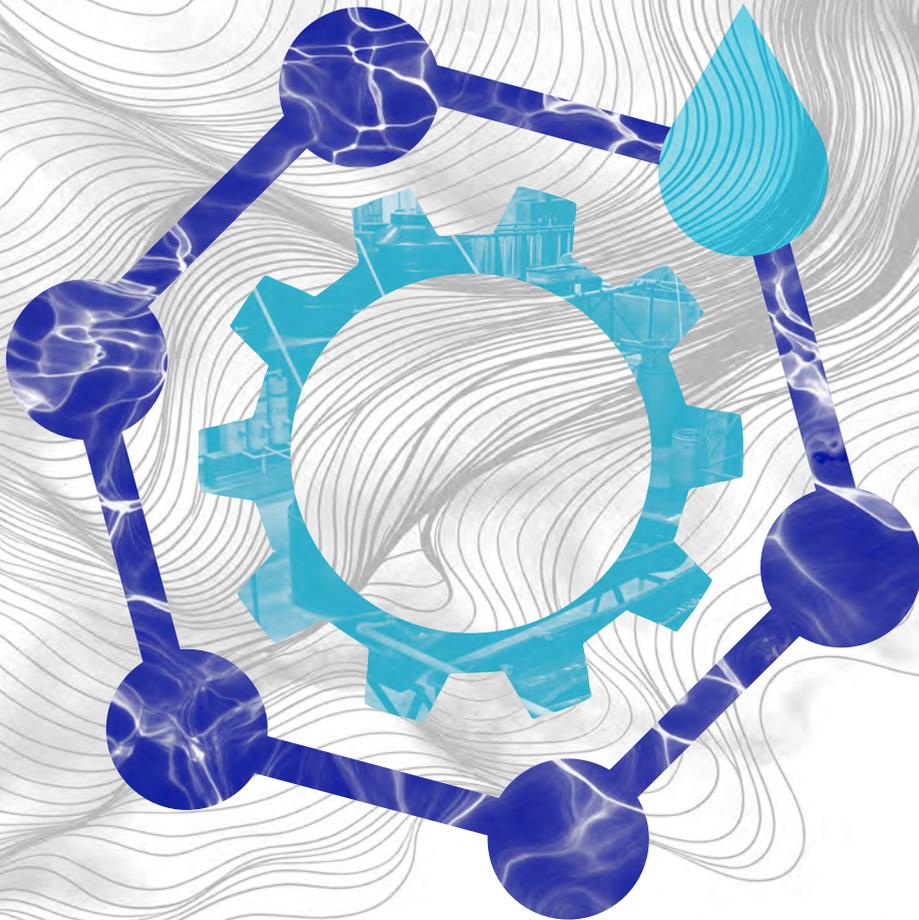




Universidad Autónoma
del Estado de México



Contribuciones a la Ingeniería y Ciencias del Agua

Ma. de Lourdes Najera López
Rosa María Valdovinos Rosas

Coordinadoras

Contribuciones
a la Ingeniería y
Ciencias del Agua



Universidad Autónoma
del Estado de México

Doctor en Ciencias e Ingeniería Ambientales
Carlos Eduardo Barrera Díaz
Rector

Doctora en Ciencias Sociales
Martha Patricia Zarza Delgado
Secretaria de Investigación y Estudios Avanzados

Doctor en Ciencias Computacionales
Marcelo Romero Huertas
Director de la Facultad de Ingeniería

Maestra en Administración
Susana García Hernández
*Directora de Difusión y Promoción de la Investigación
y los Estudios Avanzados*

Contribuciones a la Ingeniería y Ciencias del Agua

Ma. de Lourdes Najera López
Rosa María Valdovinos Rosas
Coordinadoras

Universidad Autónoma del Estado de México
Toluca, 2024

“2024, Conmemoración del 60 Aniversario de la Inauguración de Ciudad Universitaria”

Contribuciones a la Ingeniería y Ciencias del Agua / Ma. de Lourdes Najera López, Rosa María Valdovinos Rosas, coordinadoras.
1ª ed. --Toluca, Estado de México : Universidad Autónoma del Estado de México, 2024.
208 p. : il, mapas ; 23 cm.

ISBN 978-607-633-796-7 (impreso)
ISBN 978-607-633-797-4 (PDF)



Incluye referencias bibliográficas.

1. Ingeniería -- Gráficos -- Simulación por computadores.
2. Teoría de grafos -- Simulación por computadores.
3. Aguas de Albañal -- Modelos matemáticos -- Simulación por computadores.

I. Najera López, Ma. de Lourdes, coord.
II. Valdovinos Rosas, Rosa María, coord.

TA345 .C68 2024

Contribuciones a la Ingeniería y Ciencias del Agua

Ma. de Lourdes Najera López y Rosa María Valdovinos Rosas
Coordinadoras

Libro sometido a sistema antiplagio y publicado con la previa revisión y aprobación de pares doble ciego externos que forman parte del Sistema Nacional de Investigadores, niveles I y II. Expediente de obra 356/01/2023, Dirección de Difusión y Promoción de la Investigación y los Estudios Avanzados, adscrita a la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Primera edición: 4 de abril de 2024
ISBN 978-607-633-796-7 (impreso)
ISBN 978-607-633-797-4 (PDF)

D.R. © Universidad Autónoma del Estado de México
Instituto Literario núm. 100 Ote., col. Centro, C.P. 50000, Toluca, México
www.uaemex.mx

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Autónoma del Estado de México.

El contenido de esta publicación es responsabilidad de las coordinadoras y los autores.



Esta obra queda sujeta a una licencia *Creative Commons* Atribución- No comercial-Sin derivadas 4.0 Internacional. Puede ser utilizada con fines educativos, informativos o culturales, ya que permite sólo descargar sus obras y compartirlas, siempre y cuando den crédito, pero no pueden cambiarlas de forma alguna ni usarlas de manera comercial. Disponible para su descarga en acceso abierto en: ri.uaemex.mx

Hecho e impreso en México.

Índice

13	<u>Introducción</u>
19	CAPÍTULO I <u>Aplicación de la teoría de grafos para el tratamiento de complejidades de los datos</u>
19	<u>Introducción</u>
21	<u>Teoría de grafos</u>
23	<u>Tratamiento de complejidades de los datos</u>
25	<u>Metodología. Algoritmos basados en grafos</u>
28	<u>Análisis experimental</u>
28	<u>Conjuntos de datos</u>
30	<u>Medidas de evaluación</u>
31	<u>Resultados y discusión</u>
34	<u>Conclusiones</u>
35	<u>Referencias</u>
37	CAPÍTULO II <u>Gramática para la estructura morfológica de criaturas virtuales considerando premisas de vida</u>
37	<u>Introducción</u>
38	<u>Metodología</u>
42	<u>Estudio de premisas aplicables al desarrollo de criaturas virtuales</u>
48	<u>Resultados y discusión</u>
49	<u>Referencias</u>

53

CAPÍTULO III

Patrones Similares Frecuentes, un nuevo enfoque para describir los conjuntos de datos

53

Introducción

54

Trabajos relacionados

57

Patrones Similares Frecuentes vs Patrones Frecuentes

58

Metodología

58

Conjuntos de datos

60

Criterios de comparación y función de semejanza

60

Proceso de minado de Patrones Frecuentes

61

Clasificación

61

Resultados y discusión

62

Minado de PSF y PF

64

Conclusiones

65

Referencias

67

CAPÍTULO IV

Una revisión preliminar de literatura cualitativa sobre la evaluación de riesgos en eventos naturales

67

Introducción

69

Evaluación del riesgo de eventos naturales

71

Modelos cualitativos para la evaluación del riesgo de eventos naturales

72

Enfoques teóricos y vulnerabilidad

74

Enfoques teóricos y percepción del riesgo

75

Enfoques cualitativos y eventos hidrometeorológicos

77

Conclusiones

78

Referencias

87

CAPÍTULO V

Esquema de regulación del sistema de transporte público de pasajeros basado en la teoría de contratos

87

Introducción

89

Metodología. El productor

90

Función de costos

93

El regulador

93

Evaluación de beneficios

96

Resultados y discusión

98

Costos de producción

99

Costos de la fuerza laboral

100

Costos de operación

101

Beneficio de la empresa

102

Bienestar social

103

Conclusiones

104

Referencias

107

CAPÍTULO VI

Predicción de los Índices Nacionales Precio Productor utilizando Redes Neuronales Artificiales

107

Introducción

111

Metodología

111

Obtención de información

112

Organización de datos

113

Redes neuronales artificiales

116

Métrica de error

117

Resultados y discusión

120

Conclusiones

120

Referencias

123

CAPÍTULO VII

Aplicación de la nueva ingeniería en el modelado de un reflector Fresnel para la generación directa de vapor

123

Introducción

125

Metodología. La nueva ingeniería y la ingeniería convencional

125

Motivación del abandono de la ingeniería convencional

126

Por qué los símbolos de parámetros en las ecuaciones no pueden representar racionalmente el valor numérico y la dimensión

126

La primera ley de la ingeniería convencional

128

Porqué las leyes análogas a $y = (\frac{y}{x})x$ son execrables en ciencias e ingeniería

129

La nueva transferencia de calor

131

Prueba de que h es innecesario e indeseable

133

Aplicación de la nueva ingeniería en un reflector Fresnel para la generación directa de vapor

133

Descripción del sistema

136

Descripción del modelo

138

Convección

140

Radiación

141

Conducción

141

Absorción de la radiación solar

142

Validación del modelo

144

Aplicación del modelo al caso de estudio

146

Conclusiones

147

Referencias

151

CAPÍTULO VIII

Simulación de la escorrentía e hidrodinámica de una cuenca pequeña utilizando un modelo hidráulico bidimensional

151

Introducción

153

Zona de estudio

153

Cuenca Hidrológica del cauce Agua Bendita

155

Metodología

158	Simulación
160	Datos de entrada al modelo IBER
161	Resultados y discusión
165	Conclusiones
166	Referencias

169	CAPÍTULO IX Estimación del rendimiento hídrico y su contribución a la recarga potencial del agua subterránea con el modelo hidrológico Seasonal Water Yield en una subcuenca del Acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro
-----	---

169	Introducción
170	Metodología. Descripción del área de estudio
172	Desarrollo teórico del modelo Seasonal Water Yield
173	Estimación del rendimiento hídrico
175	Calibración del modelo
176	Resultados y discusión
179	Rendimiento hídrico periodo 1975-1980
182	Conclusiones
183	Referencias

187	CAPÍTULO X Modelo de decisión para tratamientos secundarios de aguas residuales
-----	--

187	Introducción
189	Metodología
192	Resultados y discusión
199	Conclusiones
200	Referencias

203	Conclusiones generales
-----	--

Introducción

Contribuciones a la Ingeniería y Ciencias del Agua es un libro científico cuyos diez capítulos incluyen propuestas de investigación en ciencia básica y aplicada a problemas de inteligencia artificial, minería de datos, ingeniería sísmica, análisis de riesgo, transporte y tratamiento de aguas e hidrología.

La computación, como rama de las Ciencias de la Ingeniería aplica ciencia de frontera a la generación de nuevo conocimiento y tecnología, combinando teoría y experimentación, ya sea a través de cálculos automatizados, simbólicos o heurísticos, para brindar soluciones precisas o aproximadas de problemas, que puedan aplicarse en la investigación o en la industria. De forma inicial, tres estudios con enfoque de ciencia básica son presentados a continuación.

En el Capítulo 1 “Aplicación de la teoría de grafos para el tratamiento de complejidades de los datos”, Guzmán, Valdovinos, Marcial, Sánchez y Montenegro presentan un estudio empírico para mostrar la utilidad que tiene el uso de grafos en el tratamiento de algunas complejidades de los datos que afectan el rendimiento de los modelos de minería de datos. Modelar la solución en estructuras de grafos puede ser de gran utilidad en diversas áreas del conocimiento para resolver problemas complejos, tales como control de calidad, detección de fraudes, diagnóstico asistido por computadora, detección de enfermedades raras, entre otras. No obstante, por su naturaleza los datos tienen aspectos negativos que disminuyen la tasa de efectividad en el proceso de extracción del conocimiento, por lo que requieren de técnicas que los solventen sin perder información útil.

En el Capítulo II “Gramática para la estructura morfológica de criaturas virtuales considerando premisas de vida”, Mercado, Muñoz y Ramos proponen un modelo basado en premisas de la vida natural para generar criaturas virtuales. Los autores presentan una propuesta de modelado de criaturas virtuales empleando una metodología de desarrollo incremental que permite incorporar premisas identificadas en otras disciplinas. Partiendo de la identificación de premisas se selecciona un subconjunto inicial de éstas para su inclusión en el modelado. El modelo obtenido es probado en cuanto a su viabilidad y efectividad respecto a otros acercamientos. En este contexto, las criaturas virtuales son entes que se generan dentro de simulaciones por computadora, en las que se crea un entorno virtual poblado por criaturas virtuales. Estas simulaciones tienen múltiples propósitos que van del estudio de fenómenos del mundo natural hasta el diseño de mecanismos.

Bernal, Valdovinos, Rodríguez y Marcial, en el Capítulo III “Patrones Similares Frecuentes, un nuevo enfoque para describir los conjuntos de datos”, argumentan que los Patrones Frecuentes juegan un papel esencial en las tareas de minería de datos que encuentran relaciones interesantes entre los datos. También indican que la mayoría de los algoritmos utilizados para el minado de Patrones Frecuentes consideran en el conteo a los patrones que son estrictamente iguales.

No obstante, existen algoritmos que encuentran patrones usando funciones de similitud diferentes de la igualdad, llamados Patrones Similares Frecuentes. Por esa razón se centran en el análisis de las ventajas del minado de los Patrones Similares Frecuentes con respecto al enfoque tradicional.

En este orden de ideas, la optimización de los procesos en la cadena de suministro es una necesidad imperiosa derivada de las condiciones actuales que las empresas enfrentan ante un mercado globalizado. Para ello, contar con redes de distribución altamente eficientes, que agilicen la dinámica de los flujos tanto de insumos como de productos terminales y capital humano que se movilizan en torno a sus empresas participantes es de gran interés hoy día. Al respecto, dos trabajos se presentan a continuación.

Loza y Najera, en el Capítulo iv “Una revisión preliminar de literatura cualitativa sobre la evaluación de riesgos en eventos naturales”, proporcionan literatura de tipo cualitativa para valorar el riesgo de eventos naturales enfocados, principalmente, en los hidrometeorológicos en la logística humanitaria y cómo estos eventos afectan a las personas, las cadenas de suministro y el medio ambiente. Loza y Najera presentan los estudios de forma cronológica y deductiva a los temas abordados y con ello muestran la evolución de los trabajos desarrollados, así como su importancia para la generación de estrategias de prevención en beneficio de la población, además es una extensión de la literatura en temas de logística humanitaria para los tomadores de decisiones involucrados en esta área del conocimiento y futuras investigaciones. Es de suma importancia que actualmente los investigadores y expertos presten especial atención a los eventos naturales, principalmente a aquellos que causan desastres, debido a los efectos que éstos provocan en las áreas donde ocurren. Para mitigar estos efectos se han desarrollado metodologías cualitativas, cuantitativas e híbridas, para evaluar el riesgo de estos eventos y generar estrategias que permitan prevenir a las personas que viven en áreas de riesgo, con el fin de reducir su impacto en la salud y las propiedades de las personas, las actividades socioeconómicas de la población y el medio ambiente.

Por otro lado, con el fin de analizar las implicaciones de los esquemas de regulación en el desempeño de un sistema de transporte público urbano de pasajeros, en el Capítulo v “Esquema de regulación del sistema de transporte público de pasajeros basado en la teoría de contratos”, Najera, Loza y Agüero, muestran que si el servicio de transporte público de pasajeros es regulado por el gobierno a través de un contrato por incentivos que realiza gobierno-empresa, el servicio ofrecido será de calidad, seguro y eficiente. Se plantea un modelo analítico que considera a tres actores: el usuario, la empresa y la autoridad, los cuales tendrán beneficios cualitativos, como la calidad, seguridad, tiempos cortos de viaje, y cuantitativos como tarifas más bajas para el usuario, se crean externalidades positivas que impactan al gobierno y a la sociedad, mayor utilidad para el concesionario, entre otros. Todo esto por medio de dos instrumentos:

el primero es el contrato de *mayor-costo* en donde hay mucho riesgo de incrementos exógenos de costos que perjudican directamente al usuario y el de *precio-fijo*, basado directamente en incentivos para las concesionarias, las cuales están obligadas a absorber los costos generados por una mala operación.

Por su parte, Bautista, Portillo, Rodríguez y Delgado en el Capítulo VI “Predicción de los Índices Nacionales Precio Productor utilizando Redes Neuronales Artificiales”, utilizan redes neuronales artificiales para predecir el Índice Nacional Precio Productor del concreto premezclado a partir de los valores de una serie de tiempo. Con la determinación del modelo óptimo, los resultados mostraron predicciones comparables con las reportadas por la literatura que utilizan otras técnicas de predicción de series de tiempo. El estudio toma relevancia debido a que en la industria de la construcción la variación de los costos de los insumos deriva en cambios en los costos finales de los proyectos, lo que incrementa la incertidumbre dentro de la industria.

Otros estudios orientados a investigación en temas de ingeniería sísmica y sistemas energéticos son presentados en los siguientes capítulos. Consecutivamente, en el Capítulo VII “Aplicación de la nueva ingeniería en el modelado de un reflector Fresnel para la generación directa de vapor”, González y Durán discuten que la generación directa de vapor es una alternativa prometedora en las plantas solares para la conversión de energía térmica en eléctrica. La equivalencia óptica de colectores pasantes parabólicos y reflector Fresnel lineal, demostrada por varios autores, ha llevado a la propuesta de la integración de la generación directa de vapor en sistemas reflectores Fresnel lineales para centrales de vapor que emplean ciclos Rankine; como el Puerto Errado (Portugal), Kimberlina (EUA) o Liddell (Australia). Por lo anterior, desarrollan un modelo térmico de una planta de energía solar de configuración conceptual con reflectores Fresnel y generación directa de vapor. Emplean una metodología novedosa en el modelo térmico que les permite resolver el sistema de ecuaciones no lineales de manera simple, al omitir el uso de coeficientes convectivos, con la capacidad de extender el análisis para diferentes fluidos de trabajo.

Otra vertiente computacional es el desarrollo de *software*. Al respecto, en los siguientes tres capítulos se muestra la forma en que estos desarrollos son utilizados como herramienta de apoyo a la gestión de recursos hídricos, desde el conocimiento hidrodinámico en los escurrimientos y recarga (o falta de ellos), así como el conocimiento sobre la calidad del agua y la selección adecuada para su tratamiento.

Salinas, Álvarez y Becerril, en el Capítulo VIII “Simulación de la escorrentía e hidrodinámica de una cuenca pequeña utilizando un modelo hidráulico bidimensional”, aplican un modelo hidráulico bidimensional para reproducir la escorrentía superficial permitiendo obtener la respuesta hidrológica de una microcuenca tributaria correspondiente a una porción de un cauce natural. Estimaron la intensidad de precipitación sobre la cuenca, obteniendo los hietogramas de diseño asociados a diferentes periodos de retorno, y con ello alimentar el modelo hidrodinámico para obtener los tirantes y velocidades de flujo. Además, con ayuda del uso de sistemas de información geográfica y modelos digitales de elevación se lograron caracterizar la topografía, ocupación y rugosidad espacial en la cuenca ejemplificando la utilidad de estas herramientas, las cuales les permitieron mejorar la precisión en la distribución espacial de los parámetros del modelo, optimizando tiempos y recursos.

En el Capítulo IX “Estimación del rendimiento hídrico y su contribución a la recarga potencial del agua subterránea con el modelo hidrológico Seasonal Water Yield en una subcuenca del Acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro”, Hervis, Gómez, Expósito, Medina, Fonseca y Arévalo, señalan que el conocimiento del balance hídrico en una cuenca hidrográfica es un requisito indispensable en la gestión sostenible de los recursos hídricos. Con la utilización del modelo hidrológico distribuido InVEST Seasonal Water Yield los autores estimaron los escurrimientos medios mensuales para el periodo 1975-1980 en el Acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro (AVSJR), que es una zona de especial vulnerabilidad climática y con una alta presión en los recursos hídricos disponibles debido a que el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento de agua potable, permanente y segura en la región. Al comparar los escurrimientos medios

mensuales observados con los obtenidos por el modelo, concluyeron que el método de cálculo subestima el rendimiento hídrico observado en 0.91%. Además, los recursos hídricos superficiales que se producen en la región en el periodo analizado ascienden a 25.28 hm³ con una diferencia de 2.063 hm³ entre los valores simulados y observados, así como la recarga potencial del agua subterránea que es de 4.09 hm³.

Medina, Fonseca, Gallego, Morales, Gómez, Esparza, Mastachi y García en el Capítulo x “Modelo de decisión para tratamientos secundarios de aguas residuales”, revelan que la incorporación de esquemas de reutilización de agua en los sistemas de infraestructura es un proceso complejo de toma de decisiones que involucra diversos criterios económicos, tecnológicos y ambientales, bajo una variedad de incertidumbres relacionadas con los seres humanos y condiciones operativas, principalmente por su heterogeneidad espacial y accesibilidad. Para abordar la complejidad en la selección del tratamiento secundario (biológico) de agua residual por medio de un sistema de soporte de decisiones (DSS, Decision Support System), basado en redes Bayesianas, realizan una evaluación de las variables de entrada más relevantes en la selección de procesos unitarios secundarios convencionales bajo distintos indicadores de rendimiento.

