia que ya es conocida, y una de las formas de lograr esto en el ámbito social es hacer que permee más la cultura de la protección civil en la población en general.

Integración con grupos operativos

El IPCET tiene centros regionales en diferentes municipios, repartidos en principio para cubrir distancias, pero, sobre todo, de forma que atiendan geografías distintas. Estos son los Centros Regionales de Prevención, Atención a Emergencias y Capacitación (CEREPAEC), y se dividen en: Sabana, Costa, Sierra y Ríos, además de los que atienden al municipio de Centro. Cada CEREPAEC trabaja de forma conjunta con las diferentes unidades municipales de protección civil en su zona y, por ende, poseen conocimiento valioso de los peligros y riesgos en sus territorios.

El sistema de alerta temprana posee una naturaleza compartida, tanto de gestión y prevención, como de operación y monitoreo, por lo que integrar al personal que atiende las emergencias es una tarea importante que cumplir. Para ello, a principios del año 2019, se empezaron a impartir cursos de capacitación a todas las unidades municipales y a los CEREPAEC en materia del manejo de altas nacional de riesgos, así como del contexto hidrometeorológico general de Tabasco y en los primeros productos que se estaban generando del sistema de alerta temprana: un semáforo de ríos (con base en datos de CONAGUA), un reporte de estaciones meteorológicas y el tipo de gráficas de radiosondeo. Durante estas capacitaciones, los operativos mostraron un interés de ver reflejado lo que veían en campo de forma digital; también se dieron sesiones de preguntas y respuestas donde externaron limitaciones que observaban o cosas en las que se podía mejorar. Esto sirvió como un primer contacto necesario, haciéndolos participes de primera fila del sistema de alerta temprana y creando una inercia que ayudará más adelante a difundir los alertamientos con personal propio, a tal grado que ahora es común que ellos soliciten información cuando lo consideran necesario.

A lo largo del año se diseñaron otros productos, cada vez más vistosos y fáciles de entender, también se logró la puesta en operación del radar meteorológico, y los grupos operativos no fueron indiferentes. El entusiasmo por las nuevas herramientas y las solicitudes extraordinarias del personal son un buen indicador para estimar la difusión de los productos del sistema de alerta temprana, además de que las observaciones que se realizan sirven como una retroalimentación de primera mano. Por último, cabe mencionar que al principio es normal encontrar escepticismo acerca de este tipo de herramientas, pues es algo a lo que no se está acostumbra la población, sin embargo, tanto para los elementos operativos como para el público en general, esto va cambiando gradualmente, en la medida que crece el radio de aciertos en los alertamientos, así como el acompañamiento operativo, sobre

todo ante fenómenos perturbadores hidrometeorológicos que no se esperan de forma tan evidente, como frentes fríos que incurren en el territorio durante la madrugada después de un día soleado.

Importancia estratégica del Radar meteorológico

¿Qué es un radar meteorológico?

El radar meteorológico es un instrumento altamente especializado que envía ondas electromagnéticas a la tropósfera, emitidas por una antena parabólica, a la cual posteriormente regresan y, al medirse (en decibeles) la fuerza con la que lo hacen, se pueden cuantificar estos "ecos" para obtener información acerca de la intensidad de la lluvia y la velocidad de esta a diferentes alturas, lo que permite anticipar con mayor precisión la cantidad y ruta de las lluvias, en este caso, para el estado de Tabasco.

Los nuevos radares pueden detectar un desplazamiento Doppler en las ondas de radio devueltas y utiliza esto para determinar la velocidad de las partículas y si se mueven hacia el radar o se alejan de este. Los meteorólogos saben que el viento está empujando las partículas. Mediante el uso del radar Doppler, los meteorólogos pueden medir velocidad y dirección del viento en una nube, lo que puede ayudar a detectar posibles tornados.

Radar es la abreviación de "*radio detection and ranging*" (radio detección y telemetría). Un transmisor emite pulsos de ondas electromagnéticas de alta frecuencia (radio ondas). Estas ondas chocan con objetos conductores y son reflejadas hacia el receptor. El eco del radar aparece en un monitor y muestra dónde se encuentra el objeto. Una computadora mide el tiempo que demora la señal en reflejarse en el objeto y calcula a qué distancia se encuentra.

Hay muchos usos científicos del radar, pero el mejor conocido por el público es el radar meteorológico. El radar meteorológico es una importante herramienta de predicción, especialmente para predicciones de muy corto tiempo. El radar también se usa para estudiar otros aspectos de la atmósfera, como la identificación de los patrones de viento. Por ejemplo, si los científicos saben cómo está soplando el viento en la atmósfera superior, pueden predecir qué áreas serán afectadas por la contaminación del aire.

Aunque el desarrollo del radar fue impulsado por las necesidades de la guerra, también existía el interés de usar radares como sistemas anti colisiones. Esta idea se popularizó cuando el Titanic se hundió después de chocar con un témpano de hielo en 1912. El radar fue visto como una manera de detectar objetos, como los témpanos, durante condiciones meteorológicas severas, cuando las luces no eran efectivas. Como producto de todos estos esfuerzos también fue desarrollado el Radar Meteorológico.

Radar meteorológico del IPCET y su ubicación estratégica

El radar meteorológico del Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco es un Radar Doppler VHDD 250 C RDR de polaridad simple. Está ubicado en el Centro Regional de Prevención, Atención a Emergencias y Capacitación Costa, en el kilómetro 10 de la carretera Comalcalco-Cárdenas, en el municipio de Comalcalco (Fotografía 1).

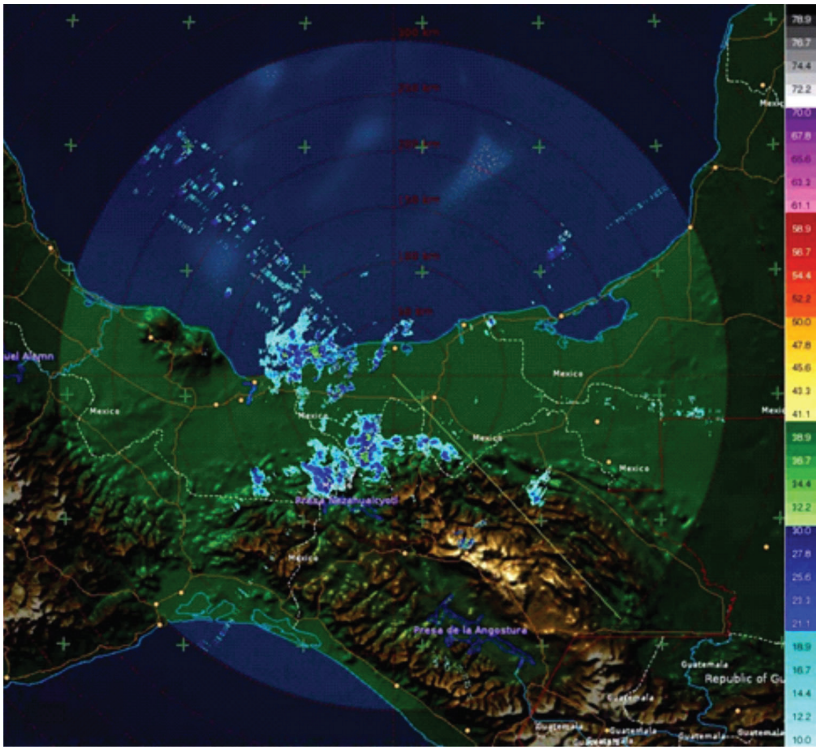
Fotografía 1. Radar meteorológico

Fuente: fotografía proporcionado por el Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, 2020.

El radar meteorológico tiene la función principal de detectar la intensidad de lluvia y la velocidad inmediata que llevan estas partículas, y plasmarlo a través de imágenes en dos dimensiones, ya sea en un plano horizontal o vertical. El primero permite ver, con un alcance de hasta 300 Km de radio, diferentes intensidades de lluvia o velocidades de movimiento de dichas partículas por medio de un mapa base y diferentes capas de información geográfica que puede indicar orografías o polígonos urbanos. El segundo plano permite hacer un estudio vertical de las nubes y las propiedades antes mencionadas, permitiendo estudiar turbulencia y condiciones de tiempo severo, como actividad eléctrica, vientos arrachados y hasta granizo en caso de que pudiera presentarse.

Otras de sus funciones es la capacidad dar seguimiento de trayectorias, hacer animaciones de hasta 4 horas de mediciones, grabar datos, mejorar su interfaz, diseñar rutinas de observación a diferentes alturas y alcances, y hacer pronósticos de desplazamiento de hasta 60 minutos con sus propios datos, aunque esta última tarea debe ser realizada manualmente por un operador.

Figura 3. Cobertura del radar meteorológico



Fuente: Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, 2020.

Los 300 km de radio que tiene de alcance le permiten cubrir todo el Estado de Tabasco, lo que equivaldría a tener miles de pluviómetros cubriendo el territorio, dejando de lado las otras funciones que pueden realizarse desde el radar claro está. Además de Tabasco, también se cubre parte del Sureste de Veracruz, llegando hasta Alvarado, del este y noreste de Oaxaca, alcanzando a Juchitán de Zaragoza, una gran porción de terreno de Chiapas, un tramo del suroeste de Campeche, llegando casi a Champotón, una pequeña porción de Guatemala, del Pacífico (costas de Chiapas y Oaxaca) y finalmente una gran extensión del Golfo de México.

Esta capacidad de observación nos permite monitorear y seguir con antelación los fenómenos perturbadores hidrometeorológicos relevantes para el estado, como frentes fríos y sistemas tropicales de todo tipo. Dependiendo del comportamiento y velocidad de estos sistemas, se pueden ver con hasta uno o dos días de antelación. Es preciso mencionar que existe un fenómeno recurrente denominado lluvias orográficas o de alta volatilidad, las cuales pueden surgir a escasos kilómetros de un centro urbano importante (por dar un ejemplo) y llegar dicho lugar en pocos minutos, limitando la capacidad de una pronta respuesta. A pesar de esto, el radar meteorológico es una herramienta fundamental para estimar la cantidad de lluvia acumulada, su intensidad y duración, por lo que aún en las lluvias más repentinas hay herramientas para evaluar el fenómeno perturbador y ayudar en la toma de decisiones pertinentes.

Para juntar esfuerzos y cubrir más territorio, el Servicio Meteorológico Nacional posee una red de 13 radares meteorológicos repartidos principalmente en el centro, sur y sureste del país. Los más relevantes para nuestra zona son los de Sabancuy, El Mozotal y Belice, los cuales amplían en gran medida las capacidades de alertamiento temprano, aunque estos radares no nos permiten la libertad de uso que el nuestro sí.

Finalmente, el radar meteorológico se complementa con información de una estación de radiosondeo del IPCET y de estaciones meteorológicas automáticas, tanto de la CONAGUA como del IPCET, así como de otras herramientas meteorológicas, mejorando así las capacidades de monitoreo, seguimiento y anticipación de fenómenos perturbadores hidrometeorológicos (Figura 4).

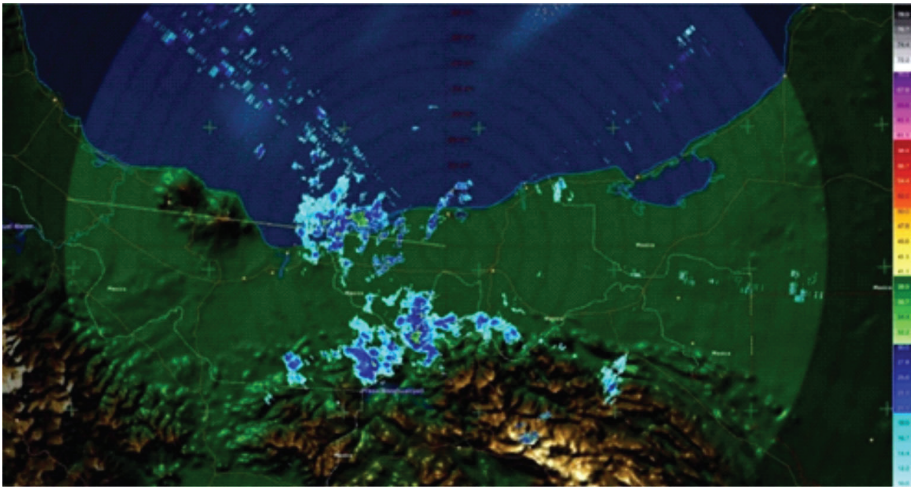
Figura 4. Estaciones meteorológicas

Fuente: CONAGUA, 2020.

Los productos del radar meteorológico

El producto fundamental del radar meteorológico es la representación de los ecos de lluvia en un mapa del estado de Tabasco. Los decibeles que se plasman en el mapa están repartidos por colores a través de una escala logarítmica. Esta escala nos indica que hay diferencias fundamentales entre cada tipo de color. Con el fin de acercar al lector, se presenta una idea básica de interpretación de estos colores, siendo: los azul claro lloviznas; los azul oscuro lluvia ligera; los marcados en verde se tratan de lluvia moderada; los amarillos lluvia fuerte y los rojos lluvia muy fuerte o incluso granizo, siendo estos últimos representados más bien por el color morado (Figura 5).

Figura 5. Monitoreo de la lluvia

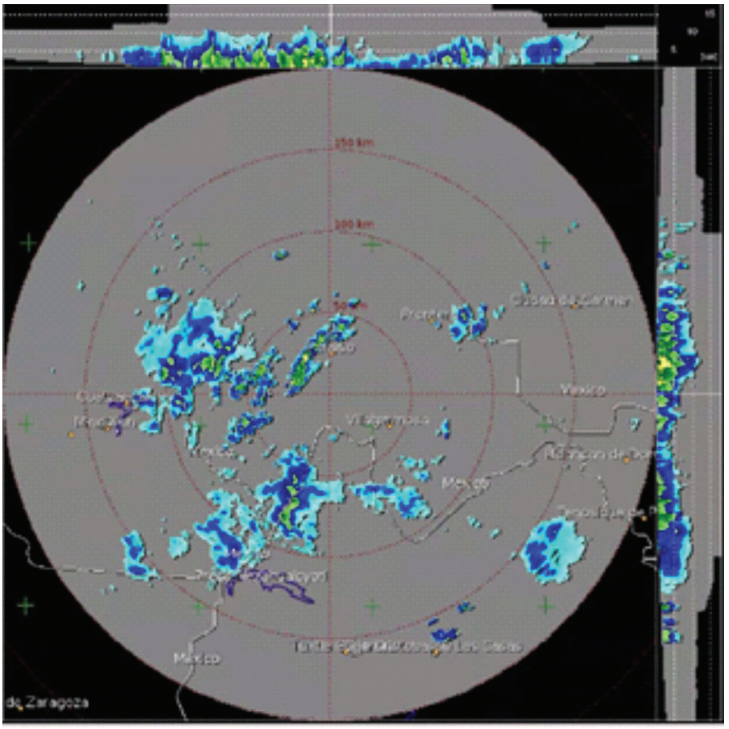


Fuente: Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, 2020.

Este tipo de imágenes obedecen, lógicamente, a un mismo ángulo de elevación; sin embargo, otro producto del radar es realizar volúmenes de datos a diferentes elevaciones, los cuales se suman para crear un mapa parecido al anterior, pero tomando en cuenta las elevaciones de cierta rutina programa con anterior (Figura 6).

Estas rutinas de escaneo pueden ser declaradas por nuestro personal, tomando en cuenta que los diferentes tipos de sistemas meteorológicos están asociados a diferentes tipos de nubes y estas a su vez poseen diferentes densidades en función de su altura.

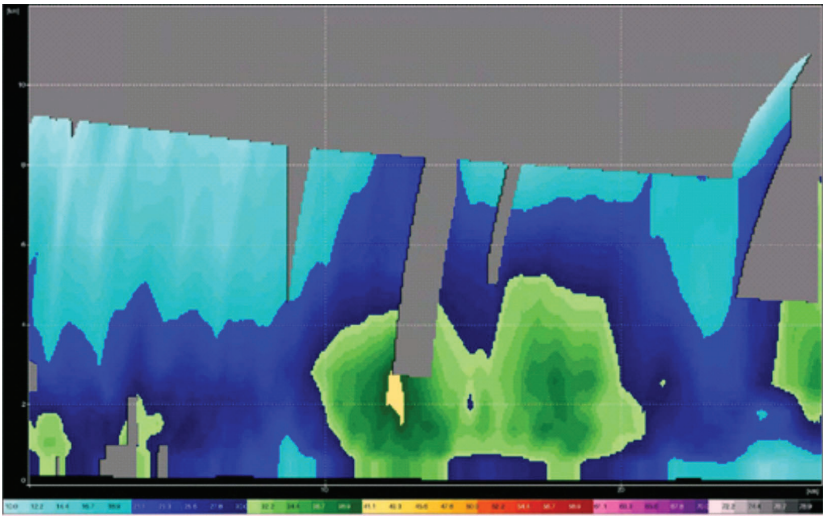
Figura 6. Volúmenes de datos a diferentes elevaciones



Fuente: Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, 2020.

Si se necesita estudiar un corte transversal en altura de alguna zona de ecos, también se cuenta con una herramienta para obtener este tipo de productos. Esto resulta especialmente útil para estimar la densidad de lluvia de alguna zona en particular, pues aún el producto anterior puede no mostrar todo lo relacionado a la intensidad de la lluvia, sobre todo si faltan datos durante el escaneo. Esto deberse a varios factores, principalmente a la diferencia de la elevación del escaneo, la cual aumenta con la distancia radial a partir de donde se encuentra el radar y genera ciertos vacíos de datos que son interpolados por el software para crear la imagen en 2 dimensiones con la suma de los escaneos programados. Sin embargo, estos vacíos son fácilmente apreciados en los cortes transversales y es relativamente más fácil para un intérprete hacer una "interpolación propia" y determinar la densidad de los ecos de lluvia que buscamos, de esta manera se puede obtener una mejor estimación de la intensidad de la lluvia, aunque esta tarea también se realiza manualmente, por lo cual es ideal tener a dos personas trabajando con el radar, al menos en los eventos relevantes para la protección civil (Figura 7).