Sin duda, los temas abordados en este libro son actuales y obligados para estudiantes de nivel licenciatura y posgrado de Ciencias de la Ingeniería y del Agua, así como para todos aquellos tomadores de decisiones de instituciones gubernamentales y privadas en el área de ingeniería y tecnología, que involucran a la ingeniería civil, ingeniería en computación, hidráulica y que promueven la mejora de nuestro ambiente.

Con la certeza de que el lector hallará interesante, útil y reflexivo el contenido de esta obra reconocemos a la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México su compromiso y apoyo en la contribución a la difusión del quehacer de esta comunidad científica.

Coordinadoras
Ma. de Lourdes Najera López
Rosa María Valdovinos Rosas

CAPÍTULO I

Aplicación de la teoría de grafos para el tratamiento de complejidades de los datos

A. Guzmán-Ponce, Rosa María Valdovinos Rosas, J. R. Marcial-Romero,
J. S. Sánchez y Héctor Miguel Montenegro Monroy

Introducción

En la actualidad, la extracción de conocimiento a partir de conjuntos de datos ha adquirido más valor para las empresas y se está convirtiendo en un activo en la toma de decisiones; no obstante, los conjuntos de datos generados por sensores, sistemas de almacenamiento, interacción en redes sociales u otros medios se encuentran afectados por diversos factores que disminuyen el rendimiento en modelos de aprendizaje [1]. Estos factores adversos comúnmente son denominados complejidades de los datos, entre los principales se encuentran [2], [4]:

- **Desbalance de clases.** Se presenta cuando la distribución de las instancias por clase no es balanceada. Es decir, una o más de las clases tienen un número de instancias notablemente mayor en comparación con el resto de las clases. Un ejemplo de esto se encuentra en contextos financieros, donde el número de transacciones fraudulentas en esquemas de detección de fraude es menos representativo, en comparación con el número total de solicitudes.
- **Solapamiento de clases.** Es cuando existen instancias de diferentes clases que se entrecruzan, es decir, instancias con atributos poco discriminantes. El problema de reconocimiento de personas sanas y enfermas en el área médica es un claro ejemplo ya que si las características que definen una enfermedad no

son plenamente diferenciadas se pueden registrar casos tanto de personas sanas como enfermas, pero que comparten las mismas características.

- **Patrones atípicos o ruido.** Una instancia se denomina atípica cuando, al tener bien definida la clase a la que pertenece, ésta difiere significativamente del resto de instancias que pertenecen a la misma clase. Un ejemplo de ello ocurre cuando una persona joven se diferencia del resto de su grupo de edad al presentar incontinencia urinaria, que suele manifestarse en etapas avanzadas de la vida.

Por otro lado, una instancia considerada como ruido es una instancia mal etiquetada, que ha sido asignada a una clase equivocada debido a su similitud con instancias de otra clase. Un ejemplo médico es cuando personas diagnosticadas con neumonía atípica son identificadas como COVID-19, debido a la similitud en sus signos y síntomas.

- **Alta dimensionalidad.** Hace referencia al elevado número de características que se requieren para describir un patrón, de tal forma que en algunos casos puede ser mayor que el número de instancias que integran el conjunto de datos. Este problema es común en las micro matrices que miden la expresión genética, donde se pueden tener decenas de cientos de instancias, cada una de las instancias pueden tener docenas de miles de genes (características).

Todos estos factores negativos han sido tema de estudio para el área de minería de datos y reconocimiento de patrones, debido al impacto negativo que tienen en modelos de aprendizaje, logrando que las tasas de precisión disminuyan. La complejidad de mayor impacto y presencia en problemas del mundo real es el desbalance de clases, el cual se puede encontrar en infinidad de ámbitos de la vida cotidiana [1].

Por otro lado, la teoría de grafos ha sido ampliamente estudiada en matemáticas y comúnmente usada en diversas áreas del

conocimiento, tales como la biología, química, redes de comunicación, entre otros [4]. En los últimos años se ha vuelto popular en áreas de inteligencia artificial por la capacidad de representar problemas complejos en términos de vértices y aristas.

La idea de utilizar una estructura de grafos para representar el conjunto de datos o un subconjunto de éste, al mismo tiempo que se tratan algunas de las complejidades existentes en él, es lo que motiva la realización de este estudio. Para este fin se presenta un estudio empírico de propuestas basadas en grafos para solventar algunas de las complejidades existentes en los datos.

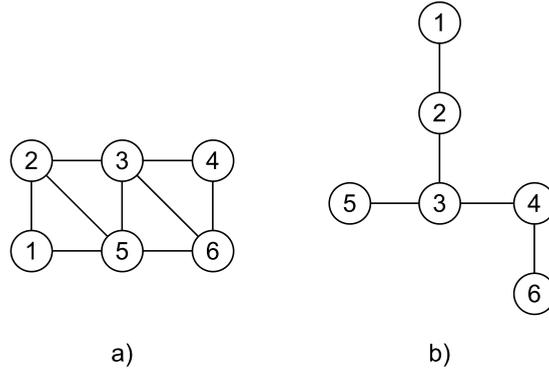
Teoría de grafos

Un *grafo* es una estructura formada por elementos denominados *vértices* y por una relación entre ellos, denominada *aristas*¹ [5]. Un *grafo completo* es un grafo en el cual cualquier par de vértices está conectado por una arista. El *vecindario* de un vértice v en un grafo es el conjunto de vértices adyacentes a v , es decir comparten arista con v . En este sentido, *subgrafo* de un grafo G es un grafo cuyos conjuntos de vértices y aristas son subconjuntos de los de G ; se dice que es *inducido* cuando contiene un subconjunto de vértices Y del grafo original y cuyas aristas constan de todas las aristas del grafo original, que tienen ambos extremos en Y .

Un tipo de estructura que se utiliza comúnmente en grafos es el árbol, que se define como un grafo sin ciclos, lo que significa que hay un único camino que une cualquier par de vértices. Por otro lado, un árbol de expansión es aquel que incluye todos los vértices del grafo original, pero no incluye aristas que formen ciclos (Fig. 1b muestra un posible árbol de expansión del grafo del grafo a su izquierda) [5].

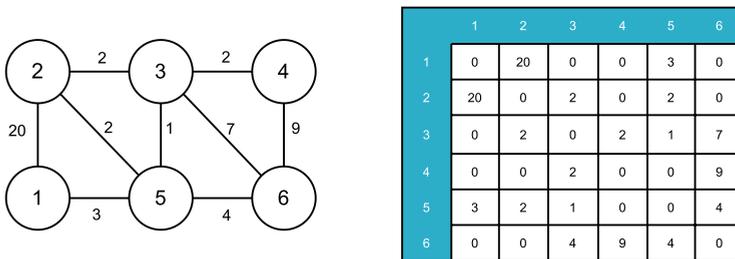
¹ Los vértices son nodos en una estructura de grafo, mientras que las aristas son las líneas que conectan los vértices, éstas representan una relación entre ellos.

Fig. 1. Ejemplo de grafos. a) Grafo simple; b) Árbol.



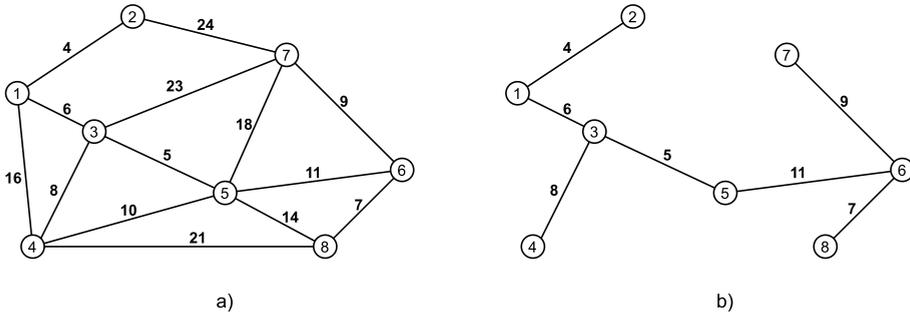
Un *grafo ponderado* G_w es un grafo donde cada arista tiene asociado un valor real, denominado peso. Una manera computacional de representar un grafo es por medio de una *matriz de adyacencia* (matriz bidimensional), donde cada una de las filas y columnas representa un vértice en el grafo: el valor que se almacena en la fila u y columna v indican si hay una arista entre los vértices u y v . Para el caso de un grafo ponderado, el valor asociado en la matriz será el peso de la arista, la Fig. 2 ilustra la matriz adyacencia del grafo ponderado de su izquierda.

Fig. 2. Ejemplo de matriz de adyacencia.



Por último, un *Árbol Mínimo de Expansión* de un grafo G_w es un subgrafo formado por un subconjunto de aristas de G_w , que conecta a todos los vértices, sin ciclos con la condición de tener el mínimo peso total de aristas (Fig. 3).

Fig. 3. Grafos ponderados.
a) Grafo ponderado; b) Árbol de Expansión Mínimo.



Tratamiento de complejidades de los datos

Existen dos categorías principales en el preprocesado de datos: preparación y reducción [6]. En la preparación, el conjunto de datos es ajustado para que algún modelo de aprendizaje lo use, en específico, los algoritmos de limpieza identifican datos redundantes, como ruido o solapamiento y se busca repararlos. En tanto que, en la reducción se busca obtener una representación reducida de los mismos sin comprometer la integridad del conjunto original. En específico, para el tratamiento de desbalance de clases, se utilizan técnicas de remuestreo clasificadas en tres categorías [2], [6]:

- **Bajo-muestreo:** Consiste en eliminar instancias, usualmente de la clase mayoritaria, con el fin de reducir el tamaño del conjunto de datos.

- **Sobre-muestreo:** Implica la creación o replicación de instancias comúnmente de la clase minoritaria.
- **Métodos híbridos:** Consiste en aplicar tanto técnicas de bajo-muestreo, como técnicas de sobre-muestreo.

La generación de grandes volúmenes de información, a menudo, implica limitaciones de recursos para la clasificación, así como en la necesidad de transformar los conjuntos de datos en formatos adecuados para poder extraer valor de ellos. Por consiguiente, en este estudio nos enfocaremos en los métodos de bajo-muestreo.

Uno de los métodos más usado es el bajo-muestreo aleatorio, RUS por sus siglas en inglés (*Random under-sampling*) [1]; este método equilibra el conjunto de datos mediante la eliminación aleatoria de instancias que pertenecen a la clase mayoritaria. Una limitante de este método es la posibilidad de eliminar información relevante por no tener un mecanismo de control en la eliminación.

Otros métodos son los basados en el vecindario de instancias, los cuales en su mayoría toman los k vecinos más cercanos. Algunos algoritmos de este tipo son el condensado de Hart (CNN) [7], el cual elimina instancias que están lo suficientemente lejos de la frontera de decisión y los enlaces de Tomek (TL) [8], el cual elimina todas aquellas instancias que formen un enlace denominado Tomek, por considerarlas ruidosas al estar la frontera de decisión.

Otras técnicas son los denominados ensembles, los cuales realizan la combinación de un conjunto de clasificadores con alguna técnica de remuestreo, para mejorar el rendimiento de los clasificadores. Un ejemplo es el algoritmo RUSBoost (Rbt) [9], el cual combina RUS con un conjunto de clasificadores que buscan reducir el sesgo por la clase mayormente representada. Otro ejemplo es la utilización de filtro de ruido (EEKF) [10], en el que se filtra la clase minoritaria eliminando instancias consideradas como ruido, cuyos vecinos pertenecen a la clase mayoritaria. Después, se entrenan varios modelos de aprendizaje con los diferentes subconjuntos creados. Al final se fusionan las mejores instancias de cada modelo de aprendizaje.

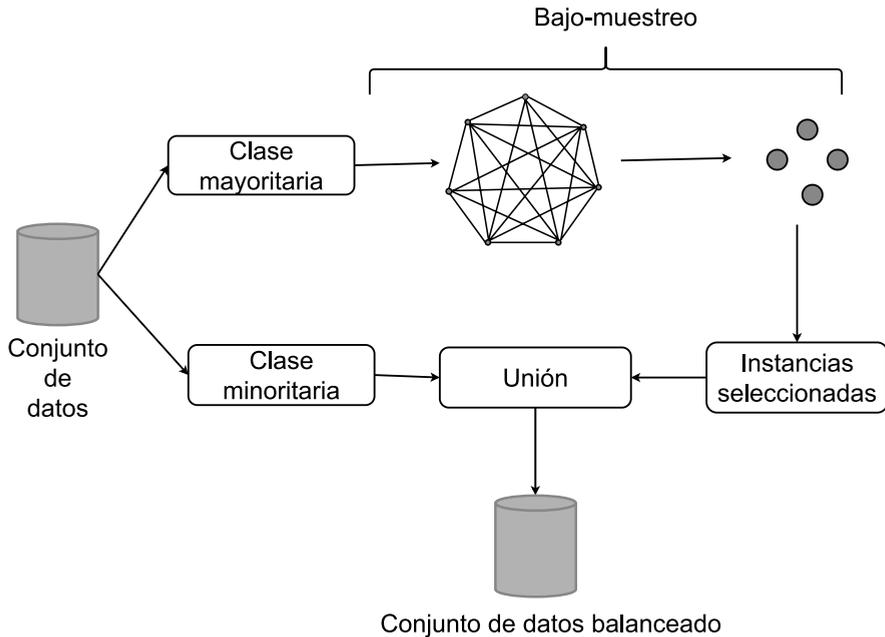
Otras técnicas son basadas en agrupamiento, un ejemplo es el método *Clustering-based undersampling* (CBU) [11], que genera g centros para representar la clase mayoritaria mediante el algoritmo K-Means.

Metodología

Algoritmos basados en grafos

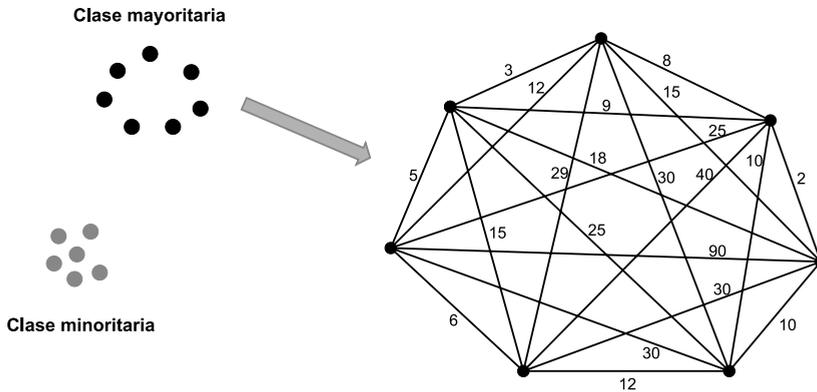
Los algoritmos basados en grafos para abordar el desbalance de clases se fundamentan principalmente en la obtención del contorno de la clase mayoritaria o del núcleo de sus instancias [12]. La idea general se muestra en la Fig. 4.

Fig. 4. Flujo de trabajo de algoritmos basados en grafos.



El proceso de la Fig. 4 inicia con la representación de la clase mayoritaria como un grafo completo ponderado. Esta representación se muestra en la Fig. 5, en la que las instancias de la clase mayoritaria se visualizan como los vértices del grafo y la unión entre cada par de instancias y tienen asignado un valor o peso correspondiente a la distancia euclídea existente entre un vértice y otro, es decir, entre dos instancias.

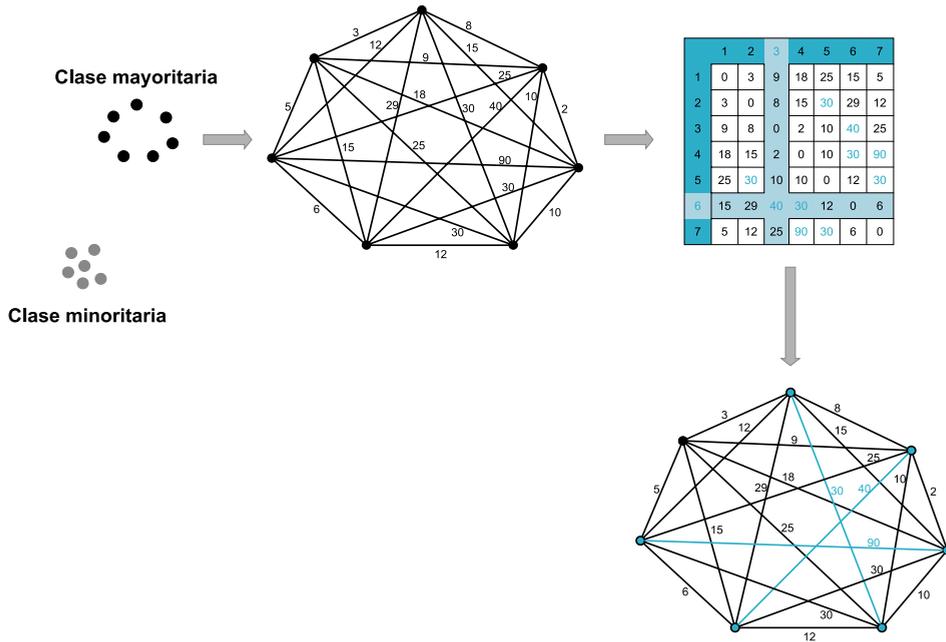
Fig. 5. Representación de la clase mayoritaria en un grafo.



Una vez construido el grafo completo ponderado de la clase mayoritaria es posible aplicar alguna de las siguientes estrategias [12]:

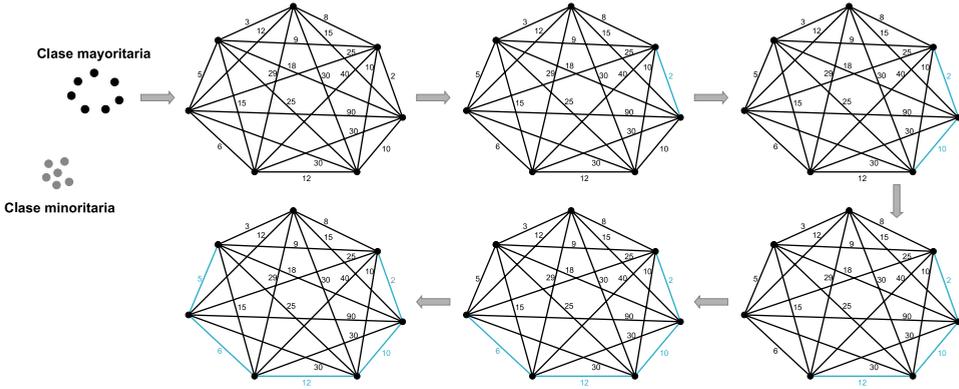
- **Subgrafo inducido (IG-US):** se buscan mantener todas aquellas instancias que están más alejadas unas de las otras, por medio de la matriz de adyacencia del grafo (Fig. 6). Por ejemplo, la fila y columna marcada de naranja hacen referencia a que el par de vértices {3,6} será considerado en el subgrafo inducido, ya que tiene una de las distancias más lejanas entre ellos.

Fig. 6. Construcción de un subgrafo inducido a partir de la clase mayoritaria.



- **Árbol de expansión mínimo (MIST-US) [12]:** su objetivo es obtener la representación del núcleo de clase mayoritaria descartando todas aquellas instancias que están lo suficientemente cerca de la frontera de decisión (Fig. 7). Para la construcción del árbol, el primer paso es considerar un vértice pivote, el siguiente vértice será aquel cuya arista que comparte con el vértice pivote tenga el menor costo, siempre y cuando no forme un ciclo. Para que éste último sea ahora un vértice pivote, el proceso se repite hasta haber visitado todos los vértices.

Fig. 7. Construcción de un árbol de expansión mínimo a partir de la clase mayoritaria.



Para ambas propuestas, una vez construido el grafo, se toman un número representativo de instancias, considerando la proporción deseada de balance a obtener.

Análisis experimental

Como se mencionó, comúnmente los conjuntos de datos tienen algún problema que deteriora el desempeño de los modelos de clasificación, para evitarlo se han desarrollado diversas estrategias, entre las cuales la teoría de grafo comienza a mostrar resultados prometedores.

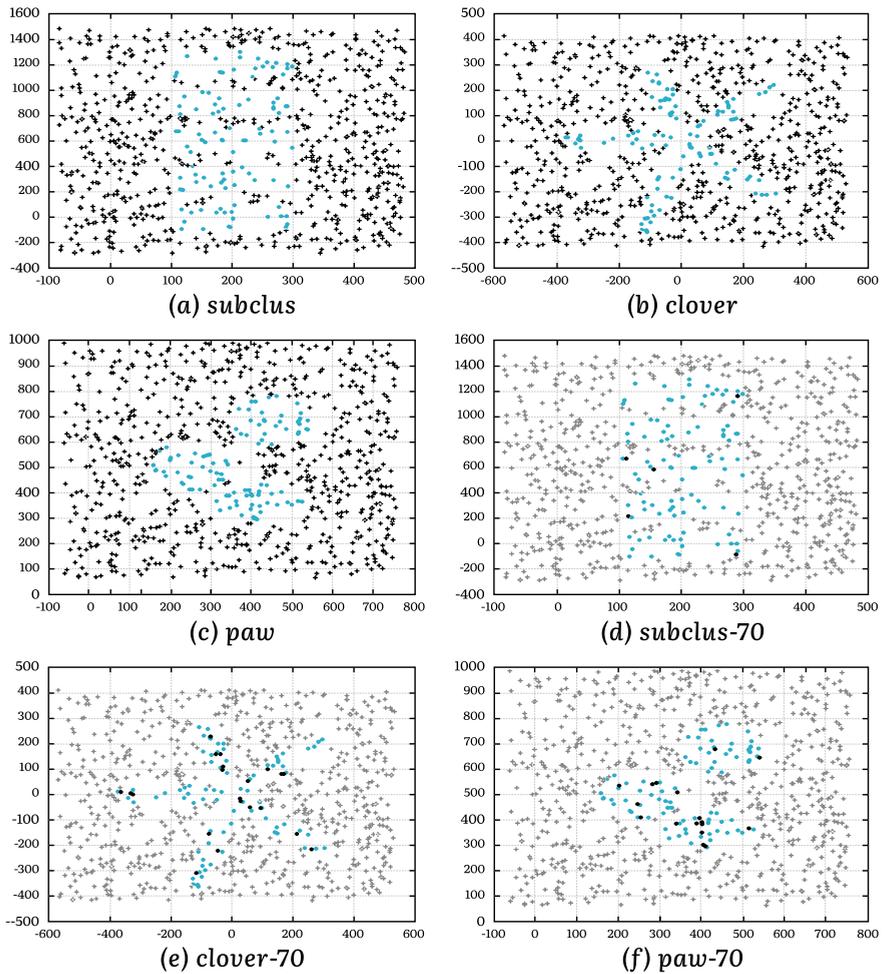
En esta sección se presenta un análisis experimental sobre conjuntos de datos sintéticos en los que se busca analizar los efectos de técnicas de bajo-muestreo en un ambiente controlado.