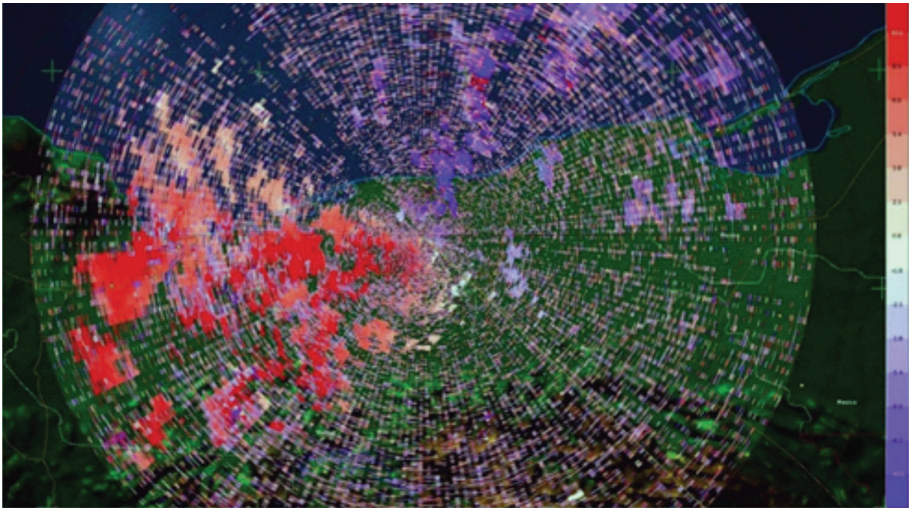
Figura 7. Corte transversal



Fuente: Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, 2020.

Lo anterior puede hacerse también midiendo los componentes de acercamiento y alejamiento radial de las partículas que detecta el radar. Dicho en otras palabras: la dirección y turbulencia de los vientos (Figura 8).

Figura 8. Dirección y turbulencia de los vientos

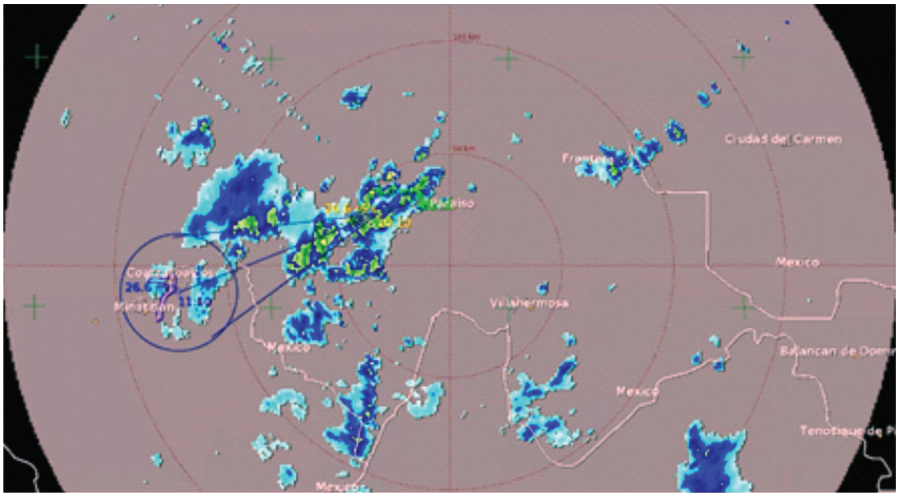


Fuente: Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, 2020.

Con "turbulencia" se refiere a que, al encontrarse dos corrientes de aire rápidas provenientes de direcciones opuestas, suele verse en alguna zona una mancha roja (la cual se aleja) y una morada (la cual se acerca) muy juntas e intercambiando valores entre sí; estas zonas de interacción entre dos masas de aire suelen representar los vientos arrachados. Esto también cambia en función del grado de elevación del escaneo, añadiendo mayor complejidad a la interpretación de los datos.

Finalmente, también es posible utilizar una herramienta de seguimiento que puede ayudar a pronosticar a corto y muy corto plazo. No obstante, además de requerir una entrada manual de puntos que generarán una trayectoria, estas son lineales en su extrapolación, por lo que algún cambio en las variables meteorológicas del sistema que se sigue podría influir en un cambio de proyección, por ello la interpretación hecha por el operador sigue siendo la principal fuente de pronóstico a corto y muy corto plazo (Figura 9).

Figura 9. Seguimiento de pronóstico a corto y muy corto tiempo



Fuente: Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, 2020.

Otros elementos del Sistema de Alerta Temprana de Tabasco

Red de Estaciones Meteorológicas e hidrométricas

Las estaciones meteorológicas automáticas son un grupo de instrumentos que pueden medir, almacenar y reportar las variables meteorológicas en superficie, tales como presión, velocidad y dirección de viento, humedad, precipitación y temperatura. Conocer de primera mano estos datos es muy importante para las evaluaciones y estimaciones, antes, durante y después de

la ocurrencia de un fenómeno perturbador, permitiendo dar más certidumbre al resto de las medidas del sistema de alerta temprana (Fotografía 2).

Fotografía 2. Estación meteorológica automática

Fuente: fotografía proporcionado por el Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco.

El IPCET cuenta con 15 estaciones meteorológicas que transmiten datos vía celular y satélite a una computadora en Villahermosa. Además de estas estaciones, se consulta la información de las estaciones hidrometeorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) con el mismo propósito. Los datos que se recaban con estos medios pueden usarse por sí solos para monitorear cambios relevantes en las variables meteorológicas; además de ello, serán necesarios para un proceso de calibración del radar meteorológico que tiene como objetivo transformar las medidas de decibeles a milímetros por hora.

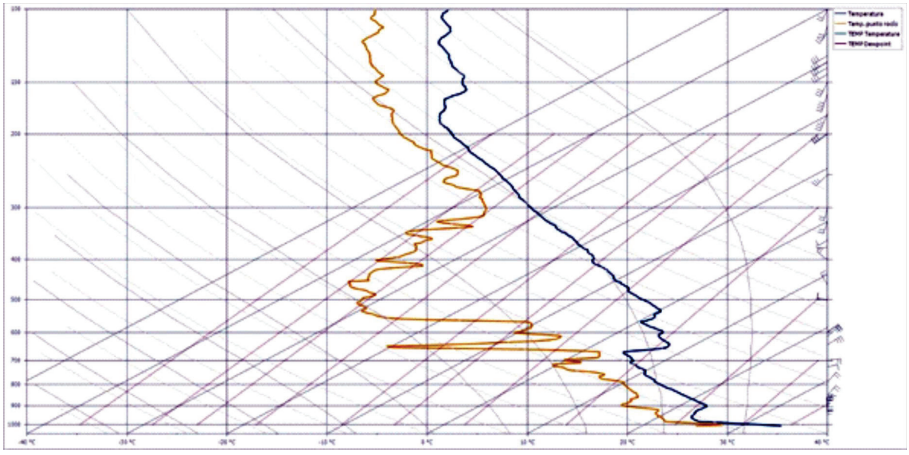
Estación de Radiosondeo

La estación de radiosondeo está ubicada en el mismo CEREPAEC que el radar meteorológico; es capaz de medir las variables meteorológicas que se miden normalmente en superficie, pero en una ascensión que tiene como promedio 23 kilómetros de alto. Esto lo logra a través de una serie

de sensores ligeros y compactos que pueden ser lanzados atándolos a un globo con helio y un estabilizador.

Esto nos permitirá conocer las condiciones de la atmósfera de forma vertical, con un promedio de 23 km de altura. La sonda mide y transmite datos de temperatura, humedad relativa, presión y posición (GPS) a lo largo de su recorrido. De esta forma se obtienen también los datos de velocidad y dirección de viento desde la superficie hasta la estratosfera. A través de una antena de radiofrecuencia y un receptor GPS se reciben los datos de la sonda en los equipos electrónicos del radiosondeo, para luego ser almacenados y puestos a disposición de los usuarios interesados. Esta información permite interpretar la humedad e inestabilidad en diferentes alturas, de la cual se puede obtener información sobre el potencial de lluvias y tormentas en Tabasco y así prever acciones antes o durante un fenómeno perturbador hidrometeorológico. A continuación, se muestra una imagen del diagrama generado por el estudio (Figura 10).

Figura 10. Diagrama generado por el estudio



Fuente: Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, 2020.

La interpretación de la humedad y la estabilidad en alturas claves, junto a las proyecciones teóricas de los mapas de vientos, permite estimar también un desarrollo de potencial en el tiempo, tomando en cuenta de donde proviene la humedad e inestabilidad de dichas alturas.

Por ejemplo, Tabasco al estar relativamente cerca de tres litorales, podría recibir humedad a niveles bajos del Golfo de México, a niveles medios del mar Caribe y a niveles altos alguna interacción con la corriente en chorro subtropical que podría arrastrar humedad del Pacífico. A esto le conocemos como "canales de humedad", y con sus evoluciones teóricas, medidas a través de la radiosonda, podemos estimar si dejará de llover en algunas horas, o por

el contrario si seguirá lloviendo, aunque no sea algo intuitivo de ver. Esto resulta especialmente útil en escenarios de varios días de lluvias y en las combinaciones de sistemas polares y tropicales, pues la turbulencia en estos casos podría significar también una probabilidad de granizo.

Principales beneficios de la tecnología meteorológica predictiva

La capacidad de generar un criterio propio en la evaluación de los fenómenos hidrometeorológicos es fundamental en la toma de decisiones, sobre todo al detectar fenómenos perturbadores que puedan representar un riesgo para la población, por lo que el primer beneficio es directamente para el propio Instituto de Protección Civil. Salvando la distancia de no ser una fuente oficial de pronóstico, brinda la opción para hacer las evaluaciones pertinentes en conjunto con los organismos que sí están facultados para realizar esta tarea. De hecho, es más fácil trabajar en conjunto con dichos organismos tales como la Comisión Nacional de Agua y el Servicio Meteorológico Nacional, lo que aumenta mucho la capacidad de prevención local, así como la de monitoreo, al entender de forma precisa los productos que emiten y comparando y compartiendo información cuando es necesario.

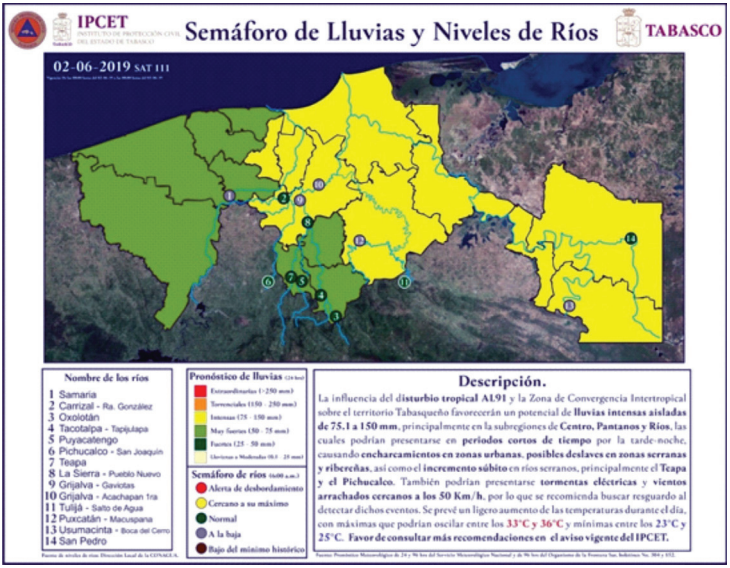
El segundo beneficio es poder regionalizar los pronósticos por municipios. Esto ayuda considerablemente en la logística de despliegue de elementos y equipo operativo en caso de que sea necesario. Se ha realizado un semáforo hidrometeorológico basado en los pronósticos oficiales y la información de los niveles de ríos que comparte la CONAGUA, así como en los colores manejados usualmente por el Centro Nacional de Prevención de Desastres para diferenciar peligros, pero con interpretación propia (Figura 11).

Los niveles de ríos fueron trabajados primero con otro diseño, conservándolo hasta el momento como un producto más técnico (aunque útil para otros tomadores de decisiones como los encargados de protección civil en la subcuenca del Pichucalco), pero usado en el mapa anterior a través de los círculos que indican los niveles reportados de la mañana en que se realiza el producto.

Un complemento para el semáforo hidrometeorológico es el semáforo de incendios, el cual se basa en la misma información hidrometereológica y las lecturas de puntos de calor de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, así como sus estimaciones en humedad y anomalías de vegetación y los conteos propios de incendios de pastizales atendidos (Figura 12).

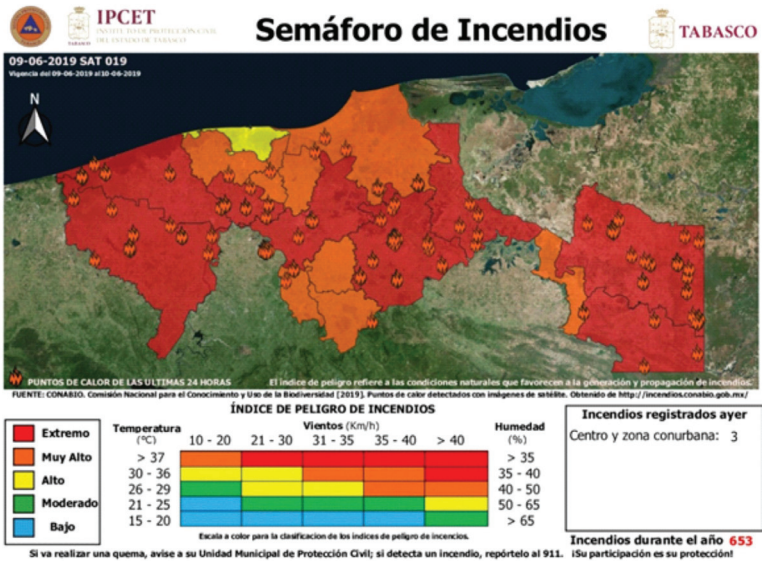
Estos mapas, además, nos permiten generar estadísticas propias y difundir de una forma más amable esta información, que es parte de los objetivos principales del sistema. Su función principal es mantener al personal operativo y a la población en general al tanto de la situación en el Estado. Aquí radica su principal beneficio, pues nos da una base sólida para para crear alertamientos oportunos a la población y a las autoridades, y así poder avanzar a otras fases del sistema de alerta temprana al mismo tiempo que las personas empiezan a familiarizarse con este tipo de información.

Figura 11. Semáforo de lluvias y niveles de ríos



Fuente: Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, 2020.

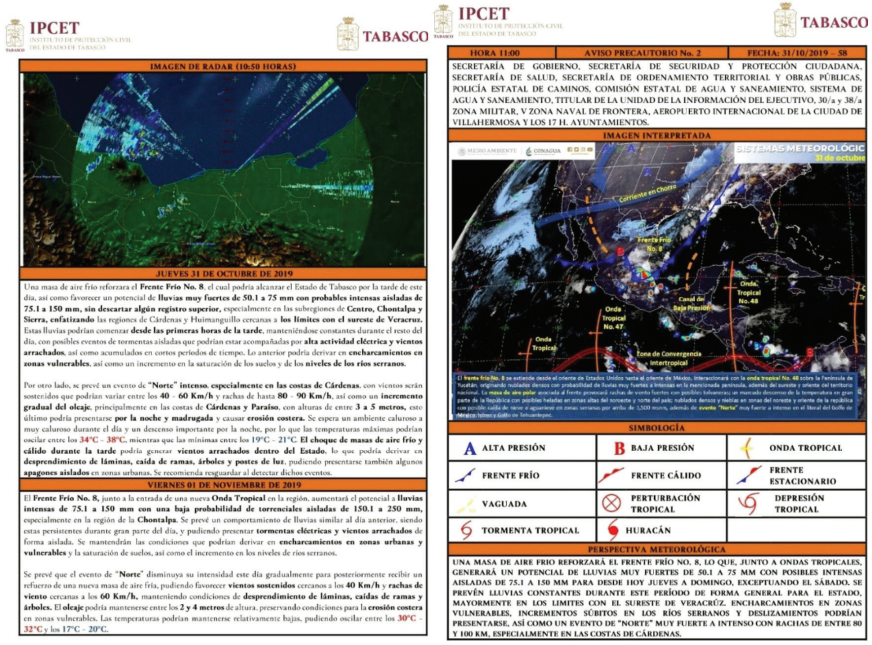
Figura 12. Semáforo de incendios



Fuente: Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, 2020.

Por último, al ser estos productos de nuestra autoría, se tiene la libertad de difundirlo por los métodos que consideremos más eficientes. Actualmente se comparten por televisión, radio, *Facebook*, *Twitter* y *WhatsApp*. Aunque aún faltan por explorar nuevos métodos para difundir estos productos y hacer a la población participe. Se pretende formar una red ciudadana de observadores meteorológicos y de desastres, con estos productos como base, sin embargo, hay algunos problemas intrínsecos a solucionar antes de llevar a cabo una iniciativa de este estilo. Para ello será necesario asegurarse de que no haya reportes falsos o se tergiverse la información. El centro estatal de operaciones (Figura 13).

Figura 13. Monitoreo y seguimiento



Fuente: Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, 2020.

Cuando un fenómeno perturbador hidrometeorológico es detectado, generalmente con antelación, o bien cuando una situación previa podría desencadenar en algo mayor a raíz de un evento que a priori no significaría un peligro tan relevante, lo primero que se evalúa es emitir un aviso precautorio. Estos avisos son muy flexibles, incluyen las fuentes que hagan falta, así como una descripción tan detalla como sea posible del comportamiento hidrometeorológico, pero, sobre todo, de los posibles riesgos que estas condiciones podrían generar en la población.

Al emitir los avisos, el personal operativo sabe que tiene que prepararse para el evento en cuestión. Si se considera necesario, se inician los protocolos para activar los consejos municipales de protección civil, o bien, si lo previsto para el evento podría sobrepasar las capacidades de este órgano, entra la implementación del consejo estatal de protección civil y a su vez del Centro Estatal de Operaciones, ambos ubicados en las instalaciones centrales en Villahermosa.

El centro estatal de operaciones es la herramienta operativa de la que dispone por ley el consejo estatal de protección civil. Desempeñan algunas funciones: coordinar y dirigir técnica y operativamente la atención del alto riesgo, emergencia o desastre; realizar la planeación táctica, logística y operativa, de los recursos necesarios, su aplicación, y las acciones a seguir; aplicar el plan de contingencia o los programas aprobados por el Consejo, y asegurar la adecuada coordinación de las acciones que realicen los grupos voluntarios; y establecer la operación de redes de comunicación disponibles en situaciones de emergencia.