Conjuntos de datos

Para el análisis presentado en esta sección se utilizaron 6 conjuntos de datos sintéticos denominados *subclus*, *clover* y *paw* obtenidos de *Imbalanced data sets* [14]. Cada conjunto de datos está formado por

800 instancias, un grado de desbalance de 7; 3 de ellos sin ruido y los 3 restantes con un 70% de ruido (ver Fig. 8).

Fig. 8. Distribución de los conjuntos de datos sintéticos con ausencia de ruido y con presencia del 70% de ruido [13].



El ruido hace referencia a instancias mal etiquetadas o a las que se les cambia el valor de una característica sin alterar su etiqueta de clase.

En todos los conjuntos de datos, las instancias de clase minoritaria (puntos azules) están uniformemente rodeados por instancias de clase mayoritaria (puntos negros).

Para el conjunto de datos *subclus* (Fig. 8a) las instancias pertenecientes a la clase minoritaria forman rectángulos de manera disjunta. Mientras que en el conjunto *clover* (Fig. 8b), las instancias de clase minoritaria asemejan una flor con pétalos elípticos. Por último, en el conjunto de datos *paw* (Fig. 8c) la clase minoritaria se ubica en tres subregiones, de las cuales dos están ubicadas cerca una de la otra y una más pequeña está separada. Este último conjunto de datos puede representar de mejor manera datos de algún problema de la vida real, mientras que los conjuntos de datos *subclus* y *clover* constituyen formas más complejas de aprender.

El porcentaje de ruido en cada conjunto de datos está distribuido sobre ambas clases, en las Fig. 8(d), 8(e) y 8(f) la presencia de ruido se ilustra en color gris.

Medidas de evaluación

En los experimentos se utilizaron dos de los clasificadores más populares en aprendizaje automático: regla del vecino más cercano (1NN) y árbol de decisión (J48), ambos con los parámetros predeterminados por el *software* de código abierto WEKA [15].

Las medidas de evaluación se obtienen de la matriz de confusión, la cual permite analizar por separado la tasa de aciertos de la clase positiva o Verdaderos Positivos (VP) y los aciertos de la clase negativa o Verdaderos Negativos (VN). Con estos datos es posible obtener la media geométrica, medida utilizada en escenarios de desbalance de clase lo cual se puede calcular de la siguiente manera (Ec. 1):

$$G_{\text{mean}} = \sqrt{\frac{VP}{(VP+FN)} \cdot \frac{VN}{(VN+FP)}} \quad (1)$$

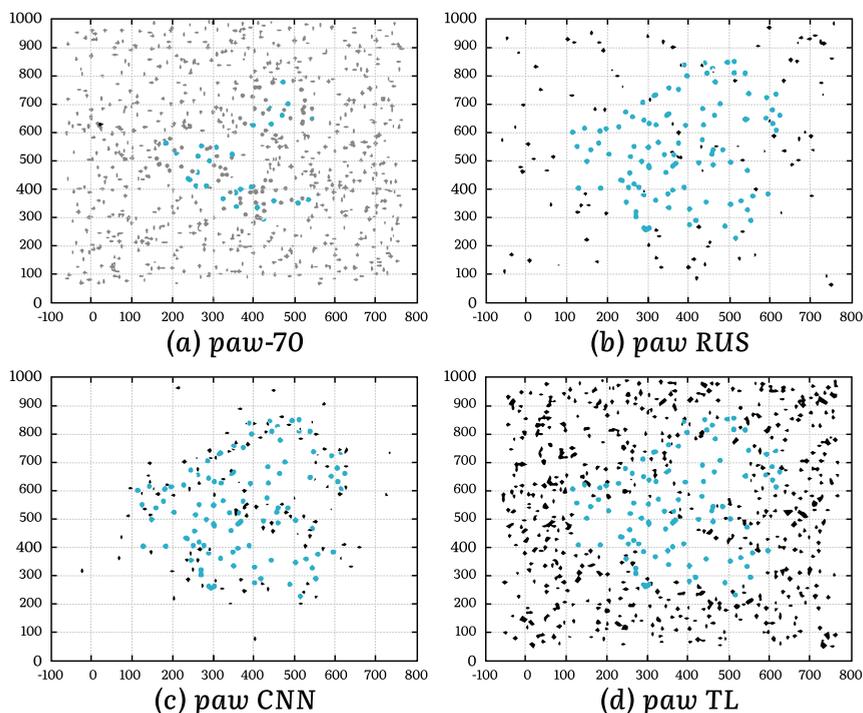
Para determinar las diferencias estadísticamente significativas entre más de dos métodos se aplica la prueba de Friedman, la cual asigna

valor de 1 al mejor resultado, en sucesión al resto de los métodos. En caso de tener empates se asigna un rango promedio entre los métodos empatados.

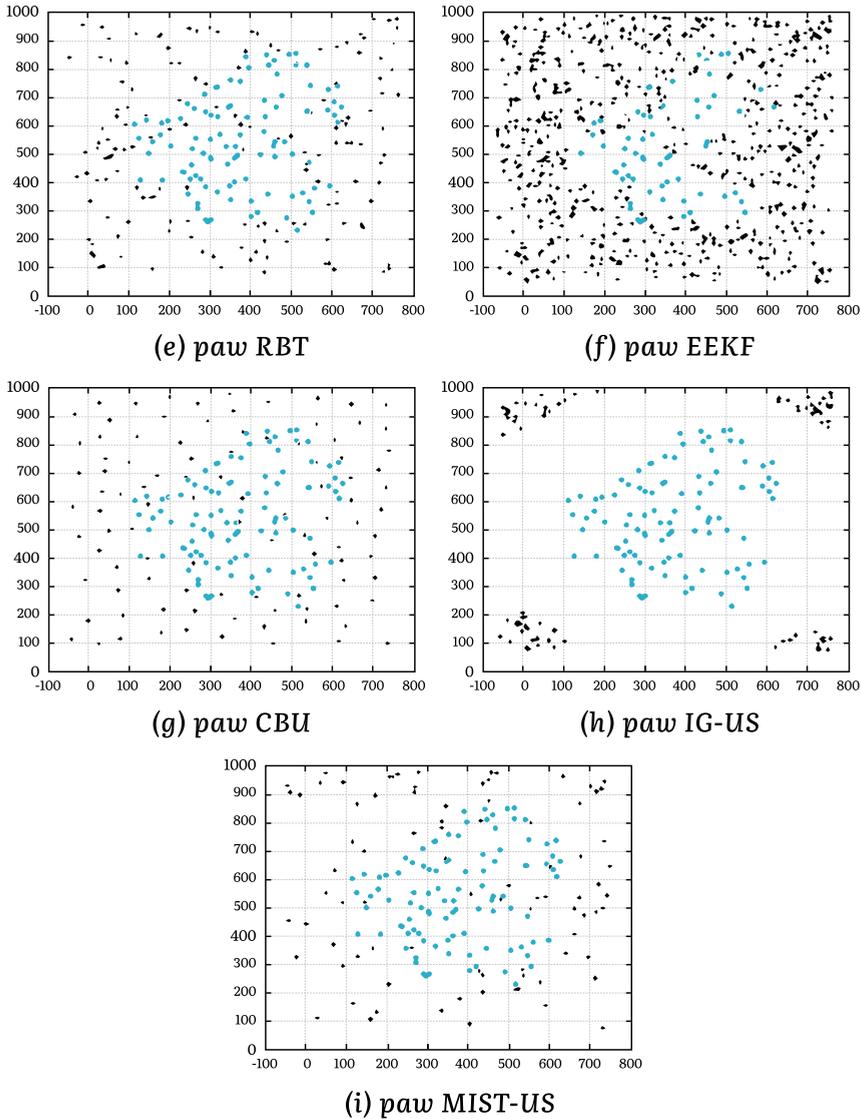
Resultados y discusión

Una vez preprocesados los conjuntos de datos por 8 técnicas de bajo-muestreo², en la Fig. 9 se presenta la dispersión final de los conjuntos de datos *paw* con 70% de ruido.

Fig. 9. Distribución de los conjuntos de datos sintéticos con 70% de ruido posterior a aplicar estrategias basadas en grafos [13].



² Random Under-sampling (RUS), Condensado de Hart (CNN), Enlaces de Tomek (TL), RUSBoost (RBT), Filtro de ruido (EKF), Clustering-based undersampling (CBU), Subgrafo inducido (IG-US) y Árbol de expansión mínimo (MIST-US).

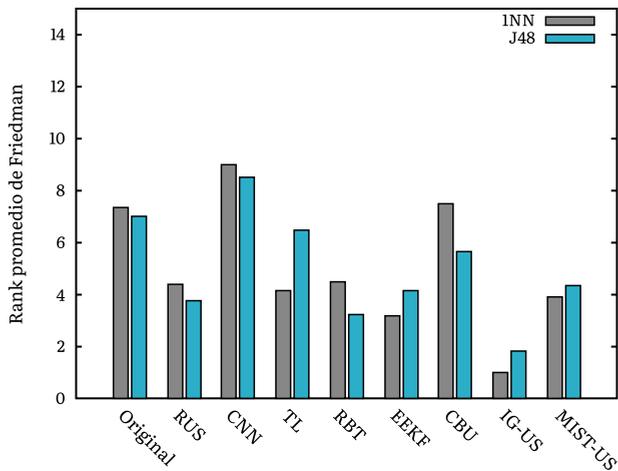


Como se puede observar en la Fig. 9, el comportamiento del método CNN hace que la clase mayoritaria aparentemente sea más pequeña que la clase minoritaria. En tanto que el método TL y EEKF muestran un deficiente balance de clases, ya que en ambos casos el tamaño de

la clase mayoritaria parece conservarse. Los métodos que claramente balancean el conjunto de datos son RUS, RBT, CBU y los métodos basados en grafos (IG-US y MIST-US).

Particularmente, al obtener el IG-US la dispersión de la clase mayoritaria se aleja completamente de la clase minoritaria, dado que se toman en consideración las instancias que están lo más alejadas unas de las otras, contrario al resultado obtenido con MIST-US, en el que las instancias se mantienen cerca de la frontera de decisión. La Fig. 10 muestra el análisis estadístico de los resultados de la clasificación. Se presentan los promedios obtenidos del rango de Friedman por cada método de bajo-muestreo utilizado.

Fig. 10. Rango promedio de Friedman para los métodos de bajo-muestreo.



En la Fig. 10 el método IG-US presentó mejores resultados para ambos clasificadores, lo que sugiere que al conservar instancias alejadas entre sí se logra una representación adecuada de la clase mayoritaria. No obstante, se puede apreciar que el método RBT obtiene mejor rendimiento para el clasificador J48 en comparación de RUS, esto sugiere que incorporar un sistema de múltiples clasificadores al balanceo aleatorio mejora los resultados. Por último, el comportamiento de

CNN es el más deficiente frente al resto, esto sucede por la enorme cantidad de instancias extraídas.

Conclusiones

Desafortunadamente es inevitable la presencia de factores negativos en conjuntos de datos. Por lo tanto, se necesitan técnicas para hacer frente a estos factores, tales como la limpieza de datos, la imputación de valores faltantes, la normalización y estandarización, y el remuestreo.

Actualmente, la teoría de grafos se convierte en una potencial área de uso en técnicas de minería de datos, ya que los problemas pueden esquematizarse y tratarse como un grafo.

En este capítulo se ha presentado un estudio exhaustivo que contempla 8 métodos ampliamente usados en la literatura para el tratamiento del desbalance, incluidas dos técnicas basadas en grafos.

Puntualmente, del estado del arte se observa que las técnicas basadas en vecindario dependen de un número *k a priori* de vecinos, con la desventaja de no establecer un valor general para todos los conjuntos de datos, mientras que las técnicas que combinan métodos *ensemble* o *clustering*, mantienen una dependencia en establecer en principio un número de grupos o vecinos, que a su vez no es el mismo para todos los conjuntos. Mientras que las técnicas basadas en grafos dependen únicamente de la dispersión de las muestras, adicionalmente, son técnicas deterministas, lo que permite obtener invariablemente resultados consistentes bajo condiciones iniciales similares.

Los resultados obtenidos permiten observar que los métodos basados en grafos obtienen conjuntos de datos reducidos sin pérdida de información útil con un mejor comportamiento en términos de media geométrica, en comparación de otros métodos. Por lo que el uso de teoría de grafos es prometedora al esquematizar el conjunto de datos en un grafo completo y permite mantener información de todo el conjunto de datos. Adicionalmente, la reducción del tamaño del conjunto sin pérdida de información es ideal frente a los nuevos retos de grandes volúmenes de datos.

Las líneas abiertas de estudio apuntan a probar las técnicas basadas en grafos en modelos de aprendizaje no supervisado, así como la necesidad de trasladar la concepción en problemas con más de dos clases. Por último, estudiar el comportamiento de algoritmos basados en grafos para grandes volúmenes de datos.

Referencias

- [1] A. Guzmán-Ponce, R. M. Valdovinos, J. S. Sánchez, y J. R. Marcial-Romero, “A new under-sampling method to face class overlap and imbalance”, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, núm. 15, 2020, doi: 10.3390/app10155164.
- [2] L. E. B. Ferreira, J. P. Barddal, F. Enembreck, y H. M. Gomes, “An Experimental Perspective on Sampling Methods for Imbalanced Learning from Financial Databases”, *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, doi: 10.1109/IJCNN.2018.8489290.
- [3] Á. Arnaiz-González, A. González-Rogel, J. F. Díez-Pastor, y C. López-Nozal, “MR-DIS: democratic instance selection for big data by MapReduce”, *Progress in Artificial Intelligence*, vol. 6, núm. 3, pp. 211–219, 2017, doi: 10.1007/s13748-017-0117-5.
- [4] T. Washio y H. Motoda, “State of the art of graph-based data mining”, *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, vol. 5, núm. 1, pp. 59–68, 2003, doi: 10.1145/959242.959249.
- [5] J. L. Gross y J. Yellen, “Graph theory and its applications, second edition”, *Graph Theory and Its Applications, Second Edition*, pp. 1–800, 2005, doi: 10.1201/9781420057140/GRAPH-THEORY-APPLICATIONS-JAY-YELLEN-JONATHAN-GROSS.
- [6] S. García, J. Luengo, y F. Herrera, “Intelligent Systems Reference Library 72 Data Preprocessing in Data Mining”, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2015, <http://www.springer.com/series/8578>.
- [7] P. E. Hart, “The condensed nearest neighbor rule. *IEEE Transactions on Information Theory*”, Scientific Research Publishing, vol. 14, pp.

515-516. 1968, <https://scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=29777> (consultado el 27 de marzo de 2023).

- [8] I. Tomek, "Two Modifications of CNN", *IEEE Trans Syst Man Cybern*, vol. SMC-6, núm. 11, pp. 769–772, 1976, doi: 10.1109/TSMC.1976.4309452.
- [9] C. Seiffert, T. M. Khoshgoftaar, J. Van Hulse, y A. Napolitano, "RUS-Boost: A Hybrid Approach to Alleviating Class Imbalance", *Systems and Humans*, vol. 40, núm. 1, 2010, doi: 10.1109/TSMCA.2009.2029559.
- [10] Q. Kang, X. S. Chen, S. S. Li, y M. C. Zhou, "A Noise-Filtered Under-Sampling Scheme for Imbalanced Classification", *IEEE Trans Cybern*, vol. 47, núm. 12, pp. 4263–4274, 2017, doi: 10.1109/TCYB.2016.2606104.
- [11] W. C. Lin, C. F. Tsai, Y. H. Hu, y J. S. Jhang, "Clustering-based under-sampling in class-imbalanced data", *Inf. Sci.*, vol. 409–410, pp. 17–26, 2016, doi: 10.1016/J.INS.2017.05.008.
- [12] A. Guzmán-Ponce, J. R. Marcial-Romero, R. M. Valdovinos-Rosas, y J. S. Sánchez-Garreta, "Weighted Complete Graphs for Condensing Data", *Electronic Notes Theoretical Computer Science*, vol. 354, pp. 45–60, 2020, doi: 10.1016/J.ENTCS.2020.10.005.
- [13] A. Guzmán-Ponce, "Nuevos algoritmos basados en grafos y clustering para el tratamiento de complejidades de los datos", Tesis Doctoral, pp. 1–171, 2021.
- [14] "KEEL: A software tool to assess evolutionary algorithms for Data Mining problems (regression, classification, clustering, pattern mining and so on)". <https://sci2s.ugr.es/keel/datasets.php>.
- [15] C. Pal, I. Witten, E. Frank, y M. Hall, "Weka 3 - Data Mining with Open-Source Machine Learning Software in Java", 2016, <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/index.html>.

CAPÍTULO II

Gramática para la estructura morfológica de criaturas virtuales considerando premisas de vida

Rafael Mercado, Vianney Muñoz Jiménez
y Marco Antonio Ramos Corchado

Introducción

El estudio de la vida permite entender y comprender múltiples y diversos fenómenos que ocurren a nuestro alrededor. Este conocimiento conlleva describir fenómenos naturales cada vez más complejos e, incluso, adaptarlos al diseño de mecanismos y estrategias de desarrollo para cumplir con tareas y objetivos específicos de adaptación y supervivencia dentro del medio ambiente. Uno de los usos de este conocimiento es a través de la llamada vida artificial que, *grosso modo*, es la combinación de conceptos de informática y de la vida terrestre para estudiar fenómenos como el metabolismo o la coevolución [1, 2].

A través de la vida artificial se simulan entornos y poblaciones de individuos como abstracciones de los observados en la naturaleza, con una gran variedad de objetivos dependiendo de la tarea que se esté realizando. Para realizar estos estudios se encuentra el área de criaturas virtuales, éstas son agentes con la capacidad de evolucionar tanto su comportamiento como su morfología.

El estado actual de las investigaciones en la vida artificial sigue avanzando con distintos objetivos, entre éstos se encuentran el generar criaturas virtuales con forma y comportamiento apegados a lo que se espera del mundo natural, así como estudiar el proceso de evolución para identificar características y parámetros modificables [3], o emplear este proceso para generar morfologías útiles en problemas de diseño de componentes, sin un enfoque directo en mimetizar lo observable en el mundo natural.

Los avances ocurren en todos los aspectos del proceso, desde la representación de las criaturas como genotipo para la evolución [4], su fenotipo resultante [5] y las estrategias evolutivas empleadas con diversos propósitos [6], dependiendo de la disciplina que retoma el tema. Un punto clave que se observa en el estudio de la evolución de criaturas virtuales es un aparente límite en la complejidad alcanzada, tanto en morfología como comportamiento; este problema se retoma en la presente investigación desde el punto de vista del modelado del genotipo y su traducción a un fenotipo.

En este capítulo se propone un modelo basado en premisas de la vida natural que permita generar las morfologías de las criaturas virtuales. Se presenta y expone el progreso concerniente a la primera etapa de la metodología, donde se seleccionan las premisas multidisciplinarias iniciales para el estudio de la evolución y el desarrollo de la morfología de las entidades artificiales.