Las dependencias que integraron este centro de operaciones en 2019 fueron: la 30/a Zona Militar, la Comisión Federal de Electricidad, la Comisión Nacional del Agua, la Guardia Nacional, la Junta Estatal de Caminos, la Policía Federal, la Secretaría de Bienestar, Sustentabilidad y Cambio Climático, la Secretaría de Movilidad, la Secretaría de Salud, la Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, el Sistema del Desarrollo Integral de la Familia en Tabasco y la V Zona Naval, Frontera.

En la práctica, el sistema de alerta temprana sirve para prever los fenómenos perturbadores con dos o tres días de anticipación, en caso de que sea posible, condensando a través de los avisos precautorios la información relevante y siendo un instrumento fundamental en la toma de decisiones al iniciar los protocolos de protección civil. Así mismo, al buscar regionalizar lo más posible los riesgos derivados del evento, se toman las medidas de preparación y prevención requeridas por parte del personal operativo, para finalmente brindar seguimiento y monitoreo constante durante el evento, presentando también pronósticos de corto y muy corto plazo por comunicación directa o por redes sociales, en caso de que sea necesario. Cabe mencionar que al reunir a los grupos de responsables no solo físicamente, sino también por las redes, no solo se crea una vía de comunicación inmediata, sino una forma de almacenar datos relevantes a algún evento en específico. Algo que mostrará una mayor utilidad más adelante.

Una perspectiva al futuro

Actualmente hay una serie de productos del sistema de alerta temprana, así como una inercia entre la gestión de riesgos y los elementos operativos que empieza a familiarizarse y a permear a la población en general. La infraestructura

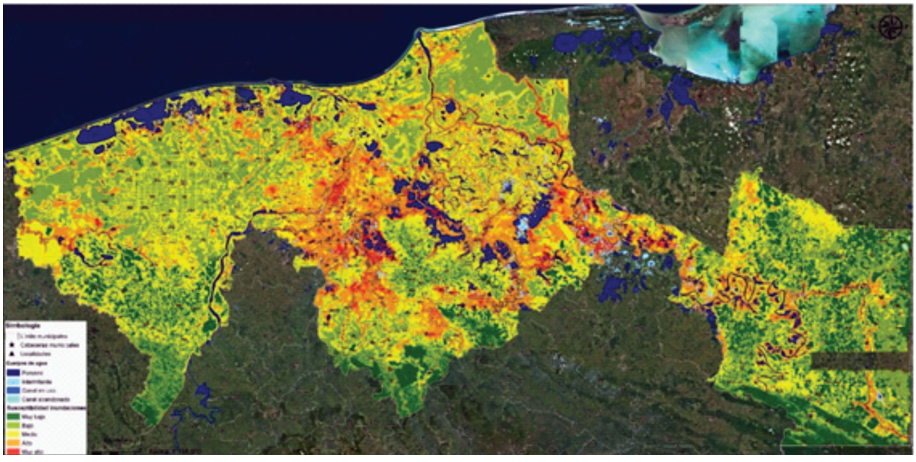
de seguimiento y monitoreo está puesta en marcha y hay recursos humanos con potencial para operar esta estructura. Cuanto se ha logrado tan solo marca el inicio de nuevas metas y etapas a conseguir, por lo que ahora se comentará brevemente algunos de los proyectos y trabajos que se están realizando para volver cada vez más robusto el sistema de alerta temprana de Tabasco.

La simbiosis con el atlas de riesgos

Al momento de prever los riesgos o de monitorear durante un evento que puede poner en peligro a la población, aparte de todos los sistemas y apoyos meteorológicos que se dominen para esta tarea, hay que poder aterrizar esos escenarios pronosticados (sobre todo los de corto y muy corto plazo) a los peligros e incluso riesgos pertinentes.

Para lograresto es necesario manejar también la información de los atlas de riesgo, y en particular del Atlas Nacional de Riesgos, una plataforma en línea que permite acceder a diversas capas de peligro, vulnerabilidad y riesgo en el estado de Tabasco. Ahora mismo, dos de los mapas más importantes el de susceptibilidad de inundaciones y deslizamiento de laderas, trabajados por personal del Programa de las Naciones Unidades para el Desarrollo del 2016 a 2018 (Figura 14).

Figura 14. Sistema de Información Geográfica



Fuente: Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, 2020.

En la medida que conozcamos el territorio y podamos georreferenciar la información adecuada para hacer los análisis de peligros y riesgos, podremos aterrizar cada vez más la información que tenemos, e incluso empezar a fabricar escenarios de riesgo.

Por ello, un proyecto que inició también en 2019 en el Instituto de Protección Civil es el de realizar por cuenta propia los atlas de riesgos de los 17 municipios de Tabasco, recolectando datos de diferentes dependencias e institutos, realizando brigadas de campo y georreferenciando el conocimiento de las personas y los actores principales en la gestión de riesgos para poder procesarlos y analizarlos, creando tanto los conjuntos de datos y los formatos originales (por ejemplo shape, raster, kml, kmz, mpk, json, etc.), como los productos finales, los cuales podremos compartir con el atlas nacional de riesgos y otras plataformas gubernamentales que tengan el mismo objetivo.

Siguiendo esta filosofía de realizar por cuenta propia el trabajo especializado, no solo se ahorra dinero, sino que, al capacitarnos en estas materias generamos otro sentido crítico, el cual se podrá aprovechar también en las colaboraciones externas y servicios que quieran ofrecer a protección civil; de este modo, la información se podrá actualizar con mucho mayor velocidad y eficacia. Además, este se encamina a realizar la modelación numérica necesaria para crear escenarios de riesgo en toda regla.

Otra tarea que se tiene que implementar es aumentar la cantidad de registros o conjuntos de datos georreferenciados propios de protección civil. Recientemente se está trabajando en brindar a coordenadas relativamente precisas una gran cantidad de refugios temporales, los cuales, en muchos casos, solo poseen una dirección general, por lo que es una tarea laboriosa pero necesaria. Otro ejemplo sería instruir al personal operativo en la toma de coordenadas para que mientras estén en sus labores de campo se pueda recabar información de las afectaciones más recientes. Para esto es necesario comprar equipos de sistema de posicionamiento global (GPS), pero al no tenerlos por ahora, se está optando por georreferenciar tantos datos como se pueden en función de los reportes de localidades e imágenes que se manejan en los grupos. Cabe mencionar que el radar meteorológico puede entregar datos con coordenadas como salida, siendo una herramienta de identificación de coordenadas la forma actual (junto al atlas nacional de riesgos) de ganar exactitud en los pronósticos de corto y muy corto plazo.

Generar el hábito de crear datos y georreferenciarlos en todas las áreas de la protección civil ayudará mucho en el futuro, tanto al sistema de alerta temprana como al proyecto de creación de los atlas de riesgos, proyectos que se irán entrelazando cada vez más en el futuro, tomando en cuenta que las medidas de prevención y mitigación de gestión de riesgos están más encaminadas a la gestión correcta del territorio que a la respuesta en sí de la emergencia.

Los retos de las localidades alejadas

El centro de monitoreo y la base para un sistema de alerta temprana multi-riesgos

La fase dos del módulo hidrometeorológico será crear un centro de monitoreo. Este centro de monitoreo no solo deberá integrar las herramientas que ya existen en esta fase 1, sino que se enfocará en los pilares de la difusión y la capacidad de repuesta.

El proyecto contempla realizar dos redes de alertamiento. La primera está pensada para la población en general, instalando bocinas de alertamiento en zonas muy concurridas en caso de que algún desbordamiento o lluvia extrema estuviera por ocurrir. La segunda red resulta mucho más interesante, siendo entrelazamiento de autoridades y actores identificados en la gestión de riesgo ante inundaciones, con nombre y apellido.

La forma de llevar esto a cabo es por medio de protocolos automatizados controlados desde el centro de monitoreo. Al programar redes de actores en función de la magnitud del fenómeno perturbado, también será posible asignar áreas geográficas a estas redes en tiempo real desde el centro de monitoreo. Entonces, al conjugar un área y un tipo de red, se enviarán mensajes a los actores principales de esa zona a través de cuentas previamente enlazadas; estos mensajes deberán bloquear el dispositivo del actor hasta que este demuestre su conocimiento de la alerta y empiece a realizar su trabajo y a avisar a personas a su cargo. La relación de actores con conocimiento del evento, sus tareas y el cumplimiento de estas, también se llevará en el centro de monitoreo, por lo que será fácil detectar fallos localizados como mal funcionamiento de cárcamos o falta de apoyo de ciertas brigadas, por dar algunos ejemplos. Al combinar este tipo de red junto con los avisos a la población en general y otra dedicada a la población (con base en el potencial de las redes sociales mencionado previamente), se podrá tener una capacidad mucho mayor de difusión y alertamiento, lo que permitirá actualizar y consolidar protocolos de actuación y diseñas mejores capacitaciones para aumentar la capacidad de respuesta de la población.

Si bien hay un gran trabajo pendiente para lograr esto, sobre todo para diseñar estas redes de respuesta, se ha mencionado solo la conjugación de áreas y tipos de redes a activar ante un fenómeno perturbador, pero este sistema y la infraestructura planteada deja prácticamente todo listo para configurar alertas por otro tipo de fenómenos perturbadores como los sismos, pues las torres de alertamiento general se comunicarán vía ondas de radio, haciendo posible la interacción con este tipo de sistemas de alertamiento más desarrollados en el centro del país, pues de hecho este centro de monitoreo propuesto es el que se desarrolló en Iztapalapa, ciudad de México.

De momento finalizaré aquí con los proyectos concretos que estamos trabajando de cara al futuro, con mucho trabajo por mantener y más por realizar, esperando volver a Tabasco un referente en la gestión integral de riesgos y los sistemas de alerta temprana.

Bibliografía

CENAPRED, 2001. *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastre en México.* México: CENAPRED.

Comisión Nacional del Agua, s/f. "Pronostico climático". Disponible en: https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/frentes-frios.

GET, 2008. "Datos estadísticos". México: GET.

Guevara, Enrique, 2018. *Presentación de Enrique Guevara, durante el Segundo Foro Internacional de Reducción de Riesgos de Desastres, "Desafíos de la Gobernanza".* (18 de mayo de 2017).

INEGI, 2000. "Datos estadísticos". México: INEGI.

Lavell, A., (2003*). La Gestión Local del Riesgo. Nociones y Precisiones en torno al Concepto y la Práctica*. Guatemala: CEPREDANEC-PNUD.

Naciones Unidas, 2008. *Estrategia Internacional para la reducción de Desastres (EIRD)*. Naciones Unidas.

NOAA, FEMA, Cruz Roja Americana, 2013. *Guía de Preparación Departamento de Comercio de los EE.UU*. Agencia Nacional del Océano y la Atmósfera, Servicio Nacional de Meteorología.

O Ruiz-Álvarez, R Arteaga-Ramírez, MA Vázquez-Peña, RE Ontiveros Capurata, R López-López, 2010. *Water balance and climatic classification of the state of Tabasco, Mexico*. 01 de diciembre de 2010.

OCDE, 2013. *Estudio de la OCDE sobre el Sistema Nacional de Protección Civil en México*, OECD Publishing http//dx.doi.org/10.1787/9789264200210-es. y www.unesco.org/new/fileadmin.

Ochara, J., 2007. "Sistemas de Alerta temprana. Fotografía actual y retos futuros". *Cuadernos internacionales de Tecnología para el desarrollo humano*.

PCE Ibérica S.L., 2014. "Medidores". Disponible en: https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/que-estacion-meteorologica.htm.

Protección Civil de Guanajuato, s/f. "Protección Civil de Guanajuato". Disponible en: http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx/.

Reglamento de la ley General De Protección Civil, 2014. Reglamento de la ley General De Protección Civil. En Congreso de la Unión, Disposiciones Generales (pág. 31). México.

Revista MeteoGalicia (s/f). "Xunta de Galicia. Conselleria de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructura". Revista MeteoGalicia.

SEGOB-CENAPRED-SINAPROC-FONDEN, 2001-2006. Programa Especial de Prevención y Mitigación del Riesgo de Desastre. México.

4.3. El Sistema de Alerta Sísmica Mexicano. Perspectiva de su desempeño desde la Gestión Integral de Riesgos y los Sistemas de Alerta Temprana comunitarios

Mario Álvaro Ruiz Velázquez

Instituto de Investigaciones y de Estudios sobre Alertas y Riesgos, A.C.

Introducción

México da testimonio de la existencia de fenómenos perturbadores extremos, es el caso de los sismos. Históricamente se han presentado en distintos momentos y afectaron el territorio nacional. Reúnen algunas sincularidades, como haber sucedido el mismo día, el 19 de septiembre, dos sismos relevantes para nuestro país con una diferencia de 32 años entre estos. El ser humano, los mexicanos, estamos expuestos a este fenómeno, cuando no estamos preparados para enfrentarlo, se conjugan un efectos mortales y devastadores: los desastres.

Los tomadores de decisiones encargados de la reducción de riesgo de desastres deben demostrar, ante los eventos de desastre asociados a sismos, una alta capacidad de toma de decisiones en un entorno incierto o hiperincierto, de la urgencia a un pensamiento futuro con sensibilidad en los desastres y la gestión integral de riesgos, con planeación estratégica. A su vez, y primordialmente, con un involucramiento y cuidado del tejido social, en especial con la comunidad, para construir una legitimidad con la población, es decir con gobernanza.

Es por ello que, frente a desastres, los gobiernos tienen que reaccionar adecuadamente mediante una administración y gestión de la crisis, con herramientas que les permitan monitorear y reaccionar ante la posible pérdida de vidas humanas, bienes materiales, así como los bienes culturales y naturales de nuestro entorno.

Los desastres asociados a sismos, pueden tener importantes consecuencias en el ámbito económico y social, en el desarrollo de una región e inclusive llegar a comprometer la seguridad nacional de nuestro

país. Por tanto, su impacto puede incidir significativamente en el bienestar y calidad de vida de la población.

Algunos de los factores que construyen los desastres asociados a los sismos son cuantitativos: la magnitud, foco, duración, daños y pérdidas, así como la identificación y cuidado de las afectaciones a las operaciones vitales y estratégicas de ciudades. Otros que deben considerarse en un orden igual, los cualitativos: la capacidad de reponerse ante un desastre a través del liderazgo comunitario o vecinal como mecanismo gestor eficiente y eficaz para la conformación de la reducción del riesgo de desastre, indicadores etnográficos como el propio sentido de pertenencia al territorio, etc.

Hoy, con el uso de tecnologías, se pueden cuantificar estos factores, es decir, es posible juntarlos y medirlos para tener una forma de monitorearlos y crear umbrales que permitan vislumbrar la ocurrencia de un desastre y generar notificaciones y alertas sísmicas. Pero también se pueden manejar para crear escenarios futuros planeados estratégicamente (prospección), identificando niveles o umbrales que permitan una toma de decisiones para corregir su rumbo y que no sucedan o, de darse el caso, que lo hagan a mediano o largo plazo, con un menor impacto en caso de desastre.

El presente capítulo tiene como finalidad describir el Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX), su conformación y trascendencia en el ámbito nacional e internacional, su descripción general, así como su rol y desempeño desde una perspectiva en la Gestión Integral de Riesgos y en específico con el Modelo de Sistemas de Alerta Temprana que promueve la Estrategia Internacional de Prevención de Desastres de Naciones Unidas.

El riesgo sísmico en México

Durante siglos, los desastres se han manifiestado como: huracanes, terremotos, tornados, inundaciones, incendios o cualquier otro peligro asociado a la naturaleza o derivado de un acto humano, como el terrorismo (FEMA, 2007, p. 5), se presentan de súbito, sin ninguna advertencia, dejando su huella en la historia a través de crónicas e investigaciones, que relatan, en lo general, los efectos que han provocado en regiones o países, y que han evidenciado cambios en el rumbo social, económico, político, cultural e inclusive llegando a comprometer la seguridad nacional de un país.

Territorialmente, individuos y sociedades se ubican y están expuestas a riesgos, la probabilidad de desastre en nuestro territorio es inminente. Nos encontramos situados en una zona de alta actividad sísmica y volcánica provocada por el movimiento de 5 placas tectónicas, es por ello que dos terceras partes de nuestro país se encuentran en zonas de alto y muy alto peligro sísmico. De igual manera, del gran número de volcanes

que existen en México, a catorce de ellos se les considera activos, pues han tenido eventos eruptivos (CENAPRED, 2014b, P. 12).

Es así que, como lo muestra la Figura 1, todo el territorio se acompaña de niveles de peligro de los principales fenómenos perturbadores.

Figura 1. Ponencia del Ing. Enrique Guevara Ortiz, Director General del Centro de Prevención de Desastres, 2012

Fenómeno	Área (km²)	% del Territorio	Habitantes (millones)
Lluvias, ciclones e inundaciones	815'353	41%	31.3
Sismos	540'067	27%	31.0
Heladas	633'827	32%	21.3
Sequías	573'300	29%	21.2
Incendios	747'574	37%	28.4

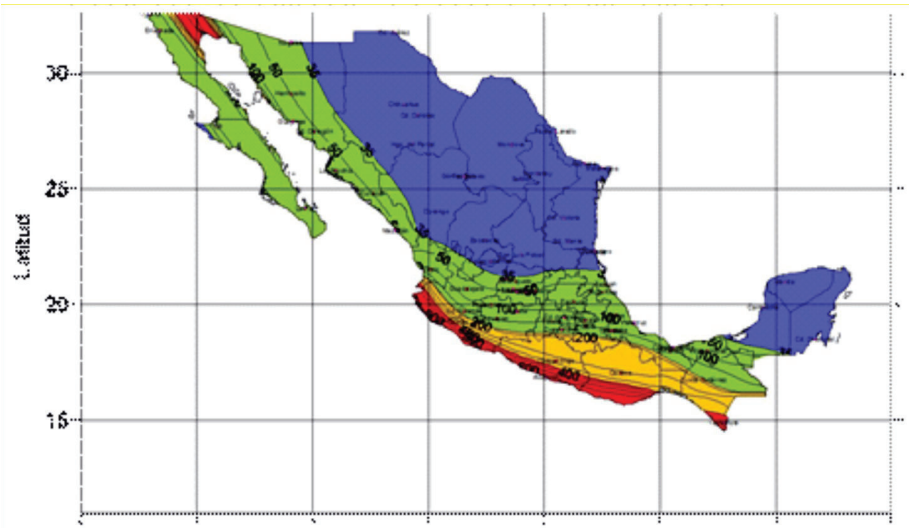
Fuente: elaboración propia.

El Servicio Sismológico Nacional, en su publicación "Zona de subducción mexicana y su potencial para un sismo mayor" (SSN 2019, p. 2) menciona que, considerando un retorno de 225 años en el fenómeno sísmico en México, se podría tener uno de magnitud máxima de 8.6, con la incertidumbre de no tener información más lejana a esos 225 años.

Desde el punto de vista económico, se observa que, desde los años 50, los daños provocados por desastres asociados a fenómenos naturales se han incrementado, pasando de $3.9 mil millones de dólares, a $63 MMDD en los años 90. Solo en el 2005, las pérdidas ascendieron a $220 MMDD (Organización de las Naciones Unidas, 2006, p. 8).

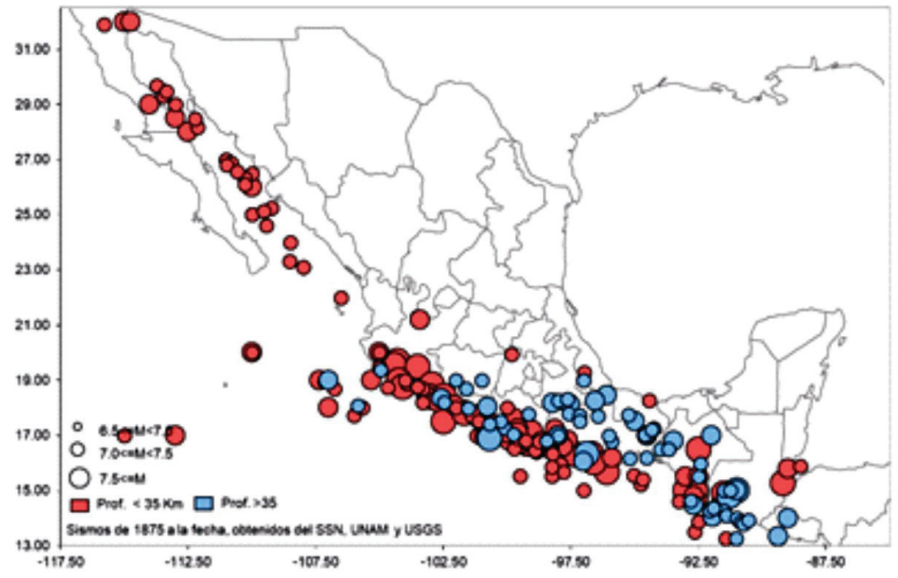
El Banco Mundial ha afirmado que las pérdidas que producen los desastres en los países en desarrollo, en términos del Producto Interno Bruto, son hasta 20 veces mayor que en los países desarrollados (Organización de las Naciones Unidas, 2006, p. 8), efecto que puede mitigarse con herramientas como el Sistema de Alerta Sísmica Mexicano.

Figura 2. Aceleraciones máximas de terreno para un periodo de retorno de 500 años



Fuente: Academia mexicana de Ciencias, 19 de enero 2012

Figura 3. Sismos de 1875 al siglo XXI



Fuente: SSN, UNAM y USGS

El Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C. (CIRES) y el Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX)

El Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C. (CIRES), es una asociación civil no lucrativa fundada en junio de 1986 para promover la investigación y desarrollo de tecnología aplicada a la instrumentación sísmica como medio útil para mitigar posibles desastres sísmicos, como los que sufrió la ciudad de México en 1985 y 2017.

A petición del Gobierno de la Ciudad de México, en diciembre de 1989 el CIRES desarrolló la primera etapa del Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX). El sistema entró en operación desde 1991, y como servicio público hasta 1993.

Con más de 25 años de ser el Sistema de Alerta Sísmica en México, el día de hoy la señal del Sistema llega a casi 26 millones de personas en las principales ciudades del Estado de México, Guerrero, Oaxaca, Puebla, Michoacán, Morelos y Tlaxcala, además de la ciudad de México.

Desde sus inicios, el CIRES ha participado activamente en congresos especializados de Ingeniería Sísmica y Sistemas de Alertamiento Temprano en México y en el extranjero. Ha colaborado con instituciones especializadas, teniendo como resultado la publicación de algunos trabajos en revistas y manuales especializados como la *International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior* (IASPEI); la *United States Geological Survey* (USGS); la *Electric Power Research Institute* (EPRI); el *EQE International*; la *American Geophysical Union* (AGU); y la *Centre National de la Recherche Scientifique, Universite Mont Pelliere II* (CNRS), entre otras.

Asimismo, ha publicado más de 25 artículos arbitrados y especializados en sistemas de alerta sísmica, siendo algunos de sus artículos más relevantes:

- "Earthquake Early Warning Service in Mexico City". Second Multilateral Workshop on Development of Earthquake and Tsunami Disaster Mitigation Technologies and their Integration for the Asia-Pacific Region. March 2000. Tokyo, Japon.
- "The Seismic Alert System in Mexico City and the School Prevention Program". Geophysical Hazards and Risks: Predictability Mitigation and Warning Systems, International Union of Geodesy and Geophysics. July 1999. Birmingham, UK.
- "The Seismic Alert System of Mexico City". International IDNDR-Conference on Early Warning Systems for the Reduction of Natural Disasters. September 1998. Potsdam, Germany.
- "Seismic Alert System of Mexico City". International IDNDR-Conference on Modern Preparation and Response Systems for Earthquake, Tsunami and Volcanic Hazards. April 1998. Santiago de Chile, Chile.

- "The Seismic Alert System of Mexico City". Workshop on Earthquake Early Warning Systems, The 29th General Assembly of the International Association of Seismology and Physics of the Interior. August 1997. Thessaloniki, Greece.
- "The Mexico City Seismic Alert System: Operation and Results". Space Technology for Improving Life on Earth, United Nations. September 1995. Graz, Austria.
- "Seismic Alert Systems in Mexico", Earthquake, Early Warning Conference", California, USA 13th July 2005 at Caltech Athenaeum.

El CIRES es miembro del Consejo de Protección Civil de la ciudad de México y está inscrito en el Registro Nacional de Instituciones Científicas y Tecnológicas del CONACyT. Asimismo, tiene el reconocimiento de instituciones encargadas de evaluar y difundir estos servicios en el Gobierno de México, como es el caso de la Secretaría de Seguridad Ciudadana Federal a través del Centro de Prevención de Desastres (CENAPRED) y el Servicio Sismológico Nacional (SSN) del Instituto de Geofísica de la UNAM, e inclusive centros de investigación con reconocimiento mundial, como el laboratorio de sismología de la Universidad de Berkeley, donde no solamente se le reconoce como el primer sistema de alerta sísmica abierta al público en el mundo, sino como uno exitoso y operacional (otros casos posteriores son México, Japón, Taiwán y Turquía) (Allen Richard, 2007, p. 635). Por lo anterior en nuestro país se le reconoce como el único sistema de Alerta Sísmica: el Sistema de Alerta Sísmica Mexicano como lo muestran las siguientes figuras de la 4 a la 10.

Figura 4. Alerta Sísmica

Fuente: CENAPRED, 2017.

Figura 5. Alerta sísmica

Fuente: Secretaría de Gobernación de México.

Figura 6. Servicio Sismologico Nacional

Fuente: Servicio Sismologico Nacional.

Figura 7. Servicios y Sistemas de Alerta en México

Servicios y Sistemas de Alerta en México

Proveen de información oportuna y permiten que las personas expuestas a una amenaza se preparen para una respuesta efectiva y reducir el riesgo.

Con el fin de mitigar el impacto que tienen los fenómenos naturales perturbadores en México, ya se han implementado algunos servicios y sistemas de alerta.

Sistema	Fenómeno	Información	Cobertura	Fecha de inicio	Momento de aviso
Servicio Sismológico Nacional	Sísmico	www.ssn.unam.mx	Nacional	1910	Aviso ante la ocurrencia
Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX)	Sísmico	www.cires.org.mx	Ciudades de México, Oaxaca, Chilpancingo, Acapulco y Morelia	1991	Segundos previos al arribo de un sismo que ya ocurrió. Depende de la distancia del epicentro y la energía del sismo
Sistema de Monitoreo del Volcán Popocatépetl	Volcánico	www.cenapred.gob.mx	Zonas aledañas al volcán	1994	Ante la ocurrencia de eventos
Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT)	Ciclón Tropical	http://smn.cna.gob.mx www.proteccioncivil.gob.mx www.cenapred.gob.mx/	Nacional	2000	Con 72 horas de anticipación
Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis	Tsunami	www.bit.ly/1wSMKlx	Costa del Pacífico Mexicano	2013	Para tsunamis locales, minutos de anticipación, para los regionales y lejanos o transoceánicos, horas
Sistema de Alerta Temprana de Incendios en México	Incendios forestales	www.conabio.gob.mx	Nacional	1999	Aviso ante la ocurrencia
Servicio Meteorológico Nacional	Meteorológicos	http://smn.cna.gob.mx	Nacional	1877	Aviso ante la ocurrencia y pronósticos

La organización y los planes efectivos de preparación también ayudan a hacerle frente a contingencias que se producen en muchas comunidades.

Los fenómenos naturales perturbadores no pueden evitarse, pero sí es posible disminuir su impacto con alertas oportunas que permitan reducir el riesgo.

Debes tener en cuenta que una alerta clara y oportuna, aunada al conocimiento de qué se espera y cómo reaccionar, significa la gran diferencia para las personas y sus comunidades

Fuente: Servicio Sismologico Nacional.

Figura 8. Laboratorio de sismología

UC Berkeley

Berkeley Seismology Lab

About Us · Earthquake Information · Research · Operations/Networks · Seismo Blog

Seismo Blog

What Mexico Has, California Is Lacking

Categories: Earthquake Early Warning | Mexico

April 19, 2014

This Good Friday started off as a lush, beautiful morning in Mexican's beach resort town of Acapulco. Thousands of tourists, mainly Mexicans, had gathered there to celebrate the Easter weekend, an important holiday in this mostly Catholic country. However, the peaceful atmosphere came to an abrupt end at 09:27 am local time, when an earthquake with a magnitude of 7.2 struck in the mountains about 80 miles northwest of the city. The seismic waves made the ground under Acapulco rattle and sway and frightened visitors and locals alike. Despite the strong shaking, no significant damage or injuries were reported.

The buildings in the popular resort town were not the only items shaken by the temblor. Within seconds of the earthquake's initiation about half a dozen seismic sensors in the Mexican state of Guerrero registered the initial seismic waves. These instruments are part of a dense network of accelerometers along Mexico's Pacific coast called Sasmex. This acronym stands for "Seismic Alert System in Mexico" and is comprised of almost 100 hundred sensors, which continuously transmit their recordings in realtime to a data center. There computers automatically sift through the data looking for suspicious signals. Once the computers recognized the shaking initially recorded by these six sensors in Guerrero, they went into action. First they calculated the location of the hypocenter, the magnitude of the earthquake and the time it would take for the shaking to reach major population centers in our neighboring country. Because the magnitude of quake near Acapulco easily exceeded a certain threshold, the computers issued a warning about the impending danger.

On Friday only 11 seconds passed between the origin time of the earthquake the issuance of the alert. A few seconds later this alert was broadcast by dedicated radio transmitters in Mexico's largest cities. Because Sasmex alerts are issued so quickly and seismic waves travel more slowly across the country, the alerts reached the population of Mexico City 71 seconds before the shaking started. Morelia, the largest city in Michoacan, had 58 seconds to prepare and the warning time for Chilpancingo, the capital of Guerrero, was still 35 seconds although the city is located closer to the quake's epicenter.

Mexico's government started to finance and build seismic alert systems shortly after the huge 8.1 quake which devastated Mexico City in September 1985. Several years ago the various earthquake early warning initiatives in the country were integrated into Sasmex, which currently is able to detect and warn of earthquakes along the Pacific coast and in the central volcanic belt. Soon the alert system will be expanded into the states of Veracruz and Chiapas.

A dense network of almost 100 seismic sensors (black dots) dots Mexico's Pacific coast as part of the country's seismic alert system. The yellow triangles are communication nodes. The opaque circles on this map depict future stations as an expansion of the network. The red star shows the location of Friday's earthquake. Map courtesy of Sasmex.

Mexico is not the only seismically active country in the world with such a warning system. Japan, Taiwan, Romania, Turkey and several other nations operate similar systems - but not the United States. Although the technology is available along the west coast (see blog on October 2, 2012) and a demonstration system is operating, a public alert system does not exist. California even has a law mandating Earthquake Early Warning, but this legislation has hardly any teeth, as it does not appropriate funds to build such a system. Mexico is clearly ahead of California when it comes to warning the populace of seismic shaking. (hrv092)

BSL Blogging Team: Who we ar

Recent Posts

- Sep 20, 2017: A Shock Without Aftershocks
- Sep 8, 2017: A Rare Quake Made Even Rarer
- Sep 3, 2017: North Korea's Most Powerful Bomb

Categories

- Bay Area (20)
- Buildings (3)
- Calaveras (3)
- California (11)
- Central California (4)
- Chile (4)
- Earthquake Early Warning (6)
- Earthquake Faults and Faulting (34)
- Haiti (3)
- Hayward (10)
- Induced Seismicity (3)
- Instrumentation (17)
- Italy (6)
- Japan (7)
- MOBB (3)
- Mendocino Triple Junction (5)
- Mexico (7)
- Nepal (3)
- North Korea (5)
- Nuclear Test (5)
- Ocean Bottom Seismometer (3)
- Oklahoma (4)
- Plate Tectonics (12)
- Preparedness, Risks, and Hazards (15)
- San Andreas Fault (12)
- Seismic Waves (11)
- Seismograms (4)
- ShakeAlert (3)
- Southern California (3)
- Surface Waves (3)
- Today in Earthquake History (17)
- Volcanoes (3)

View All Posts By Category

View Posts By Date

Fuente: Berkeley.

El tiempo de vida, reto mundial alertar y prevenir los efectos de los sismos

El SASMEX considera como tiempo de prevención el margen de segundos que otorga la oportunidad para alertar a la población, entre el inicio de la señal de alerta y el momento inicial del efecto sísmico en su fase de mayor intensidad, hasta la región donde se pretende reducir su riesgo. Así, en cada sitio, de acuerdo con la peligrosidad del efecto, este sistema puede emitir alertas. Algunos resultados relevantes fueron los alertamientos de los sismos del pasado 7 y 19 de septiembre de 2017. Para mayor referencia, las siguientes publicaciones del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico dan cuenta de ello:

Figura 9. Sistema de Alerta Sísmica Mexicano

Fuente: Sistema de Alerta Sísmica Mexicano.

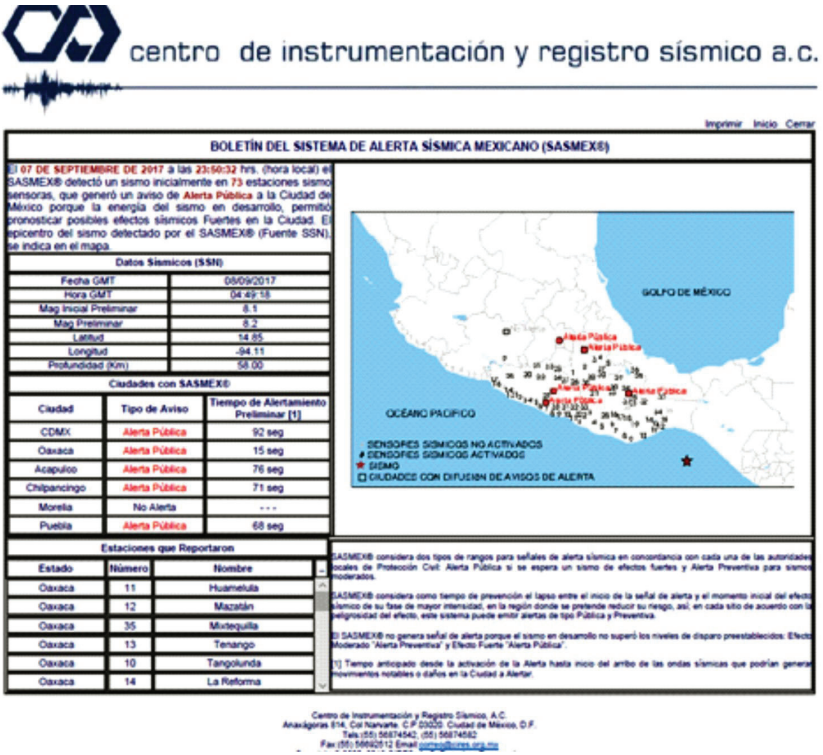
El SASMEX y los Sistemas de Alerta Temprana de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres con perspectiva comunitaria

Las afectaciones económicas, consecuencia de los desastres, son un factor estructural de análisis, y a su vez también la actuación de los líderes, organizaciones y la sociedad, en su preparación para enfrentar y administrar las emergencias y las crisis asociadas a los desastres.

Al analizar los eventos desastrosos que ha vivido la humanidad, siempre se ha identificado a las personas responsables de la acción e inacción tomada durante el mismo, generando por lo regular un reclamo natural de la sociedad y los medios de comunicación hacia su actuación, teniendo en la mayoría de

las veces una evidencia cierta de sus apreciaciones, es decir la mala actuación de esas personas, ya sea porque no tenían el perfil, las características o los recursos necesarios para tal encomienda.

Figura 10. Boletín del sistema de alerta sísmica mexicano



Fuente: Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C.

En 2005, en Estados Unidos, el huracán Katrina fue la mega falla en la administración de emergencias. El gobierno encabezó una pobre administración y un pobre liderazgo en la crisis que paralizó las capacidades administrativas y de gobierno (Ali, 2007, p. 150).

Este hecho tuvo como mayor significado que el país más poderoso del mundo fue puesto a prueba, y falló. Por esta razón se piensa en el caso hipotético de una "desestabilización económica y política mundial debido a que en una misma temporada sucedieran dos o tres Katrinas en Estados Unidos". Queda entonces de manifiesto que los eventos de crisis asociados a fenómenos naturales son semejantes a los provocados por el hombre, es decir,

un enfrentamiento entre la naturaleza y Estados Unidos, en donde podría resultar derrotado etse país (Ali, 2007, p. 154).