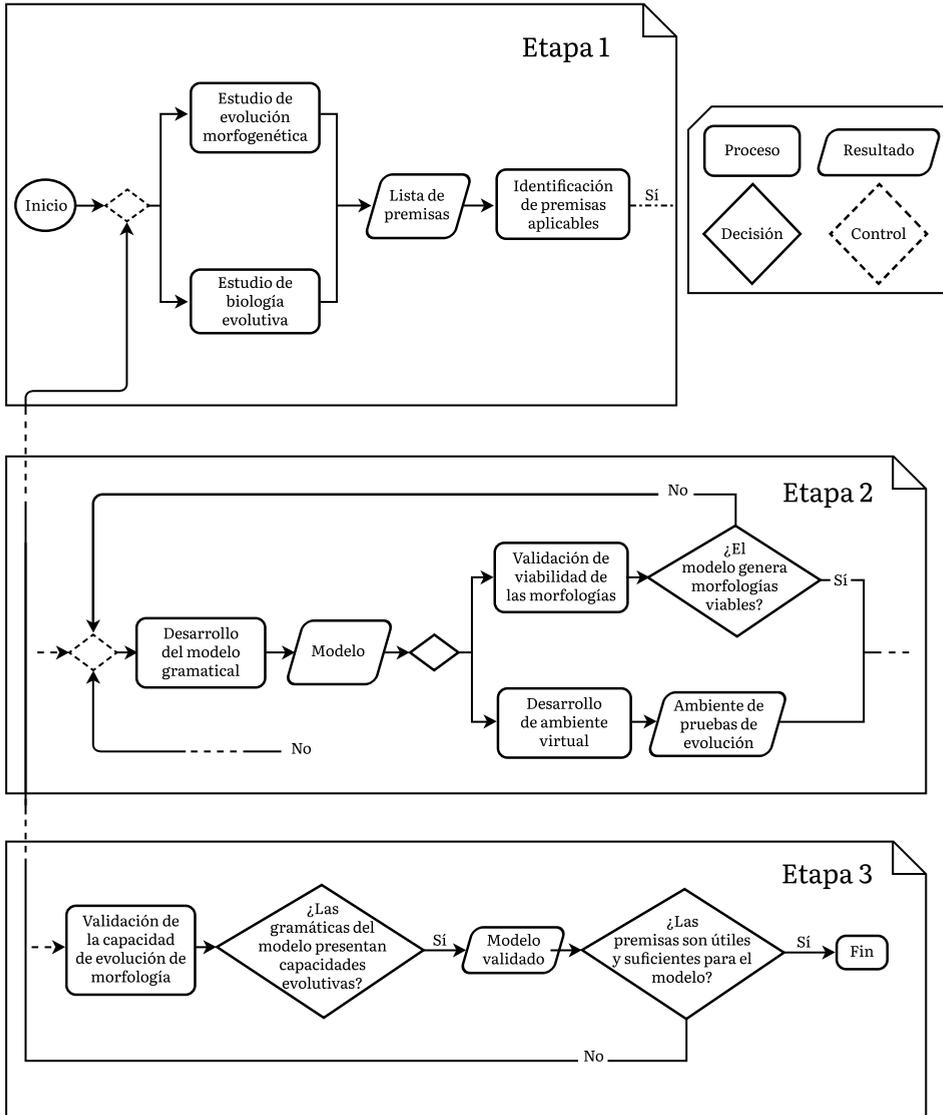
Finalmente se discuten las implicaciones del estudio de criaturas virtuales y sus posibles aportes a la vida cotidiana de los seres humanos.

Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo de esta investigación se conforma de tres etapas. La primera conlleva un estudio inicial de las disciplinas involucradas en el área de criaturas virtuales. La segunda etapa lidia con el desarrollo de la propuesta de modelado y su validación inicial de funcionalidad. Por último, la tercera implica la evaluación de la capacidad evolutiva de la propuesta.

Estas etapas se encuentran conectadas a partir de múltiples tareas de evaluación. En la Fig. 1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología propuesta que permitirá definir un modelo basado en premisas multidisciplinarias para la generación de criaturas virtuales. En este capítulo se muestra el progreso realizado durante la primera etapa de la metodología.

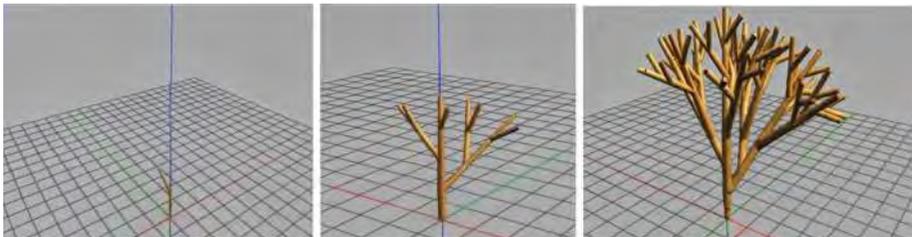
Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.
El flujo entre etapas es: Etapa 1→ Etapa 2 y Etapa 2→Etapa 3.



Durante la primera etapa se realiza un estudio de los acercamientos actuales a la evolución de morfología de criaturas virtuales y de biología evolutiva, vida artificial, disciplinas afines para identificar las premisas iniciales y restricciones con posible utilidad en el desarrollo de criaturas virtuales; de las premisas identificadas se selecciona un conjunto de acuerdo con la tarea de interés, que en este caso es la morfología de las criaturas virtuales.

Para ello se requiere comprender los principios de la morfogénesis, que es el proceso que controla la distribución de las células para formar los órganos y estructuras. Obtener y formalizar datos de la fisiología de los seres vivos permite conocer su estructura morfológica y reproducirla informáticamente en una entidad virtual; un ejemplo de esta reproducción se puede ver en la Fig. 2.

Fig. 2. Generación de vegetales 3D, de acuerdo con los datos biológicos y morfológicos de plantas vivas.



En la segunda etapa se realizará el desarrollo de la propuesta del modelo gramatical para la generación de morfología de criaturas virtuales. La lista de premisas iniciales obtenidas de la etapa 1 se emplea como guía para el diseño del modelo propuesto; se abstraen las premisas a procesos y restricciones para incluir en el modelo. Durante esta misma etapa se realiza una validación inicial de viabilidad del proceso de desarrollo de la morfología para asegurar que el modelo propuesto es capaz de generar criaturas virtuales. En gran parte de las aproximaciones en esta área se retoman las gramáticas llamadas de proliferación; un ejemplo de estas gramáticas se presenta a continuación:

Alfabeto: $V = \{A, B, w\}$

Constantes: $S = \{\emptyset\}$

Reglas: $(w \rightarrow A) \wedge (A \rightarrow AB) \wedge (B \rightarrow A)$

El desarrollo de las gramáticas de proliferación se lleva a cabo a través de generaciones de producciones; en cada interacción se aplican las reglas de producción a la palabra actual, con la palabra inicial representada por el axioma.

A continuación, se detalla el desarrollo de la gramática de ejemplo a lo largo de seis generaciones, los espacios entre letras son meramente ilustrativos para facilitar la lectura:

n0: w

n1: A

n2: $A \quad B$

n3: $A \quad B \quad A$

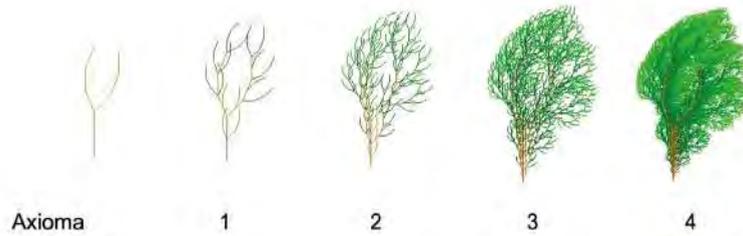
n4: $AB \quad A \quad AB$

n5: $A \quad B \quad A \quad A \quad B \quad A \quad B \quad A$

n6: $AB \quad A \quad A \quad B \quad A \quad B \quad A \quad A \quad B \quad A \quad A \quad B$

Una de las características sustanciales del uso de las gramáticas es la propiedad de recursión, lo que nos permite obtener entidades más completas a partir de una estructura definida simplemente aumentando el número de generaciones, como se puede observar en la Fig. 3.

Fig. 3. Uso de recursividad para obtener estructuras morfológicas parecidas a lo observado en el mundo natural.



La generación de criaturas virtuales requiere de la capacidad de evolución de morfología y la capacidad de autonomía. Para poder hacer esto se necesita seguir diferentes premisas que guíen hacia la generación de criaturas virtuales aptas para resolver problemas básicos y de supervivencia. A continuación, se presenta un estudio multidisciplinario inicial, donde se desea integrar a la generación de criaturas virtuales.

Estudio de premisas aplicables al desarrollo de criaturas virtuales

Como resultado de una revisión multidisciplinaria se identificó una lista de premisas aplicables al desarrollo de criaturas virtuales que se presenta en la Tabla I. Las disciplinas revisadas son las siguientes:

- **Genética.** Las criaturas virtuales son generadas a partir de una abstracción de la genética. Sus premisas identificadas pueden ser aplicadas al área [7].
- **Neurociencia.** Se retoma tanto el funcionamiento como el desarrollo del sistema nervioso para la recepción sensorial y el control motor [8].

- **Cómputo evolutivo.** El desarrollo de criaturas virtuales retoma los conocimientos de esta disciplina, su estado del arte aporta directamente a la misma.
- **Robótica evolutiva.** Esta disciplina emplea criaturas virtuales para el diseño de mecanismos y robots [9], sus hallazgos sirven de retroalimentación.
- **Embriogenia.** Establece reglas y procesos que dicten el rol, la posición y la comunicación de células; los procesos pueden abstraerse a criaturas virtuales.
- **Embriogenia artificial.** La embriogenia es un desarrollo susceptible al entorno y al tiempo; vista de esta forma, puede ser formalizada para su implementación [10].

Las disciplinas mostradas en la Tabla I fueron seleccionadas por su cercanía conceptual al área de criaturas virtuales. La experimentación con criaturas virtuales retoma conocimientos de estas disciplinas y, dependiendo del objetivo de un experimento y del contexto en que se realiza, usar conocimientos más diversificados como guía puede brindar mayor rendimiento a las criaturas resultantes como han observado múltiples investigaciones [11], [12].

Tabla I. Premisas multidisciplinarias identificadas [7]-[10].

Disciplina	Premisa	Disciplina	Premisa
Genética	Flujo genético Deriva genética Especiación Epigenéticas Selección sexual Barrido selectivo	Neurociencia	Potenciación/ depresión a largo plazo Sensación somática Plasticidad funcional Husos musculares Generadores centrales de patrones Conos de crecimiento Plasticidad estructural

Cómputo evolutivo	Mapeo evolucionable genotipo-fenotipo Búsqueda por novedad Búsqueda por sorpresa	Embriología	Destino celular
Robótica evolutiva	Evolución encarnada Modelos de desarrollo		Targeting Heterocronía Canalización
Embriogenia artificial	Gramáticas Química celular		Complexificación

Además de la cercanía, algunas de estas disciplinas tienen una interoperabilidad directa con el área de criaturas virtuales, como es el caso del cómputo y la robótica evolutivos; estas disciplinas tienden a compartir métodos y herramientas por lo que son las primeras en llegar a la mente cuando se piensa en un acercamiento multidisciplinario, sin embargo, como se evidencia con este estudio preliminar, no son las únicas. De las disciplinas antes mencionadas, las premisas identificadas son las siguientes:

- **Flujo genético.** La migración entre poblaciones las hace converger.
- **Deriva genética.** Las mutaciones en los individuos de una población causan la pérdida, modificación u obtención de características.
- **Especiación.** La divergencia genética entre especies causa diferenciación.
- **Epigenéticas.** Los distintos genes trabajan en conjunto, generando otras características o inclusive desactivando otros genes.

- **Selección sexual.** Se genera una presión selectiva para características específicas que incentivan el apareamiento.
- **Barrido selectivo.** La selección o pérdida de una mutación ocurre por su cercanía a otra que tiene presión selectiva.
- **Mapeo evolucionable genotipo/fenotipo.** Convertir el proceso evolutivo en uno de optimización sobre el espacio del genotipo de las criaturas.
- **Búsqueda por novedad.** Selección de acuerdo con diferencias entre nuevos individuos y población actual.
- **Búsqueda por sorpresa.** Selección de acuerdo con diferencias entre nuevos individuos y una predicción generada con el historial de la población.
- **Evolución encarnada.** La cercanía física entre individuos, y no necesariamente su rendimiento, dicta la selección de los padres para el apareamiento.
- **Modelos de desarrollo.** Convertir a la morfología en un proceso que se lleva a cabo a lo largo del tiempo de vida de la criatura.
- **Gramáticas.** Se emplean reglas de producción para simular el proceso de división celular o de desarrollo de la morfología.
- **Química celular.** Se simulan las interacciones celulares para que en su conjunto generen la morfología.
- **Potenciación/depresión a largo plazo.** Disparo sincronizado incentiva sincronización, el contrario aislamiento.
- **Sensación somática.** Distintos “anchos de banda” en sensores ofrece jerarquía de sensaciones.

- **Plasticidad funcional.** Al haber daño en partes del cerebro, las funciones dañadas se mueven a partes no dañadas.
- **Husos musculares.** Los músculos y tendones del cuerpo tienen una activación encontrada para facilitar el control.
- **Generadores centrales de patrones.** “Circuitos locales” permiten funcionamientos recurrentes, generalmente de locomoción.
- **Conos de crecimiento.** Las neuronas tienen un cono de potencial de crecimiento, guiado por química en su lugar objetivo.
- **Plasticidad estructural.** Las experiencias cambian la estructura del cerebro.
- **Destino celular.** Cada célula de un organismo se convierte para tener una función determinada por su codificación y los elementos químicos a su alrededor.
- **Targeting.** La posición final de las células es dictada por su entorno.
- **Heterocronía.** Existe una sincronización y orden en el desarrollo de los segmentos de morfología.
- **Canalización.** El desarrollo de la morfología es susceptible a mutaciones y presión del entorno, aun así, capaz de generar una morfología válida.
- **Complexificación.** Ocasionalmente se agregan genes nuevos al genoma.

Tanto el desarrollo como el análisis de los procesos evolutivos son útiles para obtener y analizar resultados, es evidente que se necesita

una jerarquización de las premisas a usar para cada experimento, puesto que una combinación de demasiadas premisas o una falta de abstracción de éstas puede causar que el proceso se vuelva intratable [13].

De las premisas identificadas en estas disciplinas, y para el caso específico del estudio de la evolución y desarrollo morfológico de criaturas virtuales, se seleccionaron las siguientes premisas para un desarrollo inicial:

- **Gramáticas.** Aplicadas a criaturas virtuales, simula el proceso de desarrollo de un embrión. Las células (no terminales) se dividen en eslabones, articulaciones o neuronas (terminales) de acuerdo con las reglas de producción definidas en la gramática empleada y forma la base del modelo.
- **Evolución encarnada.** Como estrategia evolutiva para el proceso de selección y apareamiento de las criaturas virtuales. Con esta estrategia se les permite a las criaturas aparearse de acuerdo con su proximidad física.
- **Destino celular-Heterocronía-Canalización.** Premisas de embriogenia que ayudan a caracterizar el proceso de desarrollo del embrión con injerencia del entorno. Las funciones son: determinar el tipo de célula, esparcir en el tiempo el desarrollo de distintas células y guiar el desarrollo tras efectos externos.
- **Química celular.** La simulación de procesos biológicos de bajo nivel que dan lugar a las interacciones entre células. Efectúa las premisas de embriogenia.

Este conjunto de premisas tiene la característica de comprender cada etapa del desarrollo de un experimento con criaturas virtuales; se tiene la base de la representación genética de las criaturas, premisas que guían la traducción de ésta a una morfología y la determinación del proceso de cruce de las criaturas.

El siguiente paso de esta investigación, concerniente a la etapa 2 de la metodología, implica la propuesta del modelo gramatical inicial para la generación de criaturas virtuales y el desarrollo inicial del ambiente de pruebas.

La propuesta del modelo gramatical implica la abstracción de las premisas seleccionadas en procesos algorítmicos tal que las gramáticas producidas por el modelo puedan ser traducidas a la morfología de una criatura virtual.

El desarrollo inicial del ambiente de pruebas tiene también una gran importancia; la selección del entorno de simulación a usar presenta un conjunto de restricciones, opciones y consideraciones que influyen directamente en los resultados de los experimentos [14].

Finalmente, es necesario obtener características cuantificables de las criaturas virtuales, un tema aún sin consenso y con múltiples propuestas en la literatura. La cuantificación permite comparar a las criaturas y hacer un análisis del proceso evolutivo que se llevará a cabo en la etapa 3 de la metodología.

Resultados y discusión

La generación de criaturas virtuales permite comprender y estudiar ecosistemas en un ambiente controlado; esto facilita observar fenómenos que por lo general son muy difíciles de estudiar y ofrece la oportunidad de generar nuevas estructuras para la construcción de artefactos o robots que apoyen a las actividades del ser humano.

Aunque esta área tiene un fuerte dinamismo, sus resultados se enfocan en tareas altamente específicas; múltiples investigaciones buscan aumentar la complejidad de las tareas realizadas, tanto en el diseño de la morfología de las criaturas como en su capacidad de comportamiento.

El empleo de conocimientos de otras disciplinas para guiar experimentos o describir los resultados obtenidos, del mismo modo que se reconoce la importancia de éstos para el avance del área. La metodología propuesta pretende facilitar esta interoperabilidad

con otras disciplinas, incluyendo su estudio en el proceso de experimentación.

En cuanto a la propuesta realizada, tanto el desarrollo como el análisis de los procesos evolutivos es útil para obtener y analizar resultados, pero es igualmente evidente que se necesita una jerarquización de las premisas a usar para tener una experimentación razonable.

Este modelado será comparado con aportaciones anteriores [17], [18], para identificar su viabilidad relativa utilizando las métricas existentes actualmente [15], [16] como comparación de las morfologías resultantes.

Se espera que el modelo gramatical permitirá evolucionar criaturas virtuales con una morfología adaptable al entorno donde se desenvuelven. Aunado a este resultado, se espera que la evolución morfológica de las criaturas concuerde con las reglas e hipótesis retomadas como premisas para el modelado.

Ahora que se cuenta con las premisas aplicables, se realizará la propuesta inicial de modelado y el desarrollo del entorno virtual donde se realizará su verificación y comparación.

Agradecimientos

Se agradece al CONACYT por la Beca Nacional al CVU 784441.

Referencias

- [1] T. S. Ray, "An Evolutionary Approach to Synthetic Biology: Zen and the Art of Creating Life", *Artificial Life Conference Proceedings*, vol. 1, núm. 1_2, pp. 179–209, 1993, doi: 10.1162/ARTL.1993.1.1_2.179.
- [2] T. Ito, M. L. Pilat, R. Suzuki, y T. Arita, "Coevolutionary Dynamics Caused by Asymmetries in Predator-Prey and Morphology-Behavior Relationships", *Artificial Life Conference Proceedings*, 2013, doi: 10.7551/978-0-262-31709-2-ch063.
- [3] T. Ito, M. L. Pilat, R. Suzuki, y T. Arita, "A Life approach for body-behavior predator-prey coevolution: Body first or behavior first?", *Artificial*

- Life Robotics, vol. 18, núm. 1-2, pp. 36-40, 2013, doi: 10.1007/S10015-013-0096-Y/FIGURES/7.
- [4] M. Komosiński y A. Rotaru-Varga, “Comparison of Different Genotype Encodings for Simulated Three-Dimensional Agents”, *Artificial Life*, vol. 7, núm. 4, pp. 395-418, 2001, doi: 10.1162/106454601317297022.
 - [5] D. Lessin, D. Fussell, y R. Miikkulainen, “Adapting Morphology to Multiple Tasks in Evolved Virtual Creatures”, *Artificial Life Conference Proceedings*, vol. 14, pp. 247-254, 2014, <http://youtu.be/dRLNnJIT8rY>
 - [6] D. Howard, A. E. Eiben, D. F. Kennedy, J. B. Mouret, P. Valencia, y D. Winkler, “Evolving embodied intelligence from materials to machines”, *Nature Machine Intelligence*, vol. 1, núm. 1, pp. 12-19, 2019, doi: 10.1038/s42256-018-0009-9.
 - [7] A. J. F. Griffiths, S. R. Wessler, S. B. Carroll, y D. John, “Introduction-to-Genetic-Analysis”, 10th Edition New York: W. H. Freeman and Company, pp. 1-862, 2008.
 - [8] D. Purves, G. J. Augustine, D. Fitzpatrick, W. C. Hall, A. S. LaMantia, R. D. Mooney, M. L. Platt, y L. E. White, “Neuroscience”, Sinauer Associates, New York. Scientific Research Publishing, 2018, [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjct55.\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2560827](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjct55.))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2560827).
 - [9] S. Doncieux, N. Bredeche, J. B. Mouret, y A. E. (Gusz) Eiben, “Evolutionary robotics: What, why, and where to”, *Frontiers Robotics and AI*, vol. 2, núm. MAR, p. 4, 2015, doi: 10.3389/FROBT.2015.00004/BIBTEX.
 - [10] K. O. Stanley y R. Miikkulainen, “A Taxonomy for Artificial Embryogeny”, *Artificial Life Journal*, vol. 9, núm. 2, pp. 93-130, 2003.
 - [11] S. Kriegman, N. Cheney, y J. Bongard, “How morphological development can guide evolution”, *Publisher Correction*, vol. 8, núm. 1, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-31868-7.
 - [12] A. Asakura, R. Suzuki, y T. Arita, “Evolving 3D virtual creatures through exaptation triggered by environmental change”, *Artificial Life Robotics*, vol. 20, núm. 3, pp. 244-250, 2015, doi: 10.1007/s10015-015-0222-0.
 - [13] F. Dellaert y R. D. Beer, “A developmental model for the evolution of complete autonomous agents”, *Proceedings of 4th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior: From Animals to Animats*,

- pp. 393-401, 1996, <https://www.ri.cmu.edu/publications/a-developmental-model-for-the-evolution-of-complete-autonomous-agents/>.
- [14] J. Lehman, J. Clune, D. Misevic, C. Adami, L. Altenberg, y J. Beaulieu, “The Surprising Creativity of Digital Evolution: A Collection of Anecdotes from the Evolutionary Computation and Artificial Life Research Communities”, *Artificial Life*, vol. 26, núm. 2, 2019, doi: 10.1162/artl_a_00319.
- [15] M. A. Bedau, E. Snyder, C. T. Brown, y N. H. Packard, “A comparison of evolutionary activity in artificial evolving systems and in the biosphere”, *Proceedings of the fourth European Conference on Artificial Life*, vol. 97, pp. 125–134, 1997.
- [16] M. Komosinski, “The world of framsticks: Simulation, evolution, interaction”, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 1834, pp. 214–224, 2000, doi: 10.1007/3-540-45016-5_20/COVER.
- [17] K. Miras y A. E. Eiben, “Effects of environmental conditions on evolved robot morphologies and behavior”, *GECCO 2019 - Proceedings of the 2019 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 125–132, 2019, doi: 10.1145/3321707.3321811.
- [18] K. Sims, “Evolving virtual creatures”, *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 15–22, 1994, doi: 10.1145/192161.192167.