Debido a estos cambios repentinos provocados por las crisis, se debe pensar en condiciones complejas, sistemas de manejo de administración, que puedan transformar la lectura del caos y las situaciones de crisis sin observar dinámicas de sorpresa, es decir, los denominados "sistemas de administración sorpresa" (Ali, 2007, p. 150).

Algunas de las fallas técnicas que originan un desastre son típicamente la comunicación y preparación, como sucedió con el huracán Katrina, que afectó a Nueva Orleans a finales de agosto del 2005. Aunque en este caso hubo fallas adicionales: el conocimiento del riesgo y una falta de la apreciación pública y política plena de la vulnerabilidad, diques inadecuados y las consecuencias de su falla estructural o desbordamiento por oleadas de tormenta. En el caso del tsunami del Océano Índico, en diciembre de 2004, se presentaron fallas importantes desde el monitoreo, la medición de umbrales, la diseminación de alertas y la preparación de la población y las autoridades (Ali F 2007 p.150).

Katrina nos mostró cómo el racismo y el nivel socioeconómico de la población afroamericana fueron factores que influyeron en los decesos del evento. Un porcentaje de las personas vivían en la pobreza, sin capacidad de resiliencia, incluida la mala calidad de construcción de sus inmuebles (Kathleen T., 2015).

Ante casos de desastre, los gobiernos tienen que reaccionar adecuadamente mediante una correcta administración de la crisis, ya que es latente la pérdida de vidas humanas y bienes materiales, y por ende la pérdida de legitimidad (Ali, 2007, p. 149).

Existen evidencias para probar la legitimidad en los gobiernos, en específico para la administración pública moderna, en desastres asociados a los fenómenos naturales: pensar en lo "inconcebible e hiperincierto", es decir, un cambio de paradigma que nos orienta a tratar a los desastres asociados a la naturaleza igual que a los actos de terrorismo y revoluciones violentas, ya que por sus efectos son iguales (Ali, 2007, p. 149).

La "urgencia" es el pensamiento administrativo actual, y a su vez la falla central en las crisis. Se debe pensar a largo plazo, cuando exista tendencia a afrontar duras y complejas crisis, encarando un mundo más inconcebible, impensable y desconocido, como en el caso del calentamiento global (Ali, 2007, p. 149).

La capacidad de respuesta antes, durante y después de un desastre es proporcional al desarrollo de la población, su grado de vulnerabilidad y el riesgo al que está expuesta; por esta razón, lasautoridades competentes y un entrelazado transdisciplinario de gobierno y sociedad en su conjunto tienen que integrarse para evitar los desastres (Audefroy Joel, Padilla Raymundo, 2018, p. 40).

En general, debe existir una respuesta basada en la resiliencia, donde la Administración Pública de los Gobiernos, y sus políticas desarrolladas, deben atender los componentes que establece la Gestión Integral de Riesgos. Esta respuesta debe tener una base estructural sólida de recursos, que se otorguen de manera preventiva para análisis, estudios, construir mejor, así como para la atención de la emergencia y reconstrucción. Por último es indispensable el análisis especializado de prospección estratégica con la materialización de las variables que se identifiquen, para mitigar y reducir el riesgo.

El capital humano, los recursos materiales y financieros, así como los servicios asociados, deben se parte de una estrategia, necesitan objetivos, metas claras y planes viables, que en su conjunto integren las variables físicas y sociales que construyen los desastres. Se debe iniciar con acciones de gobierno que obliguen a identificar estas necesidades, dar y administrar los recursos y ofrecer los resultados en un entorno de transparencia que, en armonía con la población, protejan su entorno para enfrentar los efectos provocados por los desastres.

Una nación con fondos para la prevención y atención de desastres es preventiva. México tuvo en el sexenio 2007 a 2012 su mayor previsión de fondos (Audefroy Joel, Padilla Raymundo, 2018, p. 19). Sin embargo, por la pobre preparación y falta de sensibilidad y entendimiento de estos mecanismos financieros, diversos actores clave pusieron a su suerte este mecanismo, razón por la cual debe tenerse una decisión estadista de estos fondos como base estructural y primaria para el desarrollo y seguridad nacional de México.

La capacidad del tejido social, compuesto por individuos, comunidades y organizaciones, para resistir impactos, de recuperarse, aprender y reducir el daño en perspectiva y prospectiva (Sandoval, V. y Sarmiento J. P. 2018, p. 44) estructuran los componentes de la resiliencia. El análisis cualitativo y cuantitativo de estos debe ser el componente actual y futuro para la elaboración de indicadores, como los contables o financieros internacionales para una mesura en comparación local, regional, nacional o internacional.

La construcción de tejido social vulnerable y expuesto se observa por carencia de perspectiva en el gobierno y sus acciones. Las políticas públicas en asentamientos urbanos son diseñadas y ejecutadas para la población 'formal' y establecida (Sandoval, V. y Sarmiento, J. P. 2018, p. 44), dejando de lado, generalmente, la realidad marginal de las familias que llegan con sus precarios recursos a estos lugares; excluyen factores como la migración por desarrollo económico nacional, desplazamiento internacional o uno tan sencillo como el arraigo cultural comunitario.

Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) forman parte de la gestión de riesgos y la reducción de desastres, que enmarca y promueve la Estrategia Internacional para la Prevención de Desastres de Naciones Unidas; con sus cuatro componentes son un mecanismo que permite crear un puente que vincula el conocimiento del riesgo omonitoreo y alerta-difusión y

comunicación de notificaciones y alertas-preparación de la población y autoridades, creando una cadena de valor que antes, durante y después de un evento de desastre genere una reacción aterrizada en acciones operativas de mitigación de riegos y sus consecuencias. Por esta razón, su propia definición y acción se estructuran por la interacción de un tejido construido por multidisciplinas, interdisciplinas, transdisicplinas, pero a su vez exhiben la insertidumbre de las mismas, generando escenarios tales como la falta de comunicación del riesgo.

Tenemos miles de paradojas como ejemplo. Nos comunicamos del espacio a la tierra, sin embargo, no nos notifican o alertan de un incendio que está al lado de nuestros hogares. Tenemos mucha tecnología de monitoreo del peligro, de conocimiento del mismo, pero nunca se enfocan a un fin sencillo y estructural: el cuidado de la humanidad.

Hoy, por los avances tecnológicos, se debería pretender evolucionar para crear un acervo informativo y de conocimiento (big data para la gestión de riesgos) que sea utilizado para el análisis histórico, permitiendo la prospección de escenarios que permitan anticiparse a la ocurrencia de un desastre. La anticipación estratégica permite visualizar y monitorear escenarios futuros, mecanismos que toman las personas de decisiones para cumplir con sus objetivos.

Uno de los propósitos que los Sistemas de Alerta Temprana plantean es cambiar el paradigma del pensamiento de los tomadores de decisiones con base en las ventajas y los beneficios provenientes de su uso en todos los órdenes de gobierno y en la sociedad en su conjunto, tal acción trandisciplinaria debe obedecer a una doctrina: pensandos en la gente.

La comunicación de riesgos y alertas debe ser orientada a la población de una manera comprensible, oportuna y fiable. Los mensajes de avisos y alertas generados por los Gobiernos en sus diferentes estratos estratégicos. tácticos y operativos, así como la comunidad científica y tecnológica que monitorea y pronostica los agentes perturbadores, deben atender los requerimientos y ser orientados a la población. Los siguientes conceptos proporcionan u acercamiento a los insytrumentos de difusión de la información:

- La expresión "alerta temprana" se utiliza en muchos campos para denominar a la provisión de información sobre una circunstancia peligrosa emergente que permita adelantarse a los siniestros para reducir los riesgos involucrados.
- Los sistemas de alerta temprana existen para riesgos geofísicos y biológicos naturales, emergencias sociopolíticas complejas, riesgos industriales, riesgos para la salud personal y muchos otros relacionados.
- La Estrategia Internacional de Reducción de Desastres de las Naciones Unidas, define a los SAT como "El suministro de información oportuna y efectiva, a través de instituciones identificadas, que permite a las personas expuestas a un peligro tomar medidas para evitar o reducir

su riesgo y prepararse para una respuesta efectiva" (Organización de las Naciones Unidas, 2006b).

Estos conceptos implican el involucramiento de muchas ciencias, las naturales, las sociales, las exactas, que en su conjunto aporten, con sus componentes teóricos y prácticos, soluciones y herramientas para los SAT.

Acorde lo estipulado por la EIRD, un SAT debe incluir cuatro elementos interactivos (Figura 11).

1) Conocimiento del riesgo.
2) Servicio de monitoreo y alertamiento.
3) Difusión y comunicación.
4) Capacidad de respuesta.

Figura 11. Elementos del SAT

Fuente: elaboración propia.

Los cuatro elementos tienen una secuencia lógica, y a su vez, cada elemento tiene enlaces directos y bidireccionales e interacciones entre sí.

El servicio de monitoreo y alertamiento es el más conocido y amplio, pero la experiencia ha demostrado que los pronósticos no son suficientes para reducir pérdidas. El factor humano y su reacción tienen tanta importancia como lo anterior.

Estos elementos deben establecerse con una visión estadista, no de política pública corta. Es necesario un fuerte compromiso político y una institucionalidad duradera, que a su vez dependen de la conciencia pública, y una apreciación del beneficio de los sistemas de alertamiento efectivos. La conciencia pública y el apoyo a menudo son muy altos inmediatamente después de un evento desastroso, dichos momentos se pueden capitalizar en desarrollar, fortalecer y asegurar la sostenibilidad de los SAT.

Los desastres nacen de múltiples factores naturales y sociales, un SAT debe monitorear todos los factores relevantes para un riesgo en particular. Desde esta perspectiva, es deseable controlar y proporcionar alerta temprana y previsión, no solo sobre la precipitación a corto plazo y las condiciones geofísicas, también sobre los factores relevantes a largo plazo, como el deterioro al medio ambiente, las prácticas de desarrollo que aumentan los riesgos y proyectos, cambios de políticas que alteran los riesgos, el estado de las comunicaciones sociales y capacidades, tendencias en los mercados de alimentos, tendencias de asentamiento y migración, conflicto y la salud pública.

Adicional a ello, uno puede argumentar que el ciudadano y los titulares de Protección Civil no están tan preocupados por los detalles técnicos o científicos de los peligros, sino más bien, el paquete de riesgos que enfrentan y cómo mitigarlos y prepararse para ellos. Esto implica un enfoque que aborde todos los riesgos relevantes en un entorno integrado, y no como sistemas independientes desconectados, que es lo más apropiado para la gestión de riesgos. Tal enfoque de "peligro múltiple" debería proporcionar sinergias y eficiencias de costos, por ejemplo: la recopilación de datos y procesamiento o en los esfuerzos de preparación pública, lo que debería ayudar a mantener capacidades de advertencia para los peligros más infrecuentes, como los sismos en México.

Cada peligro tiene sus propias características: los tsunamis y marejadas ciclónicas causan inundación, pero los métodos de detección y monitoreo, el tiempo de entrega, la duración del peligro y las acciones de respuesta son muy diferentes entre ambos fenómenos. En un enfoque multi amenzas, se debe adaptar a las necesidades de cada peligro y construir sobre la base específica las capacidades técnicas requeridas y las capacidades institucionales disponibles. Es necesario un "sistema de sistemas" coordinado.

En mayo de 2017 se llevó a cabo la Conferencia Internacional sobre Sistemas de Alerta Temprana, auspiciada por la Organización Mundial de Meteorología de las Naciones Unidas, en el marco de la Plataforma Global para la Reducción de Riesgo de Desastres en Cancún, México. Derivado de los trabajos realizados en dicho evento, se actualizó la Lista de Comprobación para evaluar los SAT, misma que se adaptó con el fin de diseñar un tablero de control que permita evaluar de manera gráfica y sencilla los cuatro elementos básicos de los SAT.

De acuerdo con Naciones Unidas, los sistemas de alerta temprana deben contar con cuatro elementos principales. En caso de no considerarlos todos de manera integral en su implementación, sus alcances serán limitados y no se cumplirá a cabalidad el objetivo de su implementación (Figura 12).

Figura 12. Prioridad de acciones en el marco Acción de Hyogo y Sendai

Fuente: Sendai framework for disaster risk reduction.

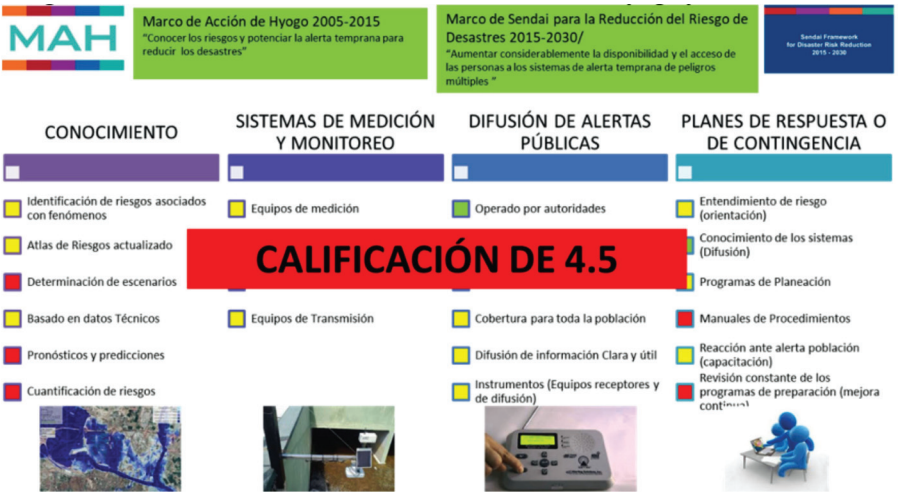
Los sistemas de alerta de desastres desde la perspectiva histórica y etnográfica, ante una amenaza natural intensa, se desarrollan con acciones que permiten monitorear un fenómeno, alertar a la población y mitigar los daños que, sumados a múltiples respuestas sociales, son parte de un complejo proceso adaptativo (Audefroy Joel, Padilla Raymundo, 2018, p. 151).

En este entorno, las estrategias que desarrollan planes se estructuran, no se mimetizan a una etnografía comunitaria. Se identifican las con las prácticas compuestas por la complejidad de una acción y el periodo de duración, es decir, actividades simples que desarrollan individuos o grupos por generaciones y que son su propio compendio para la reducción de riesgo de desastre (Audefroy Joel, Padilla Raymundo, 2018, p. 153). Estas actividades simples que buscan la supervivencia son propias de la comunidad y, como se mencionó anteriormente, sumadas delicadamente y con amplia perspectiva de protección, deben formar parte de los planes y estrategias del gobierno.

En esta perpectiva etnográfica, los actores principales son la propia comunidad, en la cual deben ser corinstas aquellos con mayor edad y amplia experiencia en lo que refiere a los efectos y daños de ocasionan los huracanes (Audefroy Joel, Padilla Raymundo, 2018, p. 157).

Considerando la evaluación de un SAT, y realizando una Evaluación Previa del SAT en el Sismo magnitud 7.1 del 19 de septiembre de 2017 en la CDMX, tenemos el siguiente resultado (Figura 13):

Figura 13. Prioridad de acciones en el marco Acción de Hyogo y Sendai



Fuente: Sendai framework for disaster risk reduction.

Conclusiones

México cuenta con un Sistema de Alerta Sísmica maduro y de referencia internacional en el ámbito científico y de seguridad humana que mitiga, con prevención, los efectos de posibles desastres sísmicos. Es una herramienta estructuralmente fundamental para la reducción de riesgo de desastres y aportación inconfundible a una continuidad de operaciones de las ciudades y de cuidado a las comunidades que, con un reforzamiento en su conformación desde la perpectiva de la Gestión Integral de Riesgos, es y será un legado trascendental a nuestras demás generaciones.

De la evaluación previa de análisis del desempeño del SASMEX desde el punto de vista de la Gestión integral de riesgos y de los sistemas de alerta temprana en el evento del 19 de septiembre de 2017 se concluye que:

- Se debe fortalecer la divulgación del conocimiento y riesgo del fenómeno sísmico en un lenguaje ciudadano, enfocado a la comunidad, así como a las autoridades gubernamentales, del sector privado y civil en sus estratos estratégico, táctico y operativo.

- Se debe reforzar, ampliar y mantener el Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX) acorde a las necesidades de cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible de Naciones Unidas. Asimismo, en el diseño de los sistemas de difusión se debe:
- Cubrir con características que exigen una alta disponibilidad y accesibilidad a la población en su territorio, es decir, evaluar las coberturas de los múltiples medios para que llegue a las comunidades más vulnerables del país.
- No sobre tecnificar la funcionalidad de las TICs, ya que laxan la evaluación de los verdaderos sistemas de difusión de alertas masivas.
- Legislar con perpectiva nacional a cerca de las fuentes de alertamiento masivo, así como las tecnologías para alertar a la población.
- Se debe instalar el Sistema Nacional de Alertas Tempranas Multiriesgo basado en estándares y mejores prácticas como el Protocolo de Alerta Común (CAP) con una infraestructura robusta y enfocada a desastres, sin engaños en su construcción tecnológica y con la perpectiva de la realidad de nuestro país, que permita una colaboración coordinada y colaborativa. Asimismo, respetar la autonomía de los Estados y Municipios para dar su propio Microalertamiento con centroides de riesgo definidos por el impacto de los efectos sísmicos.
- Se debe reforzar la preparación a través de Protocolos y Procesos que involucren técnicas como el Comando de Incidentes con perspectiva y verdadera participación comunitaria para prevenir y atender desastres; asimismo hacer una divulgación y mimetización de la cultura de la prevención en la sociedad con misión de resiliencia comunitaria e inclusión etnográfica. Crear profesionalismo y una conciencia de liderazgo en crisis transdisciplinaria multi gubernamental en los tomadores de decisiones para su mejor desempeño en la atención a los desastres. De ser así, no solamente se crearía ese preciado vínculo colaborativo de pertenencia territorial gobiernocomunidad, se estaría creando una verdadera gobernanza comunitaria ante desastres que, y debido a la protección humana, puede ser un vínculo de integración multifiuncional gubernamental con la sociedad.