CAPÍTULO III

Patrones Similares Frecuentes, un nuevo enfoque para describir los conjuntos de datos

Gretel Bernal Baró, Rosa María Valdovinos Rosas,
Ansel Yoan Rodríguez González y J. R. Marcial-Romero

Introducción

El minado de Patrones Frecuentes (PF) constituye una etapa fundamental en el proceso de búsqueda de información de muchas tareas de minería de datos. En este sentido, los PF son un conjunto de valores, atributos o subdescripciones de instancias que aparecen en los datos con una frecuencia mayor que un umbral de validación especificado por el usuario. Si el valor de la frecuencia es mayor o igual al umbral de mínima frecuencia establecido, se considera que el patrón es frecuente.

La mayoría de los algoritmos existentes en la literatura, utilizados en el minado de PF consideran la igualdad entre los valores de los atributos para contar su frecuencia [1]. Sin embargo, en las ciencias blandas, dos instancias se pueden considerar similares, aunque no sean idénticas. Por ejemplo, dado los intervalos de edad (0-3) y (4-7) años, un niño de 3 años 11 meses tiene intereses muy similares a los de un niño de 4 años. En este ejemplo podemos ver que a pesar de que las edades son equivalentes, al momento de discretizar los datos se omite la semántica de los datos cambiando su naturaleza. En problemas reales como la obtención de perfiles de usuarios, *modus operandi* de la población, síndromes comunes, tendencias de compras y ventas o factores de riesgo, algunos Patrones Frecuentes podrían perderse y, por tanto, se estaría obviando conocimiento relevante [2].

Como alternativa de solución a esta problemática, el concepto de similitud entre subdescripciones de instancias es incorporado para contar cuántas veces aparece una subdescripción en un conjunto de

datos. Además, cuando se utilizan funciones de similitud diferentes a las de la igualdad es descubierto el universo de todos los Patrones Frecuentes existentes en el conjunto de datos [1]. Los nuevos patrones descubiertos son denominados Patrones Similares Frecuentes (PSF). Un PSF es una combinación de valores de atributos de la instancia en el conjunto de datos, de manera que el número de veces que aparece ese patrón, más la suma de las ocurrencias de las subdescripciones similares (al patrón analizado) no es menor que un umbral de frecuencia especificado por el usuario [3].

Al respecto, Danger y Shulcloper [4] fueron los precursores en incorporar funciones de semejanza en el cálculo de la frecuencia, de tal manera que dos subdescripciones que no tienen valores idénticos se consideran semejantes, dando origen al minado de Patrones Similares Frecuentes. En este capítulo se realiza un estudio en torno a las ventajas del uso de los PSF con respecto a los PF del enfoque tradicional. Por tal motivo, la comparación experimental incluye el análisis de la calidad de los patrones minados por los algoritmos más citados para cada enfoque: el algoritmo STreeDC-Miner es utilizado para minar los Patrones Similares Frecuentes con respecto a los Patrones Frecuentes del enfoque tradicional minados por el algoritmo Apriori [5].

Trabajos relacionados

En la literatura, se pueden encontrar varios algoritmos diseñados para minar los PSF. Estos algoritmos tienen los siguientes aspectos en común:

Para cada atributo del conjunto de datos, es necesario definir un criterio de comparación que indica si el par de valores comparados debe ser considerado similar o no por el proceso de minería. A continuación, se muestra un ejemplo de este tipo de funciones:

$$C_r(x,y) = \begin{cases} \text{Si } |x - y| \leq \varepsilon, y & 1 \\ \text{sino} & 0 \end{cases} \quad (1)$$

En la Ec. (1), C_r es el criterio de comparación correspondiente al atributo r y dos valores en r se consideran similares si el valor absoluto de la diferencia es menor o igual a un umbral ε especificado.

- Para cada problema particular, a diferencia de los algoritmos tradicionales de minería de Patrones Frecuentes, se define una función de similitud entre subdescripciones. Esta función de similitud es la que permite definir si dos subconjuntos de valores de atributos deben ser considerados similares o no por el proceso de minería. A continuación, se muestra un ejemplo de este tipo de funciones:

$$f_s(O, O') = \begin{cases} 1 & \text{Si } \forall r \in S, C_r(O[r], O'[r]) = 1, \text{ y} \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad (2)$$

En la Ec. (2), f_s es una función de similitud para comparar dos descripciones de objetos con respecto a un conjunto de características S . Dadas dos subdescripciones $I_s(O)$ e $I_s(O')$, con $O, O' \in \Omega$, siendo Ω el conjunto de datos, $f_s(O, O') = 1$ significa que la instancia O es similar a la instancia O' respecto al subconjunto de atributos S y $f_s(O, O') = 0$ significa que O no es similar a O' respecto a S .

- La mayoría de los algoritmos de minería de PSF trabajan siguiendo una estrategia de búsqueda en profundidad, diseñando una estructura en forma de árbol, llamada STree [1], en la que cada rama en el árbol, desde la hoja hasta la raíz representa la subdescripción de una instancia. Las subdescripciones iguales se agrupan en la misma rama del árbol. Además, se almacenan las frecuencias de dichas subdescripciones y los enlaces a subdescripciones similares.

Por otro lado, los algoritmos de minado de PSF se clasifican según los valores devueltos por las funciones de similitud permitidas y su monotonía. Las funciones de similitud pueden ser booleanas o no booleanas. Una función de similitud booleana (Ec. (2)) devuelve los

valores 0 o 1, es decir, las subdescripciones comparadas serán consideradas similares o no por el proceso de minería (STreeDC-Miner [1], CFSP-Miner [3], RP-Miner [6]). Una función de similitud no booleana es aquella cuyos valores están dentro del intervalo [0,1], es decir, las subdescripciones serán similares en mayor o menor medida dependiendo del valor devuelto por la función de similitud. Los valores cercanos a 1 indican una similitud más notable entre las subdescripciones (STree*DC-Miner [7], STree*NDCMiner [7], RP*-Miner [7]).

La monotonía de las funciones de similitud puede ser no creciente o creciente. Por un lado, una función de similitud es monótona no creciente si y sólo si para cualquier par de objetos, la similitud respecto a un conjunto de características es mayor o igual que la similitud respecto a cualquier superconjunto de características. Por otro lado, la monotonía no creciente de la función de similitud es una propiedad relevante porque implica que todas las súper-descripciones de un patrón similar no frecuente tampoco son frecuentes. Esta propiedad, conocida como f_s -Clausura Descendente, permite podar el espacio de búsqueda de los PSF [7].

De los algoritmos existentes en el estado del arte para el minado de PSF, el algoritmo STreeDC-Miner [1], presenta ventajas operacionales con respecto a sus homólogos, debido a que requiere menor tiempo computacional para minar los Patrones Similares Frecuentes existentes en el conjunto de datos. En STreeDC-Miner se introduce la estructura de árbol *STree*. Para cada conjunto de características A , es generada una estructura de árbol $STree_A$, cada hoja de la estructura representa una subdescripción respecto al conjunto de características A y almacena todas sus repeticiones, así como las similitudes con otras. Las ramas del $STree_A$ contienen los prefijos comunes de las almacenadas. STreeDC-Miner establece una definición explícita de un orden total sobre el conjunto de características. A partir de cada conjunto de una sola característica A , y siguiendo una estrategia de búsqueda en profundidad, un procedimiento recursivo añade a A en cada llamada, una nueva característica mayor que las características en A .

Además, en cada llamada recursiva, se construye una estructura de árbol $STree_A$, se calcula la frecuencia de las subdescripciones en $STree_A$ y se obtienen los PSF. Si el conjunto actual de característica

A sólo contiene una, el árbol $STree_A$ se realiza a partir del conjunto de datos. En caso contrario, se hace a partir de la estructura de árbol obtenida en la llamada recursiva anterior. El caso base del procedimiento recursivo se produce cuando no hay Patrones Similares Frecuentes para el conjunto de características A o no hay ninguna otra característica que añadir. En el proceso de construcción del $STree$, la similitud entre dos subdescripciones sólo se calcula si éstas, en la estructura de árbol resultante de la llamada recursiva anterior, son similares en consecuencia, así se reduce el número de evaluaciones de la función de similitud y el esfuerzo computacional para calcular la frecuencia de cada una.

Patrones Similares Frecuentes vs Patrones Frecuentes

Un Patrón Similar Frecuente (PSF) es una combinación de valores de atributos de una instancia tal, que la suma de la frecuencia de sus Patrones Similares no es menor que un umbral de frecuencia especificado por el usuario. Por ejemplo, en los estudios sociológicos se puede considerar que dos personas son similares en términos de su edad si pertenecen a la misma generación, lo que equivale a considerar que dos edades son similares si el valor absoluto de su diferencia es como máximo de 5 años. También se puede definir que dos personas son similares en términos de su salario si el valor absoluto de la diferencia, entre los salarios, es máximo de 5000 pesos.

Dado el conjunto de datos mostrado en la Tabla I para un umbral de frecuencia mínima igual a 0.7, es decir, una subdescripción es frecuente si aparece al menos en 2 de las instancias del conjunto de datos. Si se considera la igualdad estricta al contar la frecuencia entre los valores de los atributos, solo (Estado Civil = Soltero) sería un Patrón Frecuente. Sin embargo, si se consideran los criterios de semejanza anteriormente mencionados entre los atributos Edad y Salario, alguno de los PSF minados son: (*Edad = 23*), (*Edad = 25, Salario = 7500*), etc.

Tabla I. Conjunto de datos mezclado [7].

Objeto	Edad	Salario	Estado Civil
O ₁	23	5000	Soltero
O ₂	25	7500	Soltero
O ₃	29	7300	Soltero

Como se pudo observar en el ejemplo, cuando es utilizada la igualdad estricta para contar la frecuencia con que aparecen las subdescripciones o patrones en el conjunto de datos, podrían no ser considerados algunos Patrones Frecuentes, lo que conlleva a la pérdida de conocimiento.

Metodología

En esta sección se describe la estrategia metodológica propuesta. Primeramente, son seleccionados los conjuntos de datos que van a ser usados para evaluar la cantidad de Patrones Frecuentes minados por ambos enfoques. Luego, para el caso de los algoritmos de minado de PSF es necesario definir el criterio de comparación asociado a cada atributo y la función de semejanza a utilizar. Posteriormente, se establecen los umbrales de frecuencia (parámetro común para ambos algoritmos) y se lleva a cabo el proceso de minado haciendo uso de los algoritmos STreeDC-Miner [1] y Apriori [5] para minar los PSF y los PF respectivamente. Por último, es evaluada la calidad de los patrones PSF y los PF en correspondencia con la precisión obtenida por un clasificador, que utiliza los patrones minados, para clasificar nuevas instancias.

Conjuntos de datos

Para realizar la comparación entre los dos enfoques de minado de Patrones Frecuentes se utilizaron 19 conjuntos de datos del repositorio

de la Universidad de California (<https://archive.ics.uci.edu/ml/index.php>). Estos conjuntos de datos fueron seleccionados debido a que presentan una gran diversidad entre los valores de atributos presentes. En la Tabla II se muestra la cantidad de instancias, la cantidad de atributos numéricos y no numéricos existentes. Los conjuntos de datos fueron ordenados dependiendo de la cantidad de instancias presentes.

Tabla II. Conjunto de datos de prueba³.

Nombre	Objetos	Numéricos	No Numéricos
Glass Identification	146	1	9
Iris	150	1	4
Teaching Assistant Evaluation	151	3	3
Wine	178	1	13
Heart Disease	270	1	13
Liver Disorders	345	1	6
Auto MPG	392	3	5
Metadata	528	2	17
Balance Scale	576	1	4
Indian Liver Patient	579	2	9
Breast Cancer Wisconsin	693	1	9
Credit Approval	690	9	7
Pima Indians Diabetes	768	1	8
Vehicle Silhouettes	846	1	18
Auto	1000	4	36
Contraceptive Method Choice	1473	2	8
Car	1728	2	5
Abalone	4177	2	7
Census	32561	6	9

Elaboración basada en <https://archive.ics.uci.edu/ml/index.php>

³ <https://archive.ics.uci.edu/ml/index.php>.

Criterios de comparación y función de semejanza

Como se mencionó anteriormente, los algoritmos de minado de PSF requieren de la especificación de un criterio de comparación, para cada atributo, que indica si el par de valores debe considerarse semejante o no. Además, es necesario especificar la función de similitud o semejanza, la cual permite definir si dos patrones o subdescripciones van a ser considerados similares o no por el proceso de minería. El algoritmo STreeDC-Miner es diseñado para el uso de funciones de similitud booleana monótonas no creciente. Por tanto, la función de semejanza utilizada fue la definida en la Ec. (2) y los criterios de comparación utilizados fueron los siguientes:

$$C_r(x,y) = \begin{cases} Si & x - y = 0, y & 1 \\ sino & & 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$C_r(x,y) = \begin{cases} Si & \frac{|x-y|}{maxR-minR} \leq \varepsilon, y & 1 \\ sino & & 0 \end{cases} \quad (4)$$

La Ec. (3) es utilizada para todos los atributos no numéricos y nos indica que dos valores de un atributo no numérico se van a considerar similares si y sólo si son iguales. Para los atributos numéricos es usada la Ec. (4), en dicha ecuación $maxR$ y $minR$ representan el valor máximo y mínimo respectivamente del atributo r , el valor definido para el umbral ε fue de 0.05.

Proceso de minado de Patrones Frecuentes

En esta etapa se llevó a cabo el proceso de búsqueda de PF y PSF. Para ello, se definieron los umbrales de frecuencia utilizados por STreeDC-Miner [1] y Apriori [5] con el objetivo de evaluar la eficiencia de

los algoritmos de minado de PSF con respecto a los algoritmos del enfoque tradicional. Se considera más eficiente al enfoque que encuentre mayor cantidad de patrones. Los valores de frecuencia establecidos fueron 0.1 y 0.2, por ser los umbrales más utilizados en el estado del arte, es decir que las subdescripciones deben aparecer en el 10% y 20% de las instancias del conjunto de datos para ser consideradas frecuentes.

Clasificación

En la experimentación se utilizaron tres conjuntos de datos: Car, Contractive, Census. De cada conjunto de datos se obtuvieron los Patrones Frecuentes de ambos enfoques para los umbrales de frecuencia comprendidos en el intervalo de 0.01 a 0.06. Para cada conjunto de datos y umbral de mínima frecuencia, se utilizó validación cruzada con 10 repeticiones, en las que el 80% de las instancias fueron utilizadas para el entrenamiento y el 20% restante para clasificar.

Para revisar la calidad de PSF y PF obtenidos con el proceso de minería se seleccionaron aleatoriamente tres de los conjuntos de datos utilizados durante la experimentación (Car, Contractive, Census). De cada uno de ellos se calcularon los patrones frecuentes de ambos enfoques para los umbrales de frecuencia comprendidos en el intervalo de 0.01 a 0.06. Para cada conjunto de datos y umbral de mínima frecuencia se utilizó validación cruzada con 10 repeticiones, en las que el 80% de las instancias fueron utilizadas para el entrenamiento y el 20% restante para clasificar.

Resultados y discusión

En esta sección se muestra el desempeño de los algoritmos de minado de PSF con respecto a los algoritmos de minado de PF del enfoque tradicional, tanto en la etapa de minado, como en la de clasificación.

Minado de PSF y PF

La eficiencia de los algoritmos de minado se muestra en la Tabla III, la cual muestra la cantidad de patrones obtenidos por cada algoritmo una vez que el proceso de minado termina.

Tabla III. Desempeño de los algoritmos de minado de PSF con respecto a los algoritmos de minado de PF tradicionales teniendo en cuenta el número de PF minados.

Nombre	Umbral	STreeDC-Miner	A priori
Glass Identiftion	0.1	20326	11
	0.2	5297	11
Iris	0.1	207	6
	0.2	41	3
Teaching Assistant Evaluation	0.1	221	30
	0.2	35	15
Wine	0.1	1559	3
	0.2	285	3
Heart Disease	0.1	8434	1010
	0.2	882	247
Liver Disorders	0.1	2764	12
	0.2	703	3
Auto MPG	0.1	1622	12
	0.2	250	6
Metadata	0.1	307308	21
	0.2	89130	15
Balance Scale	0.1	42	42
	0.2	10	10
Indian Liver Patient	0.1	103625	2
	0.2	41623	22
Breast Cancer Wisconsin	0.1	1311	1311
	0.2	277	277
Credit Approval	0.1	2678886	2340
	0.2	852004	562

Pima Indians Diabetes	0.1	5181	16
	0.2	1094	6
Vehicle Silhouettes	0.1	34244	16
	0.2	3756	5
AutoUniv au6	0.1	1622	12
	0.2	250	6
Contraceptive Method Choice	0.1	475	423
	0.2	121	121
Car	0.1	86	86
	0.2	31	31
Abalone	0.1	187624	7
	0.2	8724	3

Como puede ser visto en la Tabla III, la cantidad de Patrones Frecuentes minados, para los diferentes valores de soporte probados, en el 76% de los casos es mayor cuando son utilizadas funciones de semejanzas diferentes de la igualdad en el cálculo de la frecuencia.

También se puede apreciar que cuando se utiliza la igualdad estricta como criterio de comparación se pierden en algunos conjuntos de datos más del 90% de los PSF, información que pudiera ser de utilidad para el problema de estudio a resolver. Esta pérdida de conocimiento por los algoritmos de minado de PF del enfoque tradicional se debe a que valores de un mismo atributo con semánticas casi idénticas no son tomados en cuenta al realizar el cálculo de la frecuencia y al contar sólo los valores estrictamente iguales, los valores de frecuencia obtenidos no sobrepasan los umbrales de frecuencias establecidos.

Como se mencionó con anterioridad, la calidad del conjunto de patrones minados por ambos enfoques es medida teniendo en cuenta la precisión obtenida por un clasificador que en su funcionamiento utiliza los patrones minados para clasificar nuevas instancias. La Tabla IV muestra la precisión obtenida por el clasificador al utilizar los PSF y los PF minados en los conjuntos de datos Car, Contractive y Census para los diferentes valores de frecuencia testeados.

Tabla IV. Precisión obtenida por el clasificador al utilizar los PSF y los PF del enfoque tradicional.

Frecuencia	CD: Car		CD: Contractve		CD: Car	
	PSF	PF	PSF	PF	PSF	PF
0.01	80.49	80.44	45.69	41.75	74.66	73.06
0.04	76.29	75.60	40.20	40.65	76.00	72.39
0.08	69.75	70.28	37.46	37.66	76.00	71.26
0.12	65.50	65.43	36.17	33.76	72.66	70.80
0.16	56.49	55.65	35.64	29.65	73.33	70.93
Promedio	69.70	69.48	39.03	36.69	74.53	71.68

Como se puede apreciar, para la mayoría de los umbrales de mínima frecuencia, basado en la precisión obtenida por el clasificador y teniendo en cuenta que definimos que la calidad del conjunto de patrones es proporcional a la precisión obtenida por el clasificador, la calidad de los PSF siempre es mayor y en el peor de los casos igual a la calidad de los PF minados. Esto evidencia la utilidad de los patrones que se pierden al emplear el enfoque tradicional de minado de Patrones Frecuentes.

Conclusiones

La minería de PSF está atrayendo fuertemente la atención como una solución alternativa en el desarrollo de estrategias descriptivas. Los experimentos realizados en este trabajo validan que cuando se utilizan funciones de semejanza diferentes a las de la igualdad se puede

obtener un cúmulo de conocimiento superior a cuando se utiliza la igualdad entre los valores de los atributos como función de semejanza. Además, cuando los PSF son utilizados en tareas como la clasificación, el clasificador obtiene una mayor precisión que cuando los PF del enfoque tradicional son usados.

Este resultado fue posible gracias a que al utilizar funciones de semejanza y no la igualdad estricta entre subdescripciones como condición para contar las ocurrencias de una de éstas en el conjunto de datos es posible descubrir nuevo conocimiento. Por tal motivo, cuando el enfoque de minado de Patrones Similares Frecuentes es usado, es descubierto todo el universo de Patrones Frecuentes existente y como consecuencia se tiene un mayor conocimiento del conjunto de datos.

En trabajos futuros se propone reducir el número de subdescripciones similares frecuentes minadas. Existen muchas que son similares entre sí, según la función de similitud definida por el usuario. En consecuencia, se presentan al usuario como casos diferentes. Por lo tanto, es necesario minar un subconjunto de subdescripciones similares frecuentes que describa al conjunto de PSF existentes. Para ello se podrían aplicar algoritmos de optimización para minar un subconjunto de soluciones óptimas, en correspondencia con la función de aptitud definida. Además de diseñar nuevas funciones para identificar cuando varias subdescripciones están brindando el mismo conocimiento del conjunto de datos.