El SASMEX y su cobertura de transmisión que le llega a más de más de 26 millones de mexicanos está construido con una infraestructura ROBUSTA Y PROPIETARIA GUBERNAMENTAL (en VHF como en Estados Unidos, Canadá, Japón y muchos países más) de transmisión de mensajes de emergencia a la población de múltiples riesgos que potencialmente es un referente primordial como solución de alertamiento para países desarrollados y la mejor solución para países en vías de desarrollo. Esta infraestructura se puede replicar y expandir, para así constituir un Sistema Nacional de Alertas Tempranas Multiriesgo, que al ocupar normas y estándares internacionales

se hace compatible con los sistemas de alerta de emergencias con las mejores prácticas internacionales que marca Naciones Unidas y que en un momento dado, y su uso en Estado Unidos de América y Canadá, se dejan estructuralmente las bases para crear el Sistema de Alertas Tempranas de Norte América (México, Estados Unidos y Canadá), y que se puede extender a Centro y Sur América para crear el Sistema de Alertas Tempranas de América.

Bibliografía

Ali F., 2007. "Learning from the Katrina Crisis: A Global and International Perspective with Implications for Future Crisis Management. Public Administration Review: Administrative Failure in the Wake of Katrina", 67, 149-159. Extraído: el 24 de marzo de 2008, de ABI/INFORM *Global database*. (Document ID: 1409095471).

Allan L., 2003. *La Gestión Local del Riesgo. Nociones y precisiones en torno al concepto y la práctica*. PNUD.

Allen Richard, 2007. *Earthquake Hazard Mitigation: New Directions and Opportunities*. University of California Berkeley, Berkeley, CA.

Audefroy Joel, Padilla Raymundo (2018). *Desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos*. Instituto mexicano de Tecnología del Agua.

CENAPRED, 2014. *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el 2003*, 17-21. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.

CENAPRED, 2014b. "Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastre en México". *Atlas nacional de riesgos de la República Mexicana*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.

CENAPRED, 2017, *Sistema de Alerta Temprana*, Gobierno de México.

Federal Emergency Management Administration (FEMA), 2007. *About Disasters. Estados Unidos*: FEMA. http://www.fema.gov/about/index.shtm. [Consulta 7 de sep. 2007]

Godet M. *et al.*, 2000. "La caja de Herramientas de la prospección estratégica". *Cuadernos de LIPS*, número 5. Laboratoire d'Investigation Prospective et Stratégique.

Kathleen T., 2015. *Antecedentes de los estudios de los riesgos. Desigualdad Social, Peligros, y Desastres*. Estados Unidos.

Organización de las Naciones Unidas, 2006. *Encuesta Global de Sistemas de alerta temprana: evaluación de las capacidades, deficiencias y oportunidades hacia la construcción de un sistema de alerta temprana mundial para todas las catástrofes naturales. Componentes para la efectividad de alertamientos tempranos*. ONU EIRD

SSN, 2020. *Zona de subducción mexicana y su potencial para un sismo mayor*. Servicio Sismológico Nacional, UNAM, México, extraído el 1 de septiembre de 2020 de: www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/otros/SSNRE-Subduccion-y-potencial-de-sismo-mayor.pdf

4.4. Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT)

Enrique Guevara Ortíz
Gilberto Castelán Pescina
Paulino Alonso Rivera

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)

Introducción

Un componente importante, y necesario, en la gestión del riesgo de desastre es el monitoreo de los eventos naturales y los sistemas de alerta temprana. Las redes de monitoreo permiten la recolección de información para comprender y mejorar el conocimiento científico de amenazas y de los fenómenos llamados perturbadores, punto de partida para la implementación de políticas efectivas de prevención y mitigación. Por otro lado, los instrumentos, redes de observación y tecnologías empleadas en el monitoreo y vigilancia de los fenómenos permiten detectar, dar seguimiento y pronosticar las amenazas naturales que pueden impactar a la población. Por lo tanto, los sistemas de monitoreo contribuyen también a la toma efectiva de decisiones ante situaciones de riesgo; permiten alertar oportunamente a la población en riesgo, pues su principal objetivo es salvaguardar la vida. Se ha aceptado internacionalmente, y se ha demostrado, que los sistemas de alerta temprana constituyen un componente vital en la reducción del riesgo de desastres.

Un Sistema de Alerta Temprana (SAT) es un conjunto de elementos que interactúan entre sí para proveer de información oportuna a las autoridades y a la población amenazada por peligro. Esto les permitirá actuar con tiempo suficiente, y de una manera apropiada, para reducir la posibilidad de pérdidas de vidas, así como daños personales, o a sus propiedades y al medio ambiente.

Marco Internacional para la Reducción de Riesgos de Desastres y los Sistemas de Alerta Temprana

Como parte de las iniciativas de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (ISDR) se han llevado a cabo tres conferencias internacionales sobre la alerta temprana. La última de ellas tuvo lugar en marzo de 2006 en Bonn, Alemania, y nuevamente se hizo énfasis en

el desarrollo de sistemas de alerta centrados en la gente y la necesidad de que éstos sean parte esencial en las políticas de estado. Muchas otras iniciativas se han implementado para promover la instalación de sistemas de alerta efectivos. Así, en el 2003, como una recomendación de la segunda Conferencia Internacional sobre Sistemas de Alerta (EWC II), se creó la Plataforma para la Promoción del Alertamiento Temprano (UN, 2006a).

En consecuencia, una alerta clara, recibida a tiempo y unida al conocimiento de qué se puede esperar y cómo reaccionar, puede significar para las personas y sus comunidades la diferencia entre la vida y la muerte o la supervivencia económica y la ruina total.

En el 2006, la Secretaría de la ISDR presentó la versión final sobre una investigación encaminada a conocer los avances en los sistemas de alertamiento y cuáles son los vacíos y defectos que aún se tienen (*Global Survey of Early Warning Systems*). El informe señaló que se habían realizado progresos importantes en el desarrollo del conocimiento científico sobre amenazas y riesgos, así como en el desarrollo de tecnologías de la información y comunicación. Sin embargo, era necesario mejorar los pronósticos y predicciones, así como considerar los mecanismos para comunicar los alertamientos y preparar a la población para actuar de manera adecuada (UN, 2006b).

En 2015, las Organización para las Naciones Unidas (ONU), a través de su Oficina para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDRR por sus siglas en inglés), juntamente con la Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés), así como agencias internacionales y locales, crearon la Red Internacional de Sistemas de Alerta Temprana Multi-amenaza (*International Network for Multi-Hazard Early Warning Systems IN-MHEWS*). Esto como principal acuerdo de la Sesión dedicada a los Sistemas de Alerta Tempana en la Tercer Conferencia para la Reducción del Riesgo de Desastres llevada a cabo en la Ciudad de Sendai, Japón. Esta alianza de instituciones facilitaría experiencia y buenas prácticas para el fortalecimiento de los Sistemas de Alerta Temprana con enfoque Multi-amenaza a manera de introducir dichos sistemas como un componente integral dentro de las estrategias para reducir los desastres, atender el proceso de adaptación al cambio climático y la construcción de sociedades resilientes. Por lo tanto, esta iniciativa abona a la implementación del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015 – 2030, en especial la meta global G, que se refiere a los Sistemas de Alerta Temprana con enfoque Multi-amenaza y al plan de acción de reducir el riesgo de desastres para la resiliencia (WMO, 2018).

Con el compromiso de contribuir a alcanzar la meta G del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres, las instituciones nacionales y las agencias internacionales que intervienen en la operación de los Sistemas de Alerta Temprana decidieron concretar la Red Internacional de Sistema de Alerta Temprana Multi-amenza. Contemplaban guiar a los países en la imple-

mentación de los sistemas, sobre todo para compartir lecciones aprendidas en lo concerniente a las modalidades de inversión para mejorar la cualidad de resiliencia en la sociedad (UN, 2015: 11).

En 2019, se llevó a cabo la Segunda Conferencia Internacional de Sistemas de Alerta Temprana con enfoque Multi-amenaza (MHEWC-II) previo a la Plataforma Global para Reducción del Riesgo de Desastres, 2019 que tuvo sede en Ginebra, Suiza (UN, s/f.). Esta última conferencia quedó alineada sobre los cimientos de los resultados de la Primer Conferencia Internacional de Sistemas de Alerta Temprana con enfoque Multi-amenaza (MHEWC-I) que se realizó en 2017, en Cancún, México, con el soporte de 450 expertos, quienes establecieron como eje de discusión la idea de salvar vidas a través de estos sistemas (WMO, 2018) (Fotografía 1).

Fotografía 1. Primera Conferencia Internacional de S Sistemas de Alerta Temprana Multi-amenaza, 2017

Fuente: CENAPRED.

Los Sistemas de Alerta Temprana

Los sistemas de alerta temprana centrados en la gente tienen como objetivo facultar a las personas y a las comunidades que se encuentren en peligro para que actúen con tiempo suficiente y de manera adecuada para reducir daños personales, y así evitar la pérdida de la vida y reducir daños a las propiedades y el medio ambiente. Esto con la finalidad de cumplir el objetivo de un Sistema de Alerta temprana y ser un sistema efectivo, necesita considerarse además de las bases científicas y técnicas, un enfoque basado en la población expuesta a los riesgos incorporando todos aquellos factores inherentes al fenómeno natural como de las vulnerabilidades, en el corto y largo plazo.

A continuación, se citan varias de las recomendaciones emanadas de las iniciativas internacionales mencionadas por las Naciones Unidas, así como algunas aportaciones y consideraciones adicionales:

Los elementos clave

Un sistema de alerta temprana completo y efectivo se compone de cuatro elementos interrelacionados. Abarca desde el conocimiento de los riesgos que se enfrentan y el sistema de medición, hasta la preparación y la capacidad de respuesta, reforzados por mecanismos de comunicación efectivos. La falla de una de las partes puede conducir a la falla de todo el sistema (Alonso, *et al.*, 2013: 59).

Con la finalidad de lograr la sustentabilidad de los cuatro elementos en el largo plazo, es necesario un fuerte compromiso político y el convencimiento de los beneficios que representan los sistemas de alertamiento (UN, 2006a: 9).

Los mejores sistemas de alerta temprana también mantienen una estrecha relación entre todos sus elementos, que son sustentados por la comunicación y la eficacia en la gobernabilidad y las disposiciones institucionales (Figura 1).

a) Conocimiento de riesgos

El desarrollo de los alertamientos oportunos depende de la generación precisa de los escenarios de riesgo. Indicano el impacto probable de los peligros en grupos vulnerables. Los riesgos surgen de la combinación de los peligros y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos (población, infraestructura, medio ambiente) en determinado lugar o región (Alonso, *et al.*, 2013: 61).

Las evaluaciones de riesgo requieren la recolección sistemática, el análisis de datos, y deberían tomar en cuenta la dinámica y la variabilidad de peligros, como de sus vulnerabilidades que surgen de procesos como la urbanización, el cambio en el uso de tierras rurales, la degradación ambiental y el cambio climático. Conocer los riesgos ayuda a motivar y sensibilizar a la gente, a priorizar las necesidades de sistemas de alerta temprana y a orientar los preparativos de respuesta y las actividades de prevención de desastres (Alonso, *et al.*, 2013: 61).

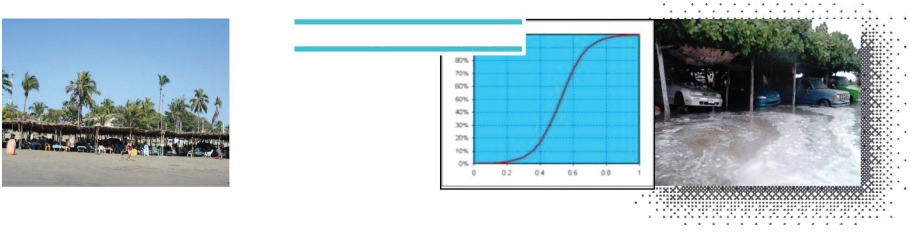
Un aspecto fundamental en el diseño de los sistemas de alerta es determinar de manera precisa el tiempo que se cuenta para tomar las acciones correspondientes de protección. En este mismo sentido, es deseable prever no solo información sobre los fenómenos y sus correspondientes alertamientos en el corto plazo, si no también aquellos factores que en un futuro pueden representar riesgo y que permitan con anticipación una preparación adecuada. Ejemplos de esto son el cambio climático o la degradación ambiental, entre otros (Alonso, *et al.*, 2013: 62).

Por lo anterior, conocer los riesgos ayuda a sensibilizar a la gente, dando así priorización a las necesidades de sistemas de alerta temprana y a orientar los preparativos de respuesta y las actividades de prevención de desastres (Fotografía 2).

Figura 1. Sistema de Alerta Temprana (SAT)

Fuente: Alonso, *et al*., 2013: 60.

Fotografía 2. Preparativos



Fuente: CENAPRED.

b) Sistemas de medición y monitoreo para el alertamiento

Los servicios de alerta constituyen el núcleo del sistema y deben contar con una base científica para predecir y/o pronosticar la ocurrencia o el impacto de una amenaza (Alonso, *et al*., 2013: 62).

El monitoreo debe de ser continuo las 24 horas al día, a través de diversos parámetros relacionados con el fenómeno y la detección de precursores que permitan generar alertamientos precisos y oportunos. Asimismo, cuando sea posible, los servicios de alerta para diferentes peligros deberían ser coordinados para aprovechar los beneficios de redes compartidas de instituciones, procedimientos y de comunicación (Alonso, *et al*., 2013: 62).

Existen avances en la precisión y confiabilidad de los instrumentos de monitoreo y la integración de redes de observación. Los avances tecnológicos

e informáticos han contribuido para conocer y entender mejor los fenómenos naturales. Sin embargo, es necesario reconocer que siguen siendo, en muchos casos, un proceso difícil de modelar para las ciencias físicas debido a sus características aleatorias y a sus niveles de incertidumbre e imprecisión asociados (Alonso, *et al*., 2013: 62).

Predecir un evento extraordinario es determinar con certidumbre cuándo, dónde y de qué magnitud será, lo cual, con el estado actual del conocimiento, no es posible para todos los fenómenos que pueden generar desastres. La investigación científica y la instrumentación mediante redes de vigilancia y monitoreo permiten en algunos casos predecir o detectar eventos, que dependiendo de la certeza o del tiempo que tardan sus efectos en ser sentidos en un sitio, proporcionan la posibilidad de declarar estados de alerta y/o de alarma para la protección o evacuación de la población (Alonso, *et al.*, 2013: 62-63).

Asimismo, dependiendo del nivel de certeza que se tiene de la ocurrencia del evento se pueden definir diferentes estados de alerta. Usualmente, cuando éste lo permite, se utilizan diferentes estados que, de acuerdo con la gravedad de la situación, significan para las instituciones el alistamiento, la movilización y la respuesta. En ocasiones dichos estados son identificados mediante colores o nombres que no sólo se utilizan para informar de una manera práctica a la población acerca de la inminencia de un evento sino, también, para demarcar las áreas de influencia del mismo (Alonso, *et al*., 2013: 63).

Un cambio de alerta normalmente es sugerido o recomendado por una entidad de carácter técnico que lleva a cabo la vigilancia y monitoreo del fenómeno, sin embargo, es usual que el cambio sea decidido por las autoridades políticas de la región o la ciudad, excepto en el caso de que, por la ocurrencia repentina de un evento peligroso, sea necesario activar alarmas que indican dicha situación sin previa concertación o consulta. Es importante que la población comprenda como se realiza un cambio en el nivel de una alerta y tenga claridad en las siguientes acciones que deberá realizar (Alonso, *et al*., 2013: 63) (Fotografía 3).

c) Difusión y comunicación

La funcionalidad de un Sistema de Alerta Temprana no termina una vez que se ha comprendido el riesgo y se haya detectado la ocurrencia, o posible ocurrencia de algún evento que podría causar daños considerables, sino que se debe asegurar que los alertamientos lleguen a las personas en peligro y que contengan información clara y útil que permita a la población actuar de manera apropiada. La diseminación de los alertamientos debe estar basada en protocolos establecidos y soportada por una adecuada infraestructura de comunicación. Es necesario identificar previamente los canales de comunicación e instrumentos a nivel regional, nacional y local, y designar un vocero con autoridad y reconocido por todos. Resulta necesario emplear canales de comunicación múltiples para asegurar que toda persona sea

informada en caso de fallo de algún canal, así como para reforzar el mensaje de alerta (Alonso, *et al.*, 2013: 63).

Fotografía 3. Vigilancia y monitoreo

Fuente: CENAPRED.

La comunicación de un alertamiento implica la transmisión del mensaje desde una fuente técnica y científica hacia los tomadores de decisiones y posteriormente a la población y a múltiples receptores que incluyen a los servicios de emergencia, agencias de seguridad, etcétera. Como se comentó anteriormente, en ocasiones el tiempo disponible para el alertamiento no es suficiente, por lo que será necesario buscar esquemas automáticos de diseminación de los mensajes de alerta. Los desastres pueden reducirse considerablemente si la gente se mantiene informada sobre las medidas que pueden tomar para reducir su vulnerabilidad y si se sienten motivados para actuar (Alonso, *et al.*, 2013: 63-64).

d) Capacidad de respuesta

El Sistema de Alerta Temprana no debe quedarse únicamente en emitir los mensajes de alerta, sino que la población debe saber qué hacer y cómo actuar. Es primordial que las comunidades comprendan sus riesgos, conozcan y respeten los niveles de alertamiento, así como saber anticipadamente las acciones que deberán realizar y cómo deben reaccionar. Esto requiere programas sistemáticos de educación y de preparación frente a los desastres, operados por autoridades en el manejo de desastres (Alonso, *et al.*, 2013: 64).

Además, los alertamientos deberán desencadenar, dependiendo del nivel de alertamiento, una serie de acciones y procedimientos por parte de diversas instituciones responsables de coordinar la preparación para la emergencia. Es importante que los planes de manejo de emergencias y desastres sean revisados

y actualizados periódicamente, dadas las características cambiantes del riesgo. También resulta necesaria la realización de simulacros que permitan poner en práctica el plan y detectar aquellos aspectos que deberán ser mejorados. Deberán asegurarse que la comunidad esté bien informada sobre las opciones de comportamiento y escapes seguros, así como de las maneras de evitar daños y pérdidas de propiedades (Alonso, *et al.*, 2013: 64-65).

El hecho de estar preparados implica la conducción de evaluaciones del riesgo, antes de invertir en el desarrollo a todo nivel de la sociedad, permitiendo a la gente ser más resistente a los peligros naturales. La preparación implica diferentes tipos de actividades, entre las que se encuentran los ejercicios frecuentes de preparación en desastres, incluyendo los simulacros de evacuación, que también son esenciales para garantizar una rápida y eficaz respuesta ante los desastres (Alonso, *et al.*, 2013: 65) (Fotografía 4).

Fotografía 4. Simulacros

Fuente: CENAPRED.

Enfoque multi-amenaza y centrado en la población de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT)

Como se comentó anteriormente, el término multi-amenza se define como la ocurrencia aislada, simultanea, en cascada o acumulada de amenazas que tiene un potencial de causar un desastre (UN, 2015: 11). Por ejemplo, en 2011, la provincia de Tohoku, Japón, vivió un sismo de subducción con epicentro en el fondo marino, lo que ocasionó un Tsunami, Consecuencia de ello hubo

un fallo en la planta nuclear de Fukushima, generando así una fuga de radioactividad en una amplia zona aledaña a la planta. Esta fue considerada una catástrofe de eventos encadenados, ocurridos en un periodo corto de tiempo (Serrano, 2019). Esta experiencia nos remite a la necesidad de contar con un enfoque multi-amenaza como parte del diseño e implementación de los Sistemas de Alerta Temprana (UN, 2015: 11).

Adicionalmente, cuando los Sistemas de Alerta Temprana toman en consideración al individuo como parte central de su función, lo empoderan, a él y a su comunidad, para afrontar con tiempo suficiente las amenazas de manera efectiva, lo que puede reducir su riesgo. La participación de todos los sectores de la comunidad es necesaria para definir los diversos procesos que coadyuven a que estos sistemas estén en constante evolución a la par de las necesidades emergentes de la gente (UN, 2006a: 5).

En 2017, se llevó a cabo la Primer Conferencia Internacional de Sistemas de Alerta Temprana con el enfoque multi-amenaza en Cancún, México. En ella participaron representantes de países miembros de la ONU y organizaciones internacionales de todos los sectores. Como resultado de estas sesiones se concentraron las mejores prácticas y se formuló una lista de acciones que parten de los elementos clave. La siguiente figura describe las interrogantes que debemos hacer para considerar la implementación de un Sistema de Alerta Temprana con enfoque multi-amenaza y centrado en la gente (OMM, 2017) (Figura 2).

Asuntos transversales

Adicionalmente, es importante mencionar que existe una serie de asuntos transversales y globales que son aplicables a los sistemas de alerta temprana en su conjunto, además de las necesidades de los elementos individuales de la alerta temprana. Estos asuntos tienen que ser tomados en cuenta para el diseño y el mantenimiento de sistemas de alerta temprana con el fin de garantizar la eficacia y la sostenibilidad general (Alonso, *et al.*, 2013: 65-66).

a) Convenios institucionales y de gobernabilidad eficaces

Una gobernabilidad y convenios instituciones bien desarrollados respaldan el exitoso desempeño y mantenimiento de sistemas de alerta temprana eficaces. Conforman la fundación sobre la cual son construidos, reforzados y mantenidos los cuatro elementos de alerta temprana previamente esbozados (Alonso, *et al.*, 2013: 66-67).

La buena gobernabilidad se encuentra fortalecida en marcos legales sólidos y es apoyada por un continuo compromiso político sostenible y por arreglos institucionales integrados. Es esencial un enfoque sistemático que relacione la toma local de decisiones con la participación de una mayor capacidad de recursos y de administración a nivel nacional o regional (Alonso, *et al.*, 2013: 67).

Los flujos de información y los mecanismos de coordinación tienen que ser adaptados y perfilados para asegurar eficientes enlaces verticales y horizontales entre todos los participantes involucrados en los sistemas de alerta temprana.

Figura 2. Tomado de las conclusiones adoptadas en la Primer conferencia Internacional de Sistemas de Alerta Temprana, Cancún México, 2017

Fuente: CENAPRED

b) Enfoque multi-riesgos

Donde sea posible, los sistemas de alerta temprana deberían buscar enlaces entre los diferentes sistemas basados en riesgos. Las economías de escala, la sostenibilidad y la eficacia pueden ser mejoradas si los sistemas y operaciones son establecidos dentro de un marco de acción multi-riesgo y de fines múltiples que considere todos los peligros y las necesidades del usuario final (Alonso, *et al.*, 2013: 67).

Al cubrir varias amenazas, los sistemas de alerta temprana multi-riesgo serán activados más a menudo que un sistema de alerta de un solo riesgo, y por lo tanto deberían aportar una mejor funcionalidad y mayor fiabilidad ante peligrosos

acontecimientos de alta intensidad como los tsunamis que rara vez ocurren. También pueden ayudar al público a entender la gama de riesgos que afrontan y pueden reforzar las acciones deseadas de preparación en caso de desastres y los comportamientos de respuesta ante una alerta (Alonso, *et al.*, 2013: 68).

c) Participación de las comunidades locales

Los sistemas de alerta temprana enfocados en el factor humano se basan en la participación directa de aquellos con el mayor riesgo de exposición a peligros. Sin la participación de las comunidades y personas en peligro, las intervenciones gubernamentales e institucionales pueden ser inadecuadas cuando los eventos ocurren. Puede ser que el público no entienda o aprecie un sistema oficial y existe el riesgo de que los sistemas se dirijan exclusivamente a las ciudades y las áreas más densamente pobladas (Alonso, *et al.*, 2013: 68).

Un enfoque local a la alerta temprana y la participación de comunidades locales permite una respuesta multidimensional a los problemas y las necesidades. De este modo, las comunidades locales, los grupos cívicos y las estructuras tradicionales pueden implicarse y contribuir a la reducción de la vulnerabilidad y al fortalecimiento de capacidades locales (Alonso, *et al.*, 2013: 68).

En el desarrollo de sistemas de alerta temprana es esencial reconocer que los diferentes grupos tienen diferentes vulnerabilidades según sus características culturales, de género u otras que influyen en su capacidad para prepararse eficazmente, prevenir, mitigar o responder a desastres naturales. Mujeres y hombres a menudo juegan distintos papeles en la sociedad, con diferentes preocupaciones e informaciones en situaciones de desastre. Además, los ancianos, personas con discapacidad y las personas de menores recursos son a menudo altamente vulnerables (Alonso, *et al.*, 2013: 68).

d) Enfoque de género

Para comenzar a hablar sobre la igualdad de género en la planeación e implementación de los Sistemas de Alerta Temprana el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) reconoce la estrecha relación que existe entre la igualdad de género y la capacidad de recuperación frente a los desastres, así como la importancia de esta relación para el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio. Resulta por ello imprescindible incluir el asunto de igualdad en las voces de mujeres y hombres, sus necesidades y su experiencia, en la reducción del riesgo de desastres y en la programación y en las políticas y recuperación (Alonso, *et al.*, 2013: 66).

En este contexto, partimos del hecho por el cual las vulnerabilidades de mujeres, niñas, niños y hombres varían según sus edades y los estratos económicos y sociales de los que provengan, y todo esto va dando forma a la manera en que enfrentan y viven los desastres y a su capacidad de recuperación. La mayoría de los casos, los desastres acarrean para mujeres y niñas una carga adicional, puesto que tradicionalmente recae sobre ellas

la responsabilidad del trabajo no remunerado (suministro de cuidados, agua y alimentos para los hogares, entre otros). Si las mujeres y los niños se quedan fuera de la planificación para casos de desastre o de las medidas de reducción de riesgos, se estarán desaprovechando el talento, las habilidades y los conocimientos de este sector de la población y será menos probable que se satisfagan las necesidades de los más afectados, aspectos que son necesarios identificar dentro de la planeación e implementación de cualquier SAT centrado en la gente (Alonso, *et al.*, 2013: 68).

Actores clave

El desarrollo y la ejecución de un sistema eficaz de alerta temprana requiere la contribución y la coordinación de una amplia gama de personas y grupos a lo largo y ancho de la comunidad. Cada uno de ellos tiene un juego de funciones entrecruzadas por las cuales debería responder (UN, 2006a: 4).

a) Comunidades

Las localidades son vitales para los sistemas de alerta temprana enfocados en el actor humano. Su participación en el diseño y su capacidad de reaccionar determinan, en última instancia, el grado de riesgo asociado con los peligros naturales. Ellos deberían tener conciencia de los peligros y efectos colaterales a los cuales están expuestos y deberían ser capaces de tomar acciones específicas para reducir al mínimo la amenaza de pérdidas o daños (UN, 2006a: 4).

b) Gobiernos locales

Estos gobiernos deben tener un conocimiento de los peligros a los cuales sus comunidades están expuestas. Deben estar activamente implicados en el diseño y el mantenimiento de sistemas de alerta y comprender la asesoría informativa recibida para ser capaces de aconsejar, instruir o involucrar a la población local para aumentar su seguridad y reducir la posible pérdida de recursos vitales para la comunidad (UN, 2006a: 4).

c) Gobiernos nacionales

Este tipo de gobierno son responsables de las políticas y de los marcos de acción que facilitan la alerta temprana, además de los sistemas técnicos para la preparación y la declaración de alertas de riesgo en sus países de manera oportuna y eficaz. Deben garantizar que las alertas y las respuestas pertinentes sean dirigidas hacia las poblaciones más vulnerables. Brindarle ayuda a comunidades y gobiernos locales para desarrollar capacidades de operación es una función esencial para traducir el conocimiento de la alerta temprana en prácticas de reducción de riesgo (UN, 2006a: 4).

d) Instituciones y organizaciones regionales

Estos deben brindar el conocimiento especializado y la debida asesoría para respaldar los esfuerzos nacionales para desarrollar o respaldar capacidades operacionales experimentadas por los países que comparten un ambiente geográfico común. Las organizaciones regionales son cruciales para el enlace de capacidades internacionales con necesidades particulares de los países y para la facilitación de prácticas eficaces de alerta temprana entre países vecinos (UN, 2006a: 4).

e) Organismos internacionales

Estos organismos deben apoyar las actividades nacionales de alerta temprana y promover el intercambio de datos y conocimientos entre cada país. El apoyo puede traducirse en consejo, asistencia técnica y el sustento de las políticas y organización necesarias para asegurar el desarrollo y las capacidades operacionales de los organismos nacionales o de las agencias responsables del ejercicio de la alerta temprana (UN, 2006a: 4).

f) Las organizaciones no gubernamentales (ONG)

Las ONG juegan un papel crítico en la toma de conciencia entre los individuos y las organizaciones involucradas en la alerta temprana y en la puesta en práctica de sistemas de alerta temprana, en particular al nivel de las comunidades. Además, ellos juegan un papel importante función de consultoría para ayudar a asegurar que la alerta temprana permanezca en el orden del día de quienes dictan las políticas de gobierno (UN, 2006a: 4).

g) Sector privado

Este sector tiene una participación que incluye el desarrollo de capacidades de alerta temprana en sus propias organizaciones. Los medios de comunicación juegan un papel importante en el mejoramiento del conocimiento de desastre de la población y en la difusión de alertas tempranas. Asimismo, el sector privado tiene un potencial sin explotar para ayudar a proporcionar servicios especializados en la forma de mano de obra técnica, experiencia y conocimiento o donaciones (en especies y en efectivo) de bienes o servicios, principalmente para la comunicación, difusión y elementos de respuesta a la alerta temprana (UN, 2006a: 4).

h) Científicos

Los científicos cuentan con un rol primordial, pues proporcionan asesoría científica y técnica especializada para colaborar con gobiernos y comunidades en el desarrollo de sistemas de alerta. Su pericia es crítica para el análisis de los riesgos de desastres que enfrentan las comunidades, así como para contribuir en el diseño de un monitoreo científico y sistemático y de servicios de alerta,

el intercambio de información, la traducción de datos científicos o técnicos a mensajes fáciles de entender y la difusión de alertas claras a las personas en peligro (UN, 2006a: 4) (Figura 3).

Figura 3. Sistema de Alerta Temprana centrados en la gente

Fuente: CENAPRED.

Bibliografía

Alonso Rivera, Paulino; Castelán Pescina, José Gilberto; y Vidal Amaro, Margarita, 2017. "Los sistemas de monitoreo y alerta temprana como herramientas para la prevención de desastres en México", *Revista de Administración Pública* No. 143, Volumen LII, No. 2. Disponible en: https://inap.mx/wp-content/uploads/2020/08/rap143.pdf. Consultado el 10 de diciembre de 2020.

Cardona O. D, 1996. "Variables involucradas en el manejo de riesgos" – Especial: Predicciones, pronósticos, alertas y respuestas sociales". *Revista Desastres y Sociedad*. Enero-junio 1996 / No.6 / Año 4.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2013. *Sistema de Alerta Temprana para Sismos en México*. Disponible en: https://www.insarag.org/images/

stories/Costa_Rica_2013/11_Sistema_de_Alerta_Temprana_para_Sismos_en_Mexico.pdf. Consultado el 10 de diciembre de 2020.

Guevara O. E., *et al.,* 2003. *Instrumentación y Monitoreo del volcán Popocatépetl*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Diciembre 2003.

Organización de Naciones Unidas, 2005. *Informe de la Conferencia Mundial Sobre la Reducción de los Desastres Naturales 2005 - 2015*: Hyogo, Japón.

Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2017. "Conferencia sobre sistemas de alerta temprana multirriesgos: salvar vidas, reducir pérdidas". Disponible en: https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/conferencia-sobre-sistemas-de-alerta-temprana-multirriesgos-salvar-vidas. Consultado el 10 de diciembre de 2020.

Naciones Unidas, (UN), s/f. "Resumen de la Segunda Conferencia Internacional sobre Alerta Temprana (EWC II)". Disponible en: https://www.eird.org/ppew/fuentes-informacion/fuentes-informacion.htm. Consultado el 10 de diciembre de 2020.

Naciones Unidas (UN), 2003. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Plaza New York, N. Y. 10017. USA. Disponible en: http://www.undp.org/content/dam/undp/library/crisis%20prevention/disaster/Reduccion-Genero.pdf. Consultado el 7 de abril de 2014.

Naciones Unidas, (UN), 2006a. Desarrollando Sistemas de Alerta Temprana: Una Lista de acciones clave Borrador de trabajo. Disponible en: https://www.unisdr.org/2006/ppew/info-resources/ewc3/Checklist-spanish.pdf. Consultado el 10 de diciembre de 2020.

Naciones Unidas, 2006b. United Nations, 2006. Global Survey of Early Warning Systems. Final Version. Disponible en: https://www.unisdr.org/2006/ppew/info-resources/ewc3/Global-Survey-of-Early-Warning-Systems.pdf. Consultado el 10 de diciembre de 2020.

Naciones Unidas (UN), 2015*. Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. Naciones Unidas. Disponible en: https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf. Consultado el 10 de diciembre de 2020.

Serrano, Carlos, 2019. "Accidente nuclear en Fukushima: por qué Japón dice que "la única opción" es verter agua radioactiva en el océano", *BBC News*. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-49652336. el 10 de diciembre de 2020.

World Meteorological Organization (WMO), 2018. "MultiHazard Early Warning Systems, a check list". Disponible en: htps://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4463. Consultado el 2 de diciembre de 2020.

Sección 5
Universidades y educación ciudadana: hacia una cultura de la gestión del integral del riesgo como base en la preparación para la alerta temprana

5.1. La Protección Civil en la Universidad Autónoma del Estado de México

José Emilio Baró Suárez

Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

Armando Arriaga Rivera

Sociedad Hijos de Calimaya, A. C.
(CONACYT-RENIECyT)

Fernando Carreto Bernal

Facultad de Geografía
Universidad Autónoma del Estado de México

Ruggiero Olivera Guadarrama

Dirección de Seguridad
Protección Universitaria y al Ambiente
Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

La República Mexicana y el Estado de México a lo largo del año se ven impactados por una serie de efectos naturales: inundaciones, sismos, huracanes, movimientos gravitacionales, hundimientos, agrietamientos, fuertes vientos, granizadas, heladas. Estos impactan grandes núcleos poblacionales que conforman escenarios de riesgos tanto urbanos como rurales. Para poder enfrentar y prevenir los daños y pérdidas de vidas humanas y materiales que se generan resulta imprescindible la preparación continua y permanente de la sociedad civil en su conjunto, ya que muchas de las situaciones lamentables que presentan en el territorio como consecuencia de los impactos mencionados son producto en muchos casos de una deficiente preparación, educación y concientización de la población sobre el tema de Protección Civil.

En México existe una débil cultura de la prevención solo se acuerda de ella cuando ocurre el desastre. La prevención debe ser un aspecto presente permanentemente en la cultura de vida laboral, académica y familiar.

Un aspecto importante de la resiliencia ante los desastres lo constituye la educación, capacitación y preparación de la sociedad civil, en este sentido la comunidad universitaria, como parte de esta sociedad, juega un papel importante por su grado de formación académica y en la edad en la que inicia su educación superior. Preparando a la comunidad tanto en la prevención como durante las emergencias ante el abanico de agentes perturbadores que afectan nuestro país y estado, contribuiremos de forma significativa para evitar daños materiales y pérdidas de vidas humanas.

Por lo tanto, es importante saber qué tanto está preparada e informada la comunidad universitaria sobre el tema de Protección Civil. Para ello, se realizó una investigación con el fin de determinar cuántas licenciaturas e ingenierías tienen en su tronco común el tema de Protección Civil. Resulta que de 87 licenciaturas e ingenierías que se ofertan en la Universidad Autónoma del Estado de México solo en una se imparte: en la Licenciatura en Administración y Promoción de la Obra Urbana; el cuándo varía de acuerdo con el plan de estudios, en séptimo semestre del plan 2004 y en el quinto del 2015. Esta licenciatura se oferta en la Facultad de Arquitectura y Diseño y en la Unidad Académica Profesional de Chimalhuacán.

Siendo que es una unidad de aprendizaje importante en la formación de una cultura de protección civil en los estudiantes y sociedad en general, sin mencionar que el nuestro es un país expuesto a un conjunto de peligros naturales, donde, además, se asientan millones de personas en escenarios de riesgos socionaturales, consideramos necesaria la inclusión de esta Unidad de Aprendizaje en los programas curriculares de las diferentes licenciaturas de la Universidad Autónoma del Estado de México. El objetivo es que el alumno aprenda los principios básicos de la Protección Civil en la vida cotidiana, familiar, estudiantil y laboral a través de métodos y técnicas de prevención, para evitar y mitigar situaciones que puedan generar daños materiales, humanos, económicos y ambientales.