Referencias

- [1] A. Y. Rodríguez González, J. F. Martínez-Trinidad, J. A. Carrasco-Ochoa, y J. Ruiz Shulcloper, "Mining frequent patterns and association rules using similarities", *Expert Syst Appl*, vol. 40, núm. 17, pp. 6823–6836, 2013, https://www.academia.edu/56422936/Mining_frequent_patterns_and_association_rules_using_similarities.
- [2] A. Y. Rodríguez-González, J. F. Martínez-Trinidad, J. A. Carrasco-Ochoa, y J. Ruiz-Shulcloper, "Using non boolean similarity functions for frequent similar pattern mining", *Canadian Conference on Artificial*

- Intelligence*, vol. 6085 LNAI, pp. 374–378, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-13059-5_50/COVER.
- [3] A. Y. Rodríguez-González, F. Lezama, C. A. Iglesias-Alvarez, J. F. Martínez-Trinidad, J. A. Carrasco-Ochoa, y E. M. de Cote, “Closed frequent similar pattern mining: Reducing the number of frequent similar patterns without information loss”, *Expert Systems with Applications*, vol. 96, pp. 271–283, 2018, doi: 10.1016/J.ESWA.2017.12.018.
- [4] R. Danger, J. Ruíz-Shulcloper, y R. Berlanga, “Objectminer: A new approach for mining complex objects”, *Sixth International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS)*, Porto, Portugal, pp. 42–47, 2004.
- [5] A. M. Mohammed y A. Bassam, “An Improved Apriori Algorithm for Association Rules”, *International Journal on Natural Language Computing*, vol. 3, núm. 1, pp. 21–29, 2014, doi: 10.5121/IJNLC.2014.3103.
- [6] A. Y. Rodríguez-González, J. F. Martínez-Trinidad, J. A. Carrasco-Ochoa, y J. Ruiz-Shulcloper, “RP-Miner: a relaxed prune algorithm for frequent similar pattern mining”, *Knowledge and Information Systems*, vol. 27, núm. 3, pp. 451–471, 2011, doi: 10.1007/s10115-010-0309-9.
- [7] A. Y. Rodríguez-González, J. F. Martínez-Trinidad, J. A. Carrasco-Ochoa, J. Ruiz-Shulcloper, y M. Alvarado-Mentado, “Frequent similar pattern mining using non-Boolean similarity functions”, *Journal of Intelligent y Fuzzy Systems*, vol. 36, núm. 5, pp. 4931–4944, 2019, doi: 10.3233/JIFS-179040.
- [8] A. Y. Rodríguez-González, J. F. Martínez-Trinidad, J. A. Carrasco-Ochoa, y J. Ruiz-Shulcloper, “Mining frequent similar patterns on Mixed Data”, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 5197 LNCS, pp. 136–144, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-85920-8_17/COVER.

CAPÍTULO IV

Una revisión preliminar de literatura cualitativa sobre la evaluación de riesgos en eventos naturales

Lourdes Loza-Hernández y Ma. de Lourdes Najera López

Introducción

La preocupación de las personas por los desastres está relacionada con la muerte humana y el costo económico, que básicamente dependen de los peligros y riesgos del evento. Con el fin de uniformar el entendimiento sobre algunos términos utilizados en este documento se muestran a continuación algunos de ellos. Un desastre es: "una interrupción grave del funcionamiento de una sociedad, que causa pérdidas humanas, materiales o ambientales generalizadas y además exceden la capacidad de la sociedad afectada para hacerles frente, utilizando únicamente sus propios recursos" [1].

El peligro es: "un evento amenazante, o la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino dentro de un periodo de tiempo y área determinada" [2]-[4]. El riesgo se define como: "pérdidas esperadas (de vidas, lesiones, daños materiales y actividad económica interrumpida) debido a un peligro particular en un área y periodo de referencia determinados" [1], [5]; la vulnerabilidad: "es el grado de pérdida resultante de un fenómeno potencialmente dañino" [1], [6], [7].

Un evento hidrometeorológico se considera como la combinación de un fenómeno hidrológico y un fenómeno meteorológico que envuelve una mezcla de energía y agua entre la tierra y la atmósfera inferior [8]. Estos eventos incluyen inundaciones, tormentas tropicales y sequías. Las principales causas que la literatura considera para este tipo de eventos son el agua, el viento y, recientemente debido al inadecuado uso de los recursos naturales por el hombre, el cambio climático [9].

La Administración de la Cadena de Suministro (*Supply Chain Management*, SCM) “es la agrupación de la serie de actividades asociadas con el flujo y la transformación de bienes desde la extracción de la materia prima hasta el consumidor final, así como los flujos de información asociados al proceso” [10], en resumen, la cadena de suministro administra el flujo de materiales y de información integral a lo largo de todos los eslabones que la conforman. De lo anterior, logística “es la parte de la cadena de suministro que planea, implementa y controla el eficiente y efectivo flujo de almacenamiento hacia delante y en reversa de bienes, servicios e información relacionada entre el punto de origen y el punto de consumo, en búsqueda de satisfacer los requerimientos de los clientes” [11]. Desde el punto de vista en una situación de emergencia causada por algún evento natural donde existe disrupción en la cadena de suministro, ésta se conoce como *logística humanitaria*, cuyo principal objetivo es disminuir el sufrimiento humano de las personas afectadas, a través de la planeación e implementación de medidas que aseguren el abastecimiento y distribución de bienes, así como el control eficiente y almacenamiento de los recursos disponibles para la pronta recuperación y reconstrucción de las áreas afectadas [12]-[24], sólo por mencionar algunos trabajos que detallan a profundidad este concepto.

La disrupción de la cadena de suministro es causada por factores internos y externos propios de cada cadena, los cuales determinan el nivel de riesgo al que se encuentra expuesta, por lo tanto, es de vital importancia identificar estos factores de riesgo, valorar el nivel de inseguridad y definir estrategias para disminuir los efectos de la interrupción [25]. Cualquier eslabón en la cadena de suministro está expuesto al riesgo, por lo que la variación repentina en el suministro, demanda, transporte, instalaciones, producción, distribución o comunicación generan resultados negativos [26] y en logística humanitaria, éstos pueden ser invaluable (pérdidas humanas), algunos trabajos que abordan la exposición al riesgo son los de Loza-Hernández, Christopher, Barnes y Wagner [24], [27]-[29], entre otros.

Actualmente, debido a las condiciones que se viven en el planeta tales como pandemias, guerras, colapso de la biodiversidad debido

al cambio climático, eventos naturales que ascienden a nivel de desastre, etc., es conveniente redefinir la administración de la cadena de suministro (SCM) para que las investigaciones desarrolladas proporcionen herramientas y estrategias necesarias para enfrentar situaciones extremas en la práctica, ahora y en el futuro [20], [23].

El objetivo de este capítulo es revisar literatura sobre los trabajos realizados de tipo cualitativo, para evaluar el riesgo de eventos naturales principalmente hidrometeorológicos, en logística humanitaria. El documento contiene cuatro apartados, el siguiente a éste —el apartado dos— muestra una revisión de literatura relacionada con los enfoques desarrollados para la evaluación del riesgo de eventos naturales; el apartado tres describe algunos de los modelos cualitativos disponibles en la literatura para la evaluación del riesgo en eventos naturales, considerando el factor de vulnerabilidad y, finalmente, en el apartado cuatro se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

Evaluación del riesgo de eventos naturales

Behl y Dutta [30] en su profunda revisión de la literatura, muestran artículos publicados que utilizan casos de estudio basados en validación empírica, simulaciones y modelado matemático, sin embargo, hay algunos campos que no han tenido dedicación relevante de parte de expertos e investigadores, como lo es el desarrollo de enfoques cualitativos. Por su parte, Sheffi [26] desarrolló un estudio cualitativo donde muestran que el 94% de los trabajos de HO-LSCM (Organizaciones Humanitarias-Logística y Administración de la Cadena de Suministro) se basan en investigaciones cualitativas con marcos teóricos, los cuales no han sido probados, debido a que las HO (Organizaciones Humanitarias) tienen sus propias políticas y procedimientos para operar en situaciones de desastre. Por lo tanto, proponen que: “se requiere estandarización para agilizar la efectividad y eficiencia en las funciones de logística y cadena de suministro”.

Mora-Ochomogo, Mora-Vargas, y Serrato [32] concluyeron que pocos modelos consideran factores cualitativos como aspectos

culturales o de recursos humanos que definen el éxito de la entrega de insumos en las actividades operativas en logística humanitaria, los cuales dan más realidad a los modelos. Ellos enfocan su trabajo en detallar la Gestión de Inventarios en logística humanitaria; describen algunas de las condiciones especiales que dificultan la aplicación de las estrategias clásicas de inventario, tales como: el tiempo (el cual se vuelve crucial en logística humanitaria), inventarios no repetitivos (debido a las necesidades propias de la población afectada), no se permiten retrasos (debido a las necesidades básicas que deben ser cubiertas), incertidumbre en las donaciones, escasez y excedente de recursos en determinado tiempo, priorización de bienes necesarios según la región, variabilidad y disponibilidad de recursos humanos en el lugar, desarrollo de proveedores, caducidad y obsolescencia de los productos, ubicación del almacén o centros de acopio, asuntos políticos y culturales entre otros.

Whiting y Ayala-Öström [33] mencionaron que el costo de operación de HO-LSCM podría ser alrededor de un 25% más que una operación de gestión de la cadena de suministro empresarial similar. Como fue mencionado anteriormente por Mora-Ochomogo [32], las razones del alto costo son la complejidad y los factores que intervienen en el mismo como son la incertidumbre inherente, el uso limitado de la tecnología por las afectaciones locales, las dificultades de recursos humanos e infraestructura deficiente [34].

Shafiq y Soratana [31] muestran que las investigaciones sobre las HO-LSCM en su mayoría son metodologías cualitativas, lo que significa que la generación de teorías y marcos metodológicos se utilizan cuando la información es insuficiente o el estudio es nuevo en el campo de estudio; en su revisión de 73 artículos muestran que 68 estudios fueron de enfoque cualitativo, sólo dos estudios de enfoque cuantitativo y el resto utilizó ambos enfoques (enfoque híbrido).

Behl y Dutta [30] clasificaron las publicaciones desarrolladas de 2005 a 2017 en diferentes bases de datos, consideraron palabras clave para seleccionar los trabajos encontrados. Las palabras clave que seleccionaron fueron agrupadas en cuatro grupos: I. Optimización, Agilidad, Coordinación, Colaboración (14%); II. Logística humanitaria, SCM humanitario, operaciones humanitarias (42%); III.

Riesgo y resiliencia (18%); IV. Preparación para desastres, ayuda en caso de desastre, gestión de desastres, operaciones de ayuda en caso de desastre (26%). De los resultados anteriores, los documentos relacionados con la Evaluación de Riesgos y la etapa de Resiliencia ante un desastre tienen un 18% de los documentos revisados, lo cual demuestra la brecha que existe entre estos temas en comparación con los otros campos y etapas de la logística humanitaria, exponiendo en tal caso, una valiosa área de oportunidad para nuevas investigaciones en estos temas.

De lo anterior, se puede concluir que el desarrollo de nuevos trabajos en cualquiera de los enfoques abordados (cualitativo, cuantitativo e híbrido) contribuye al campo de logística humanitaria y cadena de suministro apoyando sustancialmente con nuevas herramientas a los tomadores de decisiones y a las personas en áreas vulnerables a prevenir los efectos catastróficos de un desastre.

Modelos cualitativos para la evaluación del riesgo de eventos naturales

Como se mencionó en la sección anterior, la definición de riesgo considera una interrupción en las actividades normales de los entes socioeconómicos del área afectada, causan pérdidas generalizadas que exceden la auto resiliencia de la población [1], [5], sin embargo, ésta no se puede generalizar dado que la evaluación del riesgo depende de la disciplina en la que se plantea. En el campo de la investigación, si el riesgo es considerado como un peligro, entonces se explica a través del producto de dos o tres factores, de acuerdo con la literatura; por ejemplo, Crichton [35] describe el riesgo con tres factores, donde cada elemento es independiente: peligro, exposición y vulnerabilidad. Otros conceptos consideran el riesgo como el producto de la amenaza y la vulnerabilidad [36]. Cannon [37] y Wisner [36] comentan que el riesgo en un área específica del conocimiento depende de sus atributos socioeconómicos, culturales y otros demarcados por el área geográfica. Según Melching y Pilon [1], la evaluación de riesgos se puede determinar mediante los siguientes pasos: 1) Estimación

del peligro (ubicación, frecuencia y gravedad); II) Estimación de la exposición (número de personas, edificios, fábricas, etc. expuestas al peligro); III) Estimación de la vulnerabilidad de los elementos en riesgo (expresada como porcentaje de pérdidas); IV) Resultado del producto entre peligro, exposición y vulnerabilidad.

La evaluación del riesgo es un campo de investigación amplio que requiere mayor atención. En logística humanitaria se ha analizado desde diferentes perspectivas durante más de cuarenta años, a lo largo de este tiempo se han desarrollado diferentes enfoques para predecir la magnitud del riesgo, con el fin de prevenir a las personas y disminuir los daños de los fenómenos que lo generan. En esta sección se describen modelos desarrollados desde un enfoque cualitativo que consideran en algunos casos a la vulnerabilidad (de los individuos, de la población, de las entidades socioeconómicas, de las cadenas de suministro en áreas geográficas determinadas y el medioambiente) como elemento involucrado en la evaluación del riesgo, donde ésta es un factor complejo de cuantificar, debido a la falta de información, a la conceptualización y a la sensación de impotencia e incapacidad de reacción en una situación adversa [38], [39].

Enfoques teóricos y vulnerabilidad

Wisner, Blaikie y Cannon, así como Davis [36], [40] desarrollaron un marco teórico con el fin de analizar la exposición a una amenaza natural y la vulnerabilidad, este modelo se denomina Modelo de Presión y Liberación (PAR) y Modelo de Acceso. En él se detalla cómo se reconoce un desastre según los efectos del fenómeno, además considera relevante la causalidad de la fragilidad humana.

La vulnerabilidad es generada por diferentes factores como procesos económicos, demográficos y políticos que determinan el acceso que tiene la población a los recursos, presiones dinámicas basadas en las actividades de la población (actividades sociales, económicas y políticas en el área), ubicaciones geográficas específicas (peligrosas o fuera de la ley), preparación deficiente de las personas

para los desastres, en general condiciones inseguras para la vida. Estos mismos autores [36] asumen que, si dos fuerzas interactúan, entonces ocurre un desastre. Desde un punto de vista de eventos naturales significa que la vulnerabilidad combina fuerzas con la exposición. El riesgo se mide de acuerdo con la magnitud dada por el nivel de riesgo y la cantidad de personas expuestas en el área. Sin embargo, estas fuerzas son difíciles de medir con exactitud por los factores involucrados, debido a ello el modelo en este contexto se considera cualitativo.

Davidson [41] propuso un Modelo de Reducción del Riesgo de Desastres, donde la vulnerabilidad se integra como factor central para calcular el riesgo. En este modelo, el riesgo se calcula por el producto de la amenaza, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad de ajuste de la comunidad (resiliencia). Propone un marco para determinar el desastre del área específica bajo factores como: “Peligro es la probabilidad o severidad de un evento”; “La exposición caracteriza la estructura, la población y la economía”; “La vulnerabilidad abarca aspectos físicos, sociales, económicos y ambientales”, y “Las medidas de capacidad y mitigación incluyen la planificación física, la capacidad social, la capacidad económica y la gestión”. El objetivo es determinar la fragilidad de la comunidad a las amenazas y ayudar a los ciudadanos a tomar acciones precisas para disminuir los efectos de un desastre.

Hewitt [42] desarrolló un Modelo de Regiones de Riesgo donde considera que la vulnerabilidad es el resultado de varios factores: 1) Peligro; 2) Vulnerabilidad como características de una comunidad o un individuo; 3) El riesgo, el cual no depende del peligro, pero sí tiene un impacto directo sobre él; 4) La capacidad de adaptación de las personas a un entorno peligroso que depende de la organización social de una comunidad o de la capacidad de los individuos para responder a una condición extrema.

El modelo Hazards-of-Place (HOP) [43] integra características biofísicas y sociales como un proceso causal de amenazas que considera la vulnerabilidad como la mezcla de vulnerabilidad social y una condición biofísica (exposición potencial) en un área específica. Cutter, Emrich, Webb, y Morath [44] proponen una versión extendida

de HOP, llamado Modelo de Resiliencia de Lugar ante Desastres (DROP), que fue desarrollado para el estudio de amenazas naturales. Estos modelos intentan determinar la propensión de una comunidad o individuos a los peligros ambientales [45].

La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR [46], [47]) desarrolló un marco de referencia para la reducción del riesgo de desastres donde la vulnerabilidad, como en los modelos anteriores, es fundamental para determinar el riesgo de la comunidad. UNISDR [46] define la vulnerabilidad por categorías: física, social, económica y ambiental. El marco de referencia muestra las fases para aplicar técnicas de reducción del riesgo de desastres considerando la evaluación de la vulnerabilidad, la identificación de amenazas, la evaluación de riesgos y las actividades de prevención. Sin embargo, el enfoque no explica la relación entre la reducción de la fragilidad y del riesgo. La contribución de su trabajo es mostrar cómo se involucran los factores para reducir el peligro de desastres.

El enfoque MOVE [48] para evaluar la vulnerabilidad de los desastres fue desarrollado en Europa [49], el cual incluye un marco genérico de evaluación integrada de la vulnerabilidad y muestra un conjunto de pasos como procedimiento para su evaluación en el que se involucran indicadores de este factor [49], [50]. Estos indicadores toman en cuenta la exposición y riesgo físico, fragilidad social, disrupción económica, capacidad de alcance, arreglos institucionales, estado medioambiental y demografía, entre otros aspectos [50].

Enfoques teóricos y percepción del riesgo

Eiser, Bostrom, Burton, y Johnston [51] presentan en su trabajo una revisión profunda de literatura sobre cómo las personas perciben e interpretan los riesgos y eligen sus acciones con base en sus experiencias e interpretaciones de los peligros naturales. Consideran que en el contexto de amenazas naturales se encuentran involucradas la debilidad y las relaciones sociales. Asimismo, reflexionan que es muy importante cómo los individuos y cómo miembros de las redes

sociales interpretan y reaccionan al riesgo con base en sus experiencias y entendimientos. Los autores concluyen que la literatura es variada y extensa, pero no lo suficiente como para disminuir el riesgo.

Parsons, Glavac, y Hastings [52] diseñaron un marco de referencia para definir el Índice de Resiliencia para Desastres Naturales en Australia (ANDRI) en el que toman en cuenta factores de capacidad de afrontamiento y adaptación que representan el potencial de la resiliencia ante un desastre. Para determinar el índice se consideran otros elementos individuales y sociales como aprendizaje de experiencias anteriores, la adaptación y la transformación, temas de carácter social, capital económico, infraestructura y planificación, servicios de emergencia, comunicaciones e información, así como de compromiso de parte de las autoridades y los individuos.

También Eiser, Bostrom, Burton, y Johnston [51], sostienen que “entender cómo la gente interpreta los riesgos y elige acciones basadas en su interpretación es vital para cualquier estrategia para la reducción de desastres”, y desarrollan un modelo conceptual en el que consideran que las interpretaciones que las personas tienen sobre el riesgo depende de sus experiencia, sentimientos y valores personales, creencias culturales e interpersonales y sociales, así como el acceso a la información, que consideran es de forma desigual entre la población. Parsons, Glavac, y Hastings [52] mencionan en su trabajo que la percepción del riesgo es muy importante para evaluar la probabilidad percibida de peligro y la probabilidad percibida de las consecuencias.

Enfoques cualitativos y eventos hidrometeorológicos

Hasta ahora se han descrito algunos modelos conceptuales que involucran la vulnerabilidad como factor clave para determinar la evaluación de riesgo de desastres. A continuación, se describirán algunos enfoques para eventos hidrometeorológicos donde la vulnerabilidad también se considera un factor importante.

El modelo conceptual de fuente-vías-receptor-consecuencia (por sus siglas en inglés modelo Source, Pathway, Receptor, Consequence [SPRC]) describe el riesgo de inundaciones. El marco conceptual muestra una cadena causal a partir de los eventos meteorológicos e hidrológicos que son las “fuentes”. Las fuentes se liberan generando inundaciones que se denominan “vías”. Los “receptores” son los elementos en riesgo por impactos físicos causados por las vías, entonces es posible evaluar los efectos de los impactos físicos como “consecuencias”. Schanze, Zeman, y Marsalek [54] comentan que los eslabones de la cadena: “fuente”, “vía” y “receptor” se refieren al proceso físico, mientras que la evaluación de la “consecuencia” es una cuestión de valores sociales. Después de esta descripción, los factores se clasifican para determinar el riesgo de la inundación: el peligro de la inundación se determina el estado de la vulnerabilidad bajo los factores de “fuente”, “vía”, “receptor” y “consecuencia”, donde las consecuencias se definen por las pérdidas materiales y la capacidad de las personas para compensar las pérdidas [54]. El siguiente paso del modelo conceptual es un enfoque cuantitativo para calcular el riesgo de inundación, que no se describe en este documento.

Es importante mencionar que según Quevauviller [55] los eventos hidrológicos y meteorológicos extremos pueden causar altos impactos cuando ocurren juntos, pero si ocurren de manera independiente, sus impactos pueden no ser extremos. Por otro lado, los impactos altos pueden resultar en eventos no peligrosos si la exposición y vulnerabilidad del sistema son altas, lo cual depende de las condiciones de la población del área geográfica en riesgo.

Lechowska [53] considera que el tema de la subestimación del riesgo de inundaciones por parte de la sociedad se debe a la falta de conocimiento e información sobre los factores que influyen en la percepción de ésta y concluye mencionando algunas características para determinar la percepción del riesgo de inundaciones, señalando que hace falta mucho por investigar en este campo de estudio.

Los factores cualitativos que intervienen en los modelos para evaluar el riesgo son difíciles de obtener y medir, sin embargo, los expertos e investigadores buscan modelar estos factores, a través de las diferentes herramientas, lo más cercano a la realidad, para tener

un escenario más claro de las consecuencias y buscar estrategias que permitan disminuir el sufrimiento de la población afectada, así como reestablecer las actividades normales de las cadenas de suministro en el área afectada y la reconstrucción de las zonas destruidas. Existen trabajos que detallan más enfoques cualitativos para evaluar el riesgo de eventos hidrometeorológicos [56]-[61].

Conclusiones

Este documento puntualizó en la revisión de la literatura sobre los desarrollos cualitativos realizados para evaluar el riesgo de desastres naturales, principalmente sobre eventos hidrometeorológicos desde el punto de vista de logística humanitaria, sin embargo, algunos de esos modelos también implican un enfoque cuantitativo como segundo paso para evaluar el riesgo. La evaluación del riesgo ha sido estudiada en las últimas décadas desde diferentes perspectivas según el campo de investigación, por eso las investigaciones desarrolladas intentan definir los factores que mejor describen la realidad y evaluar el riesgo bajo estos factores para prevenir a las personas cercanas a las zonas en riesgo.

La literatura considera diferentes factores, algunos no son fáciles de determinar, por la falta de información o las características cualitativas de los mismos, tales como la vulnerabilidad, la relación social, la percepción del riesgo, la interpretación del riesgo, la comprensión del riesgo, los factores económicos y demográficos, características sociales y políticas de la zona, etc., por lo que, algunos de los autores coinciden en que la vulnerabilidad de las comunidades es clave para determinar la evaluación del riesgo. Por lo tanto, el desarrollo de nuevas herramientas que permitan caracterizar y medir la vulnerabilidad como factor inherente de la evaluación del riesgo, incrementaría el desarrollo de planes y estrategias adecuados a la población afectada por eventos naturales.

En la logística humanitaria, evaluar el riesgo es un paso básico para diseñar estrategias preventivas, de operación y de reconstrucción en las áreas dañadas. Con base en la información presentada

por Behl y Dutta [30] y la revisión de otros documentos, se concluye que el desarrollo de nuevos trabajos en cualquiera de los enfoques (cualitativo, cuantitativo e híbrido) contribuye al campo de logística humanitaria y cadena de suministro, apoyando sustancialmente con nuevas herramientas a los tomadores de decisiones y a las personas en áreas vulnerables a prevenir los efectos catastróficos de un desastre.

Lo anterior se manifiesta con los resultados obtenidos por Behl y Dutta [30] quienes consideran que existe una amplia brecha entre los estudios desarrollados en temas de evaluación de riesgos y la etapa de resiliencia ante un desastre, en comparación con los otros campos y etapas de la logística humanitaria exponiendo, en tal caso, una valiosa área de oportunidad para nuevas investigaciones. Lo mismo para el tema de evaluación del riesgo para eventos hidrometeorológicos, donde la percepción del riesgo que la población tiene sobre las inundaciones determina las medidas de prevención que ésta toma en situaciones extremas.

Referencias

- [1] C. S. Melching y P. J. Pilon, *Comprehensive Risk Assessment for Natural Hazards*. World Meteorological Organization WMO/TD. núm. 955, United States of America, 2006.
- [2] J. Birkmann, “Measuring vulnerability to promote disaster resilient societies: conceptual frameworks and definitions”, United Nations University-Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS), Tokyo, pp 9–54, 2006, <https://doi.org/10.1111/j.1539-6975.2010.01389.x>
- [3] J. Birkmann y K. von Teichman, “Integrating disaster risk reduction and climate change adaptation: key challenges-scales, knowledge, and norms”, *Sustain Sci*, vol. 5, núm. 2, pp. 171–184, 2010, doi: 10.1007/s11625-010-0108-y.
- [4] F. Navia Miranda y T. Miguel Ferreira, “A simplified approach for flood vulnerability assessment of historic sites”, *Natural Hazards*, vol. 96, pp. 713–730, 2019, doi: 10.1007/s11069-018-03565-1.

- [5] K. Smith y D. N. Petley, “Environmental Hazards. Assessing risk and reducing disaster”, *Fifth Edition, Ed. Routledge, Taylor and Francis Group, London, and New York*, pp. 1–416, 2009.
- [6] T. Rashed y J. Weeks, “Exploring the spatial association between measures from satellite imagery and patterns of urban vulnerability to earthquake hazards”, *Int. Arch Photogram Remote Sens Spat Inf. Sci. XXXIV-7(W9)*, pp.144–152, 2003.
- [7] A. K. Jha, R. Bloch, y J. Lamond, “Cities and Flooding: a Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century”, *The World Bank, Washington, DC*, 2012, <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2241>
- [8] N. M. Chuan, S. Thiruchelvam, A. Ghazali, K. M. Nasharuddin, R. M. Sabri, N. Y. Jin, F. F. Norkhairi, y N. Yahya, “A Review of Key Activities in Hydro Meteorological Disaster Management”, *International Journal of Engineering y Technology*, vol. 7, núm. 4.35, pp. 839-843, 2018, <https://www.academia.edu/48618244/A>
- [9] A. W. Jayawardena, “Hydro-meteorological disasters: Causes, effects and mitigation measures with special reference to early warning with data driven approaches of forecasting”, *Procedia IUTAM*, vol. 17, pp. 3–12, 2015, doi: 10.1016/J.PIUTAM.2015.06.003.
- [10] R. B. Handfield y E. L. Nicholas, “Introduction to Supply Chain Management”, Prentice-Hall, New Jersey, 1999, https://books.google.com/books/about/Introduction_to_Supply_Chain_Management.html?hl=es&id=E4G2QgAACAAJ
- [11] M. Christopher, “Logistics and Supply Chain Management”, *Fourth Edition, Financial Times Prentice Hall, Great Britain*, pp. 276, 2011, https://www.researchgate.net/publication/262305592_Logistics_Supply_Chain_Management_Martin_Christopher_4th_edition_Financial_Times_Prentice_Hall_Harlow_2011_276_pp_ISBN_9780273731122Great_Britain.
- [12] A. Tomas y L. Kopczak, “Humanitarian Logistics: Enabling Disaster Response”, Fritz Institute, Organizations Represented at the Humanitarian Logistics Council, Geneva, pp. 30-31. 2003.
- [13] L. R. Kopczak y A. S. Thomas, “From Logistics to Supply Chain Management: The Path Forward in the Humanitarian Sector”, *Fritz Institute*, pp. 1–17, 2005.

- [14] F. N. De Silva, “Providing spatial decision support for evacuation planning: A challenge in integrating technologies”, *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, vol. 10, núm. 1, pp. 11–20, 1999, doi: 10.1108/09653560110381787.
- [15] K. Cottrill, “Preparing for the worst”, *Traffic World*, vol. 266, núm. 40, pp. 15, 2002.
- [16] S. J. Pettit y A. K. C. Beresford, “Emergency relief logistics: an evaluation of military, non-military and composite response models”, *International Journal of Logistics Research and Applications*, vol. 8, núm. 4, pp. 313–331, 2005, doi: 10.1080/13675560500407325.
- [17] N. Altay y W. G. Green, “OR/MS Research in Disaster Operations Management”, *European Journal of Operational Research*, vol. 175, núm. 1, pp. 475–493, 2006, doi: 10.1016/J.EJOR.2005.05.016.
- [18] L. N. Van Wassenhove, “Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear”, INSEAD, Fontainebleau, France, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 57, núm. 5, pp. 475–489, 2017, doi: 10.1057/PALGRAVE.JORS.2602125.
- [19] G. Kovács y K. M. Spens, “Humanitarian logistics in disaster relief operations”, *International Journal of Physical Distribution. Logistics Management*, vol. 37, núm. 2, pp. 99–114, 2007, doi: 10.1108/09600030710734820.
- [20] S. Pettit y A. Beresford, “Critical success factors in the context of humanitarian aid supply chains”, *International Journal of Physical Distribution. Logistics Management*, vol. 39, núm. 6, pp. 450–468, 2009, doi: 10.1108/09600030910985811.
- [21] J. Birkmann, P. Buckle, J. Jaeger, M. Pelling, N. Setiadi, M. Garschagen, N. Fernando, y J. Kropp, “Extreme events and disasters: A window of opportunity for change? Analysis of changes, formal and informal responses after mega- disasters”, *Natural Hazards*, vol. 55, núm. 3, pp. 637–655, 2010, doi: 10.1007/S11069-008-9319-2.
- [22] M. Lee, J. H. Hong, y K. Y. Kim, “Estimating Damage Costs from Natural Disasters in Korea”, *Nat Hazards Rev*, vol. 18, núm. 4, p. 04017016, 2017, doi: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000259.
- [23] M. M. S. Sodhi y C. S. Tang, “Supply Chain Management for Extreme Conditions: Research Opportunities”, *Journal of Supply Chain Management*, vol. 57, núm. 1, pp. 7–16, 2021, doi: 10.1111/JSCM.12255.

- [24] L. Loza-Hernandez, “Hydrometeorological events in Mexico”. Revista Científica de Estudios Transdisciplinaria. Asociación Mexicana de Investigación y Docencia Transdisciplinaria A.C., vol. 5, núm. 14. 2020.
- [25] K. McCormack, T. Wilkerson, D. Marrow, M. Davey, M. Shah, y D. Yee, “Managing Risk in Your Organization with the SCOR”, Methodology. The Supply Chain Council Risk Research Team. 2008. <https://studylib.net/doc/5319348/managing-risk-in-your-organization-with-the-scor>.
- [26] Y. Sheffi, “The Resilient Enterprise: Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage”, Effects of Disruptions, *Massachusetts Institute of Technology*, vol. 43, núm. 06, 2005.
- [27] M. Christopher y H. Peck, “Creating Resilient Supply Chains: A Practical Guide”, *Cranfield University School of Management*, 2003, <http://www.som.cranfield.ac.uk/-September.2006>.
- [28] P. Barnes y R. Oloruntoba, “Assurance of security in maritime supply chains: Conceptual issues of vulnerability and crisis management”, *Journal of International Management*, vol. 11, núm. 4, pp. 519–540, 2005, doi: 10.1016/J.INTMAN.2005.09.008.
- [29] S. M. Wagner y N. Neshat, “Assessing the vulnerability of supply chains using graph theory”, *International Journal of Production Economics*, vol. 126, núm. 1, pp. 121–129, 2010, doi: 10.1016/J.IJPE.2009.10.007.
- [30] A. Behl y P. Dutta, “Humanitarian supply chain management: a thematic literature review and future directions of research”, *Applications of or in Disaster Relief Operations, Part II*, Springer, 2018, <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2806-2>.
- [31] M. Shafiq y K. Soratana, “Humanitarian logistics and supply chain management-a qualitative study”, *Logforum*, vol. 15, núm. 1, pp. 19–38, 2019, doi: 10.17270/J.LOG.2019.325.
- [32] E. I. Mora-Ochomogo, J. Mora-Vargas, y M. Serrato, “A Qualitative Analysis of Inventory Management Strategies in Humanitarian Logistics Operations”, *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*, vol. 7, núm. 1, pp. 40–53, 2016, <https://ijcopi.org/ojs/article/view/45>.
- [33] M. C. Whiting y B. E. Ayala-Öström, “Advocacy to promote logistics in humanitarian aid”, *Management Research News*, vol. 32, núm. 11, pp. 1081–1089, 2009, doi: 10.1108/01409170910998309.

- [34] I. Antai, C. Mutshinda, y R. Owusu, “A 3-R principle for characterizing failure in relief supply chains’ response to natural disasters”, *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, vol. 5, núm. 2, pp. 234–252, 2015, doi: 10.1108/JHLSCM-07-2014-0028.
- [35] D. Crichton, “UK and Global Insurance Responses to Flood Hazard”, *Water Int.*, vol. 27, núm. 1, pp. 119–131, 2002, doi: 10.1080/02508060208686984.
- [36] C. Wisner y D. Nivaran, “At Risk: natural hazards, people’s vulnerability and disasters”, Second Edition, London and New York: Routledge, Abingdon, 2004.
- [37] T. Cannon, “Vulnerability Analysis and Disasters. In Parker, D.J., Ed., *Floods*, vol. 1, pp. 45-55, 2000, [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1313791](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1313791).
- [38] S. Lin, D. Shaw, y M. C. Ho, “Why are flood and landslide victims less willing to take mitigation measures than the public?”, *Natural Hazards*, vol. 44, núm. 2, pp. 305–314, 2008, doi: 10.1007/S11069-007-9136-Z.
- [39] R. Miceli, I. Sotgiu, y M. Settanni, “Disaster preparedness and perception of flood risk: A study in an alpine valley in Italy”, *J Environ Psychol*, vol. 28, núm. 2, pp. 164–173, 2008, doi: 10.1016/J.JENVP.2007.10.006.
- [40] P. M. Blaikie, T. Cannon, I. Davis, y B. Wisner, “At risk: natural hazards, people’s vulnerability, and disasters”, p. 284, 2004.
- [41] R. Davidson, “An urban earthquake disaster risk index”, Report núm. 121. *Department of Civil Engineering*, Stanford University, Stanford, 1997.
- [42] K. Hewitt, “Regions of risk: a geographical introduction to disasters”, *London: Longman*, 1997, <https://www.routledge.com/Regions-of-Risk-A-Geographical-Introduction-to-Disasters/Hewitt/p/book/9780582210059>.
- [43] S. L. Cutter, “Vulnerability to environmental hazards”, *Prog Hum Geogr*, vol. 20, núm. 4, pp. 529–539, 1996, doi: 10.1177/030913259602000407.
- [44] S. L. Cutter, C. T. Emrich, J. J. Webb, y D. Morath, “Social Vulnerability to Climate Variability Hazards: A Review of the Literature, *Final report to Oxfam America*. 2009. https://www.researchgate.net/publication/270816823_Social_Vulnerability_to_Climate_Variability_Hazards_A_Review_of_the_Literature.

- [45] A. M. Dewan, “Floods in a megacity: Geospatial techniques in assessing hazards, risk and vulnerability”, *Floods in a Megacity: Geospatial Techniques in Assessing Hazards, Risk and Vulnerability*, pp. 1–199, 2013, doi: 10.1007/978-94-007-5875-9/COVER.
- [46] “UNISDR, United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Terminology on Disaster risk Reduction”, *United Nations International Strategy for Disaster Reduction*, Geneva, Switzerland, 2009, <https://www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction>.
- [47] “UNISDR, United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Second Global Platform on Disaster Risk Reduction”, *Geneva: Concluding Summary by the Platform Chair*, United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, Switzerland, 2013, <https://www.undrr.org/publication/chairs-summary-second-session-global-platform-disaster-risk-reduction> (consultado el 28 de marzo de 2023).
- [48] J. Birkmann, O. D. Cardona, M. L. Carreño, A. H. Barbat, M. Pelling, S. Scheiderbauer, S. Kienberger, M. Keiler, D. Alexander, P. Zeil, y T. Welle, “Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework”, *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, vol. 67, núm. 2, pp. 193–211, 2013, doi: 10.1007/S11069-013-0558-5.
- [49] J. Birkmann y K. Von Teichman, “Integrating disaster risk reduction and climate change adaptation: key challenges-scales, knowledge, and norms”, doi: 10.1007/s11625-010-0108-y.
- [50] A. H. Barbat, O. D. Cardona, D. Contreras, M. Garcin, y S. Pratzler-wanczura, “Assessing vulnerability to natural hazards in Europe: From Principles to Practice”, *Assessing vulnerability to natural hazards in Europe: From Principles to Practice*, 2011, https://www.academia.edu/5009627/Assessing_vulnerability_to_natural_hazards_in_Europe_From_Principles_to_Practice.
- [51] R. Eiser, A. Bostrom, I. Burton, D. M. Johnston, J. McClure, D. Paton, J. Van Der Pligt, y M. P. White, “Risk interpretation and action: A conceptual framework for responses to natural hazards”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 1, núm. 1, pp. 5–16, 2012, doi: 10.1016/J.IJDRR.2012.05.002.

- [52] M. Parsons, S. Glavac, P. Hastings, G. Marshall, J. McGregor, J. McNeill, P. Morley, y I. Reeve. Stayner, “Top-down assessment of disaster resilience: A conceptual framework using coping and adaptive capacities”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 19, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1016/J.IJDRR.2016.07.005.
- [53] E. Lechowska, “What determines flood risk perception? A review of factors of flood risk perception and relations between its basic elements”, *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, vol. 94, núm. 3, pp. 1341–1366, 2018, doi: 10.1007/S11069-018-3480-Z.
- [54] J., Schanze, E. Zeman, y J. Marsalek, “Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures”, *Published in cooperation with NATO Public Diplomacy Division, Springer*, 2006, doi: 10.1007/978-1-4020-4598-1.
- [55] P. Quevauviller, “Hydrometeorological Hazards: Interfacing Science and Policy”, *Hydrometeorological Hazards: Interfacing Science and Policy*, vol. 9781118629574, pp. 1–328, 2014, doi: 10.1002/9781118629567.
- [56] S. Greiving, M. Fleischhauer, y J. Lückenötter, “A methodology for an integrated risk assessment of spatially relevant hazards”, *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 49, núm. 1, pp. 1–19, 2006, doi: 10.1080/09640560500372800.
- [57] G. Blöschl, A. Viglione, y A. Montanari, “Emerging Approaches to Hydrological Risk Management in a Changing World”, *Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources*, vol. 5, pp. 3–10, 2013, doi: 10.1016/B978-0-12-384703-4.00505-0.
- [58] D. Eckhardt, A. Leiras, y A. M. T. Thomé, “Systematic literature review of methodologies for assessing the costs of disasters”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 33, pp. 398–416, 2019, doi: 10.1016/J.IJDRR.2018.10.010.
- [59] S. N. Jonkman, M. Bočkarjova, M. Kok, y P. Bernardini, “Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands”, *Ecological Economics*, vol. 66, núm. 1, pp. 77–90, 2008, <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:ecolec:v:66:y:2008:i:1:p:77-90>
- [60] F. Messner y V. Meyer, “Flood Damage, Vulnerability and Risk Perception – Challenges for Flood Damage Research”, *Flood Risk Management:*

Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures, pp. 149–167, 2006, doi: 10.1007/978-1-4020-4598-1_13.

- [61] B. Zanuttigh, y P. Quevauviller, “Features Common to Different Hydrometeorological Events and Knowledge Integration”, *Hydrometeorological Hazards: Interfacing Science and Policy*, vol. 9781118629574, pp. 49–81, 2014, doi: 10.1002/9781118629567.CH1C.

CAPÍTULO V

Esquema de regulación del sistema de transporte público de pasajeros basado en la teoría de contratos

Ma. de Lourdes Najera López, Lourdes Loza-Hernández
y Maximo A. Aguero Granados

Introducción

La regulación del mercado de transporte consiste en introducir barreras legales que permitan el control de los actores económicos con la finalidad de establecer el nivel de eficiencia y el bienestar social óptimos, a través de una autoridad reguladora.

El transporte de pasajeros es un servicio público que debe ser controlado por una autoridad gubernamental, cuya responsabilidad es vigilar la producción y distribución de dicho servicio, de tal manera que se ofrezca eficientemente. Existen escenarios donde se requiere que haya una mediación gubernamental [1]: 1) cuando no hay equilibrio entre la demanda y la oferta en la industria del transporte, 2) cuando se esté otorgando un mal servicio, 3) cuando las tarifas sean elevadas, 4) cuando no se esté brindando un beneficio social. Estas consideraciones llevan a confirmar que la regulación con la participación del gobierno es necesaria para brindar el servicio de transporte público y existen diversos modelos para lograrlo.

En cuanto a la relación que existe entre los operadores y la autoridad reguladora sobre la presentación de iniciativas para cambiar el servicio, se tienen cuatro modelos para ofertarlos [2]: a) *producción directa de servicios*, donde la autoridad es quien se encarga de proporcionar el servicio; b) *gestión delegada*, se otorga a los operadores a petición de la autoridad, se trata de un mercado cerrado o monopolio; c) *libre competencia* en donde el servicio está a cargo solamente de los concesionarios, ellos deciden cómo y en qué condiciones dan el servicio al usuario, y d) *sistema regulado*, en

donde la autoridad pública establece la calidad del servicio y define los instrumentos económicos (contratos, concesiones), con este modelo el gobierno tiene el control en la oferta del servicio del transporte público.

En este trabajo se aborda el instrumento de sistema regulado, el cual se subdivide en cuatro esquemas: a) *esquemas de regulación*, para el caso de monopolio [3] que son conocidos como esquemas de regulación de la tasa de retorno; b) *incentivos basados en la teoría de contratos* [4], [5] para un mercado competitivo; c) *por tarificación* [6] y d) *licitación competitiva* [7], para determinadas características de infraestructura local. Para el caso del esquema de los incentivos basados en la teoría de contratos se establecen dos mecanismos de regulación: de mayor-costos y de precio-fijo, los cuales son los que se caracterizan más adelante.

En el modelo utilizado, el comportamiento de los actores se caracteriza en tres niveles: 1) el regulador procede a implementar un esquema de regulación a partir de la información de costos de producción y la demanda que existe en el mercado. La empresa decide si mejora su nivel de eficiencia en función de los incentivos propuestos. Dado el nivel de eficiencia elegido por la empresa, el regulador verifica si ésta maximiza el bienestar social, de ser el caso mantiene el contrato inicial. Si la empresa decide no mejorar su eficiencia estará sujeta al esquema de regulación alternativo que establezca el regulador; 2) una vez elegido el nivel de eficiencia, la empresa establece la combinación de factores de producción e implícitamente la tarifa que aplica al usuario. En función de esta última, el regulador otorga un incentivo de mejora de eficiencia y nuevamente se evalúa el nivel de beneficio social; 3) el usuario reacciona a la tarifa que el regulador y la empresa hayan pactado ya sea aumentando o disminuyendo el número de viajes. Si el beneficio social no se deteriora, el esquema puede mantenerse. De no ser así, nuevamente se realiza la evaluación del esquema con una nueva combinación de factores de producción.