El programa de la unidad de aprendizaje Protección Civil estará acompañado por una guía de evaluación y otra pedagógica.

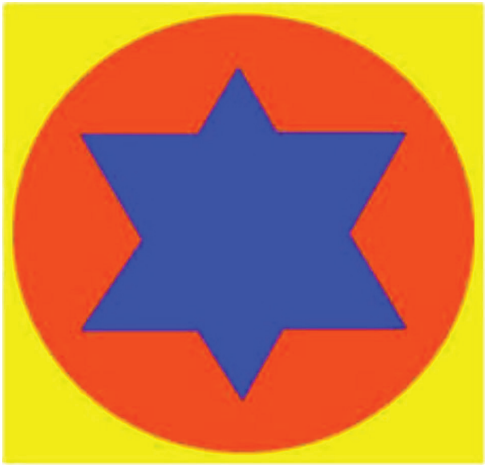
Finalmente, la protección civil se apoya de una diversidad de estudios, conceptos y análisis territoriales que permiten entender los espacios universitarios como su entorno (Carcedo y Moreno, 1993; Carcedo y Olcina, 2002; Chaparro y Renard, 2005; Baró y otros, 2012; Arriaga y Carreto, 2018; Baró, 2018; Baró, Arriaga y Hernández, 2018).

Antecedentes de la Protección Civil

La Protección Civil nace el 12 de agosto de 1949 en el "Protocolo 2" adicional al *Tratado de Ginebra* "Protección a las víctimas de los conflictos armados internacionales". Siendo una de las disposiciones otorgadas para facilitar el trabajo de la Cruz Roja, también se aplicó para los agentes naturales potencialmente desastrosos y los antropogénicos (Méndez, 2017).

En cuanto al símbolo de Protección Civil, en el año de 1949 se lanzó una convocatoria para buscar un distintivo que permitiera el reconocimiento de esta disciplina a nivel mundial. Participaron muchas naciones, fue Israel la que ganó con el símbolo de la Estrella de David enmarcada en un círculo de color anaranjado dentro de un cuadrado de color amarillo. Como no cumplía con el requisito de representar a un organismo neutral, apolítico y laico, sufrió modificaciones. La Estrella de David se modificó, ya que solo representaba a un pueblo y una religión, y éste debía ser imparcial, dejaron solo el triángulo superior (Méndez, 2017).

Figura 1. Primer símbolo de Protección Civil



Fuente: Méndez, 2017.

Los colores y los símbolos representan los siguientes (Méndez, 2017):

- Triangulo de Color Azul: simboliza la prevención, es un color que proporciona tranquilidad y protección, representa al ser supremo o energía protectora, por lo que los países con una fuerte influencia religiosa no opusieron inconveniente en aceptarlo. Así también, cada lado del triángulo representa a cada fuerza que atiende una emergencia, es decir, el Gobierno, los grupos voluntarios y la población en general.

- Círculo anaranjado: representa la aceleración del metabolismo y mantiene en alerta a la persona, proporciona visibilidad, impidiendo accidentes. Este color representa al "durante".
- Cuadro amarillo: Este color al final fue desechado, pero quizá sería el que más contenido tenía o el que más habla al respecto de la actitud de las personas, representaba al "después", se hace referencia al semáforo e indica una señal preventiva, o señal de alerta sobre un peligro.

Figura 2. Símbolo definitivo de Protección Civil

Fuente: Méndez, 2017.

Esta nueva política internacional creó cuatro tratados sobre la Protección Civil (Méndez, 2017):

- El IV convenio de Ginebra de 1949.
- El "Protocolo Adicional número I" a los convenios de Ginebra sobre protección de los civiles en caso de conflictos armados internacionales.
- La Constitución de la Organización Internacional de la Protección Civil (OIPC).
- El Convenio "Marco para la cooperación internacional en el campo de la Protección Civil".

De igual manera impulsó modelos gubernamentales para prevenir y atender desastres y riesgos (Méndez, 2017):

- Defensa Civil
- Protección Civil.
- Gestión-manejo-administración de desastres de emergencias o de riesgos.
- Gestión Integral de riesgo.

En el caso mexicano, los desastres fueron el punto de partida para el surgimiento del concepto de Protección Civil, con los procesos legislativos

desde 1966 a consecuencia del desbordamiento del Río Pánuco, con el PLAN DN-III-E; los desastres provocados por la erupción del volcán Chichonal, en Chiapas, en 1982; la explosión de tanques de almacenamiento de gas en San Juan Ixhuatepec, Estado de México, en 1984; y en 1985 los sismos del 19 y 20 de septiembre en la ciudad de México. Estos antecedentes sentaron las bases para que en 1986 se estableciera el Sistema Nacional de Protección Civil en México para la prevención y autoprotección de la población (Méndez, 2017).

De manera general, Protección Civil se define como el conjunto de acciones que prevén, disminuyen y mitigan el riesgo que corre una de ser afectada por agentes perturbadores, sean naturales o antropogénicos (Méndez, 2017).

Leyes y reglamentos mexicanas

Lo anterior facilitó que en México se desarrollara la Ley General de Protección Civil y otros instrumentos normativos base para la Unidad de Aprendizaje de Protección Civil que se propone en el nivel superior. Esta se enmarca dentro de la legislación vigente actual mexicana englobada en tres niveles.

- Federal
  - Ley General de Protección Civil. 19-01-2018.
  - Reglamento de la Ley General de Protección Civil. 09-12-2015.
  - Ley de Aguas Nacionales. 06-01-2020.
  - Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales. 25-08-2014.
  - Ley General de Cambio Climático. 13-07-2018.
  - Ley General de Desarrollo Social. 25-06-2018.
  - Reglamento de la Ley General de Desarrollo Social. 28-08-2008.
  - Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano. 06-01-2020.
  - Ley de Planeación. 16-02-2018.
  - Ley General de Población. 12-07-2018.
  - Reglamento de la Ley General de Población. 28-09-2012.
  - Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. 05-06-2018.
  - Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental. 31-10-2014.
- Estatal
  - Plan de Desarrollo del Estado de México 2017-2023
  - "Reglamento del Libro Sexto" del Código Administrativo del Estado de México. 8 de enero de 2016
  - Norma Técnica de Protección Civil NTE-002- CGPC-2018, que establece los lineamientos y las especificaciones para la elaboración del análisis de vulnerabilidad y riesgo de protección civil, que deberán desarrollar las dependencias, organismos y entidades de los sectores público, social y privado, encaminados a proteger a las personas que se encuentren en sus instalaciones sus bienes y el entorno a través del análisis cualitativo y

cuantitativo de agentes destructivos de origen químico tecnológico, sus consecuencias y las medidas de prevención y mitigación. 25 de julio de 2018.

- Universitario.

En la universidad Autónoma del Estado de México la Protección Civil se inicia a partir de la fecha mayo de 1992 con la instauración de un programa de protección civil y seguridad. Se cuenta con un programa de Protección Universitaria y por facultades.

- Programa Interno de Protección Universitaria de la Dirección de Seguridad y Protección Universitaria de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Propuesta de la Unidad de Aprendizaje "Protección Civil"

La inclusión de una unidad de aprendizaje de Protección Civil en los planes de estudio de la universidad se justifica, porque se carece de esta. Con la finalidad de prevenir posibles riesgos, primero, dentro del aula, después en la facultad, en la unidad académica y en la región. Con la estructuración de esta unidad enfocada a la Protección Civil y enmarcada en todas las licenciaturas e ingenierías se busca fortalecer la cultura de la Protección Civil en el ámbito de la prevención, fundamentalmente. Educando y creando conciencia sobre los aspectos fundamentales de la resiliencia ante el impacto de los agentes de la naturaleza a toda nuestra comunidad universitaria como parte de la sociedad civil.

En este orden de ideas es importante que el egresado esté al tanto de los principios, leyes, reglamentos y regulaciones básicas de Protección Civil, para que sea capaz de evitar omisiones o negligencias que puedan causar daños graves y pérdidas lamentables de vidas humanas.

El programa que se plantea es el siguiente:

Los objetivos específicos son:

- El estudiante universitario dominará los conceptos fundamentales y el marco legal y normativo de la protección civil para tomar decisiones en el momento del desastre.
- El estudiante universitario conocerá los principales agentes geológicos, hidrometeorológicos y antropogénicos que afectan en nuestra vida cotidiana.
- El estudiante universitario usará el conocimiento básico del Plan de la Unidad Interna de Protección Civil del espacio académico donde estudia.

Contenidos de la unidad de aprendizaje, y su organización.

El contenido del curso de Protección Civil está enfocado a estudiantes de nuevo ingreso de nivel superior. (Puede ser obligatorio, como asignatura, insertada en los primeros semestres o puede ser optativa. A nuestro juicio debería ser un curso de inducción como lo planteamos) (Cuadro 1, 2, 3, 4 y 5).

Cuadro 1. Unidad 1

Unidad 1. Introducción a la Protección Civil
Temas:
1.1. Antecedentes de la protección civil en México.
1.1.1 Propósito de la Protección Civil
• Postulado básico
• Fórmula de gestión de riesgo
1.1.2. Antecedentes
• Global
• Nacional (Terremoto)
• Local (Guardería ABC)
• Cambios legislativos como consecuencia
1.1.3. Peligros Naturales
• Descripción y presencia
• Concatenación
• Naturales vs Antropogénicos
1.1.4 Principios de Seguridad e Higiene en la Obra de Construcción
• Equipamiento de seguridad colectiva y personal
• Seguridad Social
1.1.5. Sistema Nacional de PC
• Estructura
• Unidades Estatales
• Unidades Municipales
• Equipos de emergencia, especialidades
• Participación ciudadana
1.1.6. Etapas de acción
• Prevención
• Emergencia
• Recuperación
• Ejemplos empíricos en la región
1.1.7. Instrumentos Técnicos e Inventarios
• Atlas de Riesgos
• Mapas de Riesgos
• Inventarios
• Información empírica /histórica
1.2 Marco legal, normativo e institucional de la Protección Civil
1.2.1 Federal
1.2.2 Estatal
1.2.3 Universitaria
1.3 Aspecto territorial
1.3.1. Elementos Naturales
• Geología
• Hidrología
• Obras de estabilización, obras de conducción
1.3.2. Asentamientos Humanos
• Establecimiento y Crecimiento
• Asentamientos irregulares
1.3.3. Ordenamiento Territorial (ecológico de la SEMARNAT y ordenamiento territorial de la SEDATU)
• Principios
• Evolución y ejemplos
• Reglamentación
1.3.4. Usos de suelo
• Restricciones
• Compatibilidad
• Cambios
1.3.5. Plan de Desarrollo Municipal

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 2. Unidad 2

Unidad 2. Análisis de factores de riesgo socionaturales
Temas:
2.1. Riesgos socionaturales geológicos e hidrometeorológicos 2.1.1 Peligrosidad 2.1.2 Vulnerabilidad 2.1.3 Exposición 2.2 Resiliencia 2.2.1 Medidas de prevención y mitigación (se hará hincapié en los riesgos más recurrentes en los campos académicos (sísmicos e inundaciones). • Estructurales • No estructurales

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 3. Unidad 3

Unidad 3. Análisis de factores de riesgo antropogénicos
Temas:
3.1 Riesgos antropogénicos fugas, derrames, explosiones, entre otros. Análisis de vulnerabilidad 3.1.1. Instalaciones eléctricas • Naturaleza de los riesgos eléctricos • Instalación eléctrica en la edificación 3.1.2. Instalaciones de gas • Naturaleza de los gases hidrocarburos • Instalaciones de gas L.P. en la edificación 3.1.3. Materiales peligrosos • Instalaciones, fugas y derrames 3.2. Medidas de prevención y mitigación (se hará hincapié en los riesgos más recurrentes en los campos académicos). 3.2.1 Por la naturaleza y características del Estado de México[1] 3.2.2 Los Riesgos Hidrometeorológicos[2]

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 4. Unidad 4

Unidad 4. Conocimiento del Programa Interno de Protección Civil de la Unidad (espacio académico)
Temas:
.1. Plan interno de Protección Civil 4.1.1 Identificación, localización y análisis de riesgos y recursos[1] 4.1.2 Identificación y localización de riesgos internos y de recursos. Planos arquitectónicos o croquis de distribución[2]

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 5. Unidad 5

Unidad 5. Experiencia internacional en la implementación de una cultura de protección civil en la ciudadanía
Temas:
5.1 Experiencia en Japón y otros países

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Finalmente, se puede concluir que resultaría de gran beneficio para la universidad y la población en general, la inclusión del programa curricular de Protección Civil en los niveles de licenciatura e ingeniería, con la finalidad de fortalecer las medidas de protección y de mitigación de los riesgos socionaturales.

Bibliografía

Arriaga Rivera, Armando; y Carreto Bernal, Fernando, 2018. "Atlas Urbano del municipio de Calimaya, modelo cartográfico en la planeación y ordenación del territorio", Revista Quivera, año 20, pág. 85-105. Facultad de Planeación Urbana y Regional, México. Universidad Autónoma del Estado de México.

Ayala Carcedo, F; Moreno Serrano, F., 1993. Procesos Geológicos Externos y Geología Ambiental, Madrid, Rueda.

Ayala Carcedo, F; y Olcina Cantos J., 2002. Riesgos Naturales, Barcelona, Ariel.

Baró Suárez J. E. (coordinador), 2018. Enfrentando los riesgos socionaturales, Mexico: Clave Editorial.

Baró Suárez, José Emilio; Arriaga Rivera, Armando; y Hernández Valdés, Rosa Estela, 2018. "Marco legal, normativo e institucional de los riesgos socionaturales en México", José Emilio Baró Suárez (Coordinador), Enfrentando los Riesgos Socionaturales, México: Clave Editorial.

Baró Suárez J. E., Díaz Delgado C., Calderón Aragón G., Esteller Alberich M. V., Cadenas Vargas E., Franco Plata R., 2012. Metodología para la valoración económica de daños potenciales tangibles directos por inundación. Mexico: Universidad Autónoma del Estado de México.

Chaparro E A; y Renard Matías R., 2005. Elementos conceptuales para la prevención y reducción de daños, CEPAL, ONU.

Dirección de Seguridad y Protección Universitaria., 2017. Programa Interno de Protección Universitaria, Universidad Autónoma del Estado de México.

Fascículos de CENAPRED para riesgos, geológicos, hidrometeorológicos y antropogénicos.

Gobierno del Estado de México, 2016. "Reglamento del Libro Sexto" del Código Administrativo del Estado de México. 8 de enero de 2016, Gaceta del Gobierno. Gobierno del Estado Libre y Soberano de México. 8 de enero de 2016.

Gobierno del Estado de México, 2018. Norma Técnica de Protección Civil NTE-002- CGPC-2018, Gaceta del Gobierno. Gobierno del Estado Libre y Soberano de México. 25 de julio de 2018.

Gobierno del Estado de México (GEM), 2017. Plan de Desarrollo del Estado de México 2017-2023, GEM.

H. Congreso de la Unión, 2015. Ley de Aguas Nacionales, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 06-01-2020.

H. Congreso de la Unión, 2015. Ley de Planeación, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 16-02-2018.

H. Congreso de la Unión, 2015. Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 06-01-2020.

H. Congreso de la Unión, 2015. Ley General de Cambio Climático, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 13-07-2018.

H. Congreso de la Unión, 2015. Ley General de Desarrollo Social, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 25-06-2018.

H. Congreso de la Unión, 2015. Ley General de Población, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 12-07-2018.

H. Congreso de la Unión, 2015. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 05-06-2018.

H. Congreso de la Unión, 2015. Reglamento de la Ley General de Desarrollo Social, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 28-08-2008.

H. Congreso de la Unión, 2015. Reglamento de la Ley General de Población, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 28-09-2012.

H. Congreso de la Unión, 2015. Reglamento de la Ley General de Protección Civil, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 09-12-2015.

H. Congreso de la Unión, 2015. Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 31-10-2014.

H. Congreso de la Unión, 2015. Reglamento de las Ley de Aguas Nacionales, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 25-08-2014.

H. Congreso de la Unión, 2018. Ley General de Protección Civil, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Estado Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación (DOF) 19-01-2018.

Méndez Olarte, César Adrián, 2017. "Antecedentes de la Protección Civil". Gobierno del Estado de Veracruz. Disponible en: http://www.invedem.gob.mx/wp-content/uploads/sites/26/2017/11/1.-Antecedentes-de-la-Protecci%C3%B3n-Civil.pdf. Consultado el 5 de julio de 2020.

Métodos y técnicas de monitoreo y predicción temprana en los escenarios de riesgos socionaturales
se terminó de imprimir en septiembre de 2021,
en los talleres de Master Copy, S.A. de C.V.
Plásticos no. 84 Local 2 Ala Sur
Fracc. Industrial Alce Blanco
Naucalpan de Juárez, C.P. 53370

Tiraje: 300 ejemplares

Esta obra concentra los métodos y las técnicas fundamentales para el seguimiento y monitoreo de las dinámicas de los escenarios de riesgos socionaturales (geológicos e hidrometeorológicos) y tiene como objetivo general orientar, apoyar y acompañar a los directivos y operativos de protección civil en aterrizar las acciones y políticas públicas enfocadas a la gestión del riesgo local de desastre. Dentro de los objetivos específicos del libro, están los siguientes:

- Promover, compartir y transformar la información científico-técnica en conocimiento ciudadano.
- Desarrollar capacidades (Sistema de Alerta Temprana, SAT) y comportamientos preventivos que permitan a nuestras comunidades ser más resilientes y menos vulnerables ante el impacto de los fenómenos naturales.
- Contribuir a la difusión y comunicación social del riesgo en los centros educativos, laborales e investigativos.

El libro constituye un material básico para ser utilizado y consultado por los estudiantes de carreras afines a la protección civil y la gestión integral de riesgo (ciencias de la tierra, ciencias sociales y otras), por lo que constituye una obra muy versátil resultado del esfuerzo y co-laboración de todo el conjunto de autores y coautores de diferentes universidades, centros de investigación e instituciones de protección civil local que participaron.

ISBN 978-607-437-569-5