Los niveles descritos anteriormente son caracterizados en un modelo de equilibrio parcial en el que en primer lugar se caracteriza a la empresa a partir de una función de producción a la cual se asocia

el nivel de servicios de transporte requeridos. Dicha función toma en cuenta factores de producción como la fuerza laboral, material y energía, de capital suave (equipos de oficina) y de equipo móvil (automóviles de la empresa utilizadas por el personal). Posteriormente se establece la función de costos de producción la cual se intenta minimizar a partir de dos esquemas de regulación: de mayor-coste y de precio-fijo y con ello obtener una utilidad máxima para la empresa; ésta última depende adicionalmente del ingreso por cobro de tarifa, de los costos de producción y del nivel de eficiencia laboral.

En segundo lugar, se caracteriza al regulador (entidad pública) explícitamente y al usuario de forma implícita en la función objetivo del primero. Para ello se define una función de bienestar social que incluye la utilidad de los consumidores, los costos del productor y los montos de los incentivos aportados por el regulador.

De esta forma, el objetivo del regulador es maximizar los excedentes del consumidor y del productor que es donde se refleja el incentivo otorgado por parte del regulador a la empresa por su eficiencia de manera indirecta, de tal forma que el usuario se vea beneficiado una vez se haya encontrado el precio óptimo (tarifa menor) y un mejor nivel de servicio. La herramienta de análisis (modelo resoluble) permite estimar la combinación óptima de factores de producción de tal forma que el usuario, la empresa y el regulador obtengan una gran utilidad y por ende un máximo beneficio social. A continuación, se describe de forma sucinta el modelo de equilibrio parcial desarrollado, los detalles pueden ser consultados en Najera [8].

Metodología

El productor

La producción eficiente del servicio de transporte exige combinar variables, tales como: el capital humano (L) contratado para operar dicho servicio (directores, operadores, mecánicos, personal de oficina, etc.); la energía (M) para el funcionamiento de las unidades, maquinaria y equipo (combustible, neumáticos, aceites, etc.); el capital suave (I) es todo el material y equipo necesario para que operen las

oficinas; la infraestructura (K) contempla el número de carriles y de unidades; todo esto a través del tiempo (t), y mismo que contempla la tasa de crecimiento (r).

La Ec. (1) representa la función de producción:

$$Y = f(L, M, I, K; t) \quad (1)$$

El proceso de producción se tiene a partir de la tecnología; los costos y beneficios están en función de dos variables del rendimiento: la capacidad, que a su vez está asociada directamente al nivel de demanda (y_i) y, de forma indirecta, al nivel de servicio (z_i). A partir de la función de producción de elasticidad constante de Cobb-Douglas se establece la función de producción para este estudio, expresada de la siguiente manera:

$$Y_i = \beta_0 y_i^{b_1} (1+r)^{t_1} \quad (2)$$

La cual puede ser expresada alternativamente como:

$$\ln Y_i = b_0 + b_1 \ln y_i + b_2 t_1 \quad (3)$$

Donde $b_0 = \ln \beta_0$ y $b_2 = \ln (1+r)$.

Esta expresión es una forma reducida para representar un proceso de ajuste entre la capacidad y el nivel de servicio. Donde y_i es la demanda que se define a partir de la elección del consumidor, lo cual permite decidir la cantidad que desea consumir, t es una tendencia en la función de demanda.

Función de costos

En la construcción de esta función se toman en cuenta los efectos generados por la falta de información entre la empresa y el regulador.

Se asume que la empresa tiene pleno conocimiento de la eficiencia laboral mientras que el regulador no (información asimétrica) [9], [10]. En efecto, los permisionarios saben en qué medida el movimiento de los usuarios afecta la calidad del servicio, sobre todo en periodos de máxima demanda, ya que en esos momentos los operadores de las unidades realizan varias tareas difíciles de controlar al mismo tiempo: vender boletos, supervisar el ascenso y descenso de los usuarios, cuidar el espacio del autobús; también, tienen el conocimiento del estado y necesidades de la infraestructura vial. Todo esto deriva en la difícil tarea de medir la eficiencia laboral debido a la gran cantidad de capital humano contratado y, a la vez, cómo ésta afecta a la producción, lo que lleva a una diferencia entre lo observado y la fuerza de labor efectiva.

Considerando este problema de información, la fuerza laboral observada por la autoridad reguladora (L^*) puede explicarse como la relación entre la fuerza realmente requerida (L) para producir eficientemente al nivel (Y) y un nivel de ineficiencia asociado a un esfuerzo del mismo operador para disminuirla, es decir:

$$L^* = L \exp(\theta - e) \quad (4)$$

Donde θ es un parámetro que se denomina de “ineficiencia laboral” y sus valores para efecto de este trabajo son: 1 si decide ser eficiente y de 0 si no. Por otra parte, e representa el nivel de eficiencia que el operador lleva a cabo para intentar reducir el efecto de los factores de ineficiencia, cuyos valores propuestos para este análisis son del 70%, 85% y del 100%. Puede notarse que en la Ec. (4) L^* converge a L cuando la ineficiencia laboral es compensada por el esfuerzo del operador para reducirla.

La función de costo asumida por la empresa considera que el conductor realiza un nivel de esfuerzo que depende de costo mínimo (ver Ec. (5)).

$$C = w_L L^* + w_M M + w_I I \quad (5)$$

Siendo w_L , w_M y w_I coeficientes de precios de trabajo, material suave e inversión. De esta manera, el programa de la empresa es operar minimizando costos de producción con el menor personal.

Para comparar la situación actual con los esquemas de regulación se realiza una estimación de tal manera que se consideran las obligaciones de la concesionaria regulada y, para ello, se establece un contrato que combine factores de producción, costo, eficiencia, precios, para diferentes niveles de incentivos que otorgará el regulador.

La Ec. (6) proporciona el gasto mínimo asociado por la empresa, que depende de las variables descritas en las Ecs. (1) y (5).

$$C = \beta_0 \exp(\beta_L(\theta - e)) w_L^{\beta_L} w_M^{\beta_M} w_I^{\beta_I} Y^{\beta_Y} K^{\beta_K} \quad (6)$$

Recordando que garantiza homogeneidad de primer grado $\beta_L + \beta_M + \beta_I + \beta_Y + \beta_K = 1$. Teniendo en cuenta que la condición de primer orden minimiza los costos a partir de la eficiencia, para el régimen de *mayor-costo*, el instrumento no requiere un nivel de esfuerzo determinado, y la función de costo a estimar es la Ec. (7):

$$\ln C = \ln \beta_0 + \beta_L (\theta - e) + \beta_L \ln w_L + \beta_M \ln w_M + \beta_I \ln w_I + \beta_Y \ln Y + \beta_K \ln K \quad (7)$$

Para el régimen de precio-fijo es:

$$\ln C = \beta_0' + \xi(\beta_L (\theta - e) + \beta_L \ln w_L + \beta_M \ln w_M + \beta_I \ln w_I + \beta_Y \ln Y + \beta_K \ln K) \quad (8)$$

Con $\xi = \alpha / (\alpha + \beta_L)$ y $\beta_0' = \ln \beta_0 + \beta_L (\ln \alpha - \ln \beta_L - \ln \beta_0) / (\alpha + \beta_L)$, tomando en cuenta que α incrementa el parámetro ξ hasta 1 y, con ello, la función de costo de precio-fijo converge a la función de mayor-costo. Por lo tanto, la función a estimar es la Ec. (9):

$$\begin{aligned} \ln C &= p(\beta_0' + \xi(\beta_L (\theta - e) + \beta_L \ln w_L + \beta_M \ln w_M + \beta_I \ln w_I + \beta_Y \ln Y + \beta_K \ln K)) \\ &+ (1 - p) + (\ln \beta_0' + \beta_L (\theta - e) + \beta_L \ln w_L + \beta_M \ln w_M + \beta_I \ln w_I + \beta_Y \ln Y + \beta_K \ln K) \\ &= C(Y, K, w, \theta, p / \beta) \end{aligned} \quad (9)$$

Tomando en cuenta que para el instrumento de precio-fijo p vale 1 y 0 para el de mayor-costos.

El regulador

El ente gubernamental es quien regula el servicio de transporte en su localidad, el que establece la tarifa, la capacidad y el esquema de contratación [11], todo esto, determinado por el pago del gobierno según el tipo de contrato. Para el régimen de mayor-costos, el regulador recoge una utilidad y paga el costo de operación de la concesionaria, y la rentabilidad de la empresa es:

$$t = t_0 + C(Y, K, w, e, \theta/\beta) \quad (10)$$

Si la empresa no tiene ningún incentivo, su utilidad es $U = t_0 - \psi(e)$, tomando en cuenta que $\psi(e)$ representa el costo por ser eficiente. En el segundo tipo de régimen por precio-fijo se afectan todos los riesgos, junto con la rentabilidad del operador, en este caso la utilidad de la empresa es $t = t_0$

Para un instrumento de incentivos altos, el que implica un mayor esfuerzo y disminuir costos, la empresa maximiza su utilidad Ec. (11), para un $p \in \{0, 1\}$:

$$U = t_0 + p(y)y - C(Y, K, w, e, \theta/\beta) - \psi(e) \quad (11)$$

Evaluación de beneficios

Como ya se ha mencionado, la necesidad de que exista regulación económica en el modo de transporte se deriva, en ocasiones, de sus características tecnológicas de producción particulares. A continuación, se definen dos criterios para comparar los beneficios de los esquemas de regulación propuestos con respecto a la situación actual: el excedente del consumidor y las elasticidades de la demanda. Se

asume que el regulador maximiza el bienestar social (integrado por el bienestar del gobierno, empresas y usuarios). Primeramente, se evalúan las distorsiones monetarias, es decir, se estiman los costos de fondos públicos en cada esquema. Esta estimación sirve como referencia para comparar la situación actual con los esquemas de regulación óptimos.

Una vez conocida la estructura de los costos, la elasticidad de la demanda, el nivel de eficacia y, la función del precio debe especificarse la conducta del regulador, es decir, elige el nivel del rendimiento óptimo y el costo de servicio más bajo con una restricción financiera específica [12].

El programa de regulación para los dos esquemas (mayor-costo y precio-fijo) es:

$$\max W(y) = S(y) - R(y) - (1 + \lambda)(\psi(e) + C(Y, e, \theta))_y \quad (12)$$

Sujeto a

$$Y = \phi(y)$$

Donde $\phi(y)$ es la función de densidad de la población. Para áreas donde rige el de mayor-costo, el excedente del consumidor está dado por:

$$V(y) = S(y) - R(y) - (1 + \lambda)R(y) \quad (13)$$

Y para el contrato de precio-fijo, es:

$$V(y) = S(y) - R(y) \quad (14)$$

Siendo $S(y)$ el excedente de la función de demanda y el rendimiento $R(y)$ que se obtiene del producto de costo medio y el nivel de demanda. El parámetro λ mide la distorsión del impuesto, es decir, el costo de fondos públicos. Esta distorsión monetaria se debe a la recaudación de impuestos locales y, a la vez, se puede expresar en el incentivo a la empresa. El costo monetario social es igual a $(1 + \lambda)R(y)$ y $(1 + \lambda)R(y)$ es la reducción causada por el impuesto.

A los operadores se les da una transferencia que les permite que equilibren el presupuesto y les proporciona un apoyo monetario como un incentivo al costo, el cual reduce la jornada.

De las condiciones de primer orden asociadas para la maximización del bienestar, el precio óptimo corresponde a la ecuación de Ramsey [4], [12], esto es:

$$\frac{p(y) - \phi'(y)C_y}{p(y)} = -\frac{\lambda}{(1+\lambda)} \frac{\partial p(y)}{\partial y} \frac{y}{p(y)} \quad (15)$$

El lado izquierdo (el índice de Lerner) es inversamente proporcional a la elasticidad de la demanda y a los costos de fondos públicos. En cuanto a la Ec. (15), lo que hace falta saber es el costo de fondos públicos, pero se puede resolver para obtener la estimación de λ para cada red. Cabe mencionar que estas estimaciones son parciales, debido a algunos supuestos. En particular, la estimación es condicional bajo la hipótesis de maximización del bienestar [13], [14].

La estructura que se incorpora es de parámetros de información asimétrica con el principio del incentivo del precio dicotómico [4], [5], lo cual significa que la fórmula de Ramsey aplica para información completa o incompleta. Por tanto, la estimación del costo de fondos públicos sólo depende de los niveles observados de precios y los valores estimados del costo marginal y la elasticidad de la demanda. De acuerdo con la relación de Ramsey, cuando la imposición de impuestos involucra menos distorsión, es decir, cuando λ está cerca de cero, la distancia entre los precios y el costo marginal está reducida, de otro modo, que el déficit presupuestario se cubre fácilmente por la imposición de impuestos.

Por otro lado, si el costo local de fondos públicos es alto, el precio tiende al precio del monopolio donde los subsidios son costosos para la sociedad. Entonces, el déficit de la empresa se cubre parcialmente por el rédito comercial.

A continuación, se plantean escenarios óptimos como referencia para hacer una evaluación del estado actual:

Un primer contrato. *El regulador está perfectamente informado del nivel de eficacia del operador de la red.* Asuma que el regulador recibe réditos comerciales $R(\cdot)$ y paga ex-post de operación de costos $C(\cdot)$. La utilidad del operador es $U = t - \psi(e)$. Ahora el regulador toma el costo de fondos públicos estimados previamente para realizar comparaciones de contratos óptimos y actuales.

Un segundo contrato. *Se define por el nivel del precio $p(y^s)$ y una transferencia.* Sin embargo, dada la situación del monopolio y la selección de una tarifa, corresponde un nivel de rendimiento. De la asignación óptima se obtiene la maximización del bienestar social esperado (Ec. (16)), definido en el intervalo $[\underline{\theta}, \bar{\theta}]$:

$$E_{\theta} W = E_{\theta} \{S(y) + \lambda R(y) - (1 + \lambda)(\psi(e) + C(Y, e, \theta)) - \lambda U\} \quad (16)$$

Con respecto a y y e bajo tres condiciones: 1) la condición de capacidad $Y = \phi(y)$; 2) la de racionalidad individual $U \geq 0$, significando que el operador está dotado por lo menos de un nivel de utilidad tan alto como lo pudieran conseguir fuera y , 3) una condición de compatibilidad de incentivo escrito como en la Ec. (17):

$$U'(\theta) = -\psi(e^s) \quad (17)$$

Es decir, para tener el incentivo, el operador debe brindar la misma ganancia que si él proporciona menor eficacia. También la condición de primer orden asociado a la maximización del bienestar, incluyendo la fórmula de Ramsey (15) define a y^s y e^s . Además, en la solución óptima, la reducción del costo marginal es igual a la des-utilidad marginal del esfuerzo, ya que se obtiene una menor distorsión para limitar el excedente del rendimiento.

Resultados y discusión

El servicio de transporte público de pasajeros en la ciudad de Toluca está regulado por un esquema de gestión delegada. Se compone de

145 rutas concesionadas a 13 empresas que, en promedio, tienen 185 unidades en operación. La entidad pública no dispone de una política para la colecta sistemática de información relacionada a la oferta del servicio. Existe poca información disponible sobre el tema en estudio y, es por lo que se realizaron estudios de inventario que aportan información al presente trabajo. Para la aplicación del modelo descrito se emplearon encuestas de movilidad a bordo de las unidades colectadas durante 2018, estudios de inventario de oferta de transporte público, encuestas a conductores y estudios de frecuencia de paso y cierre de circuito. Estas fuentes de información permitieron obtener los datos relativos a la oferta y demanda de transporte público y sus costos de producción, mismos que se indican en la Tabla I.

Tabla I. Estadística descriptiva y desempeño de la red de transporte público de la ciudad de Toluca.

Variable	Media	Desviación estándar
Demanda (pasajeros/ día)	905880	41058
Longitud de la red (km)	4863	NA
Kilómetros recorridos/día/unidad	200	46.5
Número de rutas (derroteros)	143 (246)	NA
Número de vueltas	6	0.0
Velocidad (km/h)	16.72	4.4
Km recorrido/pasajero (km/pax)	7.3	0.16
Costo Total (\$/asiento/km)	0.167	0.013
Empleados por día	247	133
Costo combustible (\$/vehículo/día)	335	194
Costo de Inversión (\$/día)	135.73	NA
Capital (vehículos/empresa)	185	102
Producción (asientos/día/unidad)	7390	4042
Factor de salario (\$/trabajador)	17.90	2.46
Factor de operación (\$/unidad)	1156.9	611.94
Factor de inversión (\$/viaje)	0.002032	0.001016

*NA. No aplica

Por otra parte, se generó un inventario de indicadores macroeconómicos de los años 2012-2018 a partir del cual se construyó la base de datos panel de variables independientes. Los indicadores empleados fueron: índice de crecimiento de la población, volumen de pasajeros transportados y longitud de la red carretera, inflación, salario mínimo e inflación y empleo urbano en la rama de transporte. Se utilizó el *software* VOCMEX (Modelos de Costos de Operación de Vehículos, versión 3) para determinar el costo de operación vehicular para autobuses. Posteriormente se construyó una base de datos panel [12], [14] para la realización de la estimación.

Los resultados de la estimación se presentan en función de los intereses de cada uno de los actores considerados: para la empresa se da cuenta de los costos de producción distinguiendo los costos laborales y los de operación, para el usuario se indican cómo varían las tarifas del servicio y para el regulador se evalúa el nivel de bienestar social. En el caso del esquema de régimen de precio-fijo se determinaron niveles de eficiencia para la empresa de 70%, 85% y 100% con la finalidad de aportar elementos de decisión para esta última.

Costos de producción

Uno de los objetivos para implementar un sistema de regulación es disminuir los costos y, como se puede ver en la Tabla II, el costo/asiento-km para la empresa bajo cualquier régimen propuesto es menor al costo actual.

De la Tabla II se tiene que la empresa que opere bajo el régimen de precio-fijo y que sea completamente eficiente reducirá hasta en un 41% el costo de producción actual. No obstante, si el nivel de eficiencia se encuentra entre el 85% y el 70%, la reducción porcentual es menos significativa (alrededor del 2%). Ahora bien, si se opta por el régimen de mayor-costos, el costo de operación será similar al actual (ver Tabla II).

Tabla II. Costos actuales y costos estimados bajo el régimen de mayor-costos y de precio-fijo.

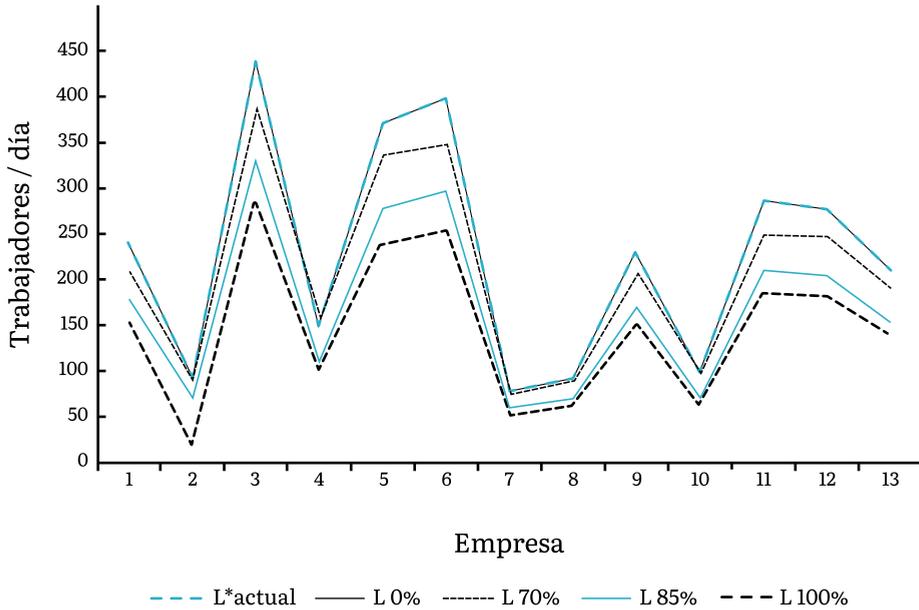
Empresa	Costo vehículo/día				
	Actual	Mayor-costos	Precio-fijo		
	C_{actual}	$C_{mayor-costos}$	$C_{70\%}$	$C_{85\%}$	$C_{100\%}$
1	294.358	294.356	290.363	279.428	171.309
2	279.425	279.424	275.634	274.828	162.618
3	762.403	762.396	752.076	749.884	444.424
4	216.765	216.764	213.823	213.198	126.151
5	241.809	241.808	238.527	237.830	140.726
6	492.184	492.179	485.502	484.083	286.437
7	140.534	140.533	138.626	138.221	81.787
8	167.436	167.435	165.163	164.681	97.443
9	213.629	213.628	210.729	210.114	124.326
10	178.988	178.987	176.559	176.043	104.166
11	657.196	657.188	648.272	646.378	382.468
12	416.136	416.132	410.487	409.287	242.179
13	292.943	292.941	288.967	288.122	170.485
STPT	334.9	334.9	330.4	328.6	195.0

*STPT. Sistema de transporte público de Toluca

Costos de la fuerza laboral

En la Fig. 1 se muestra la relación entre el número de empleados y el tipo de régimen de regulación para cada una de las empresas consideradas en el análisis. El número de trabajadores y choferes y, por lo tanto, el costo laboral disminuye según el grado de eficiencia de la empresa. Esta disminución es en promedio para las 13 empresas, del orden de 14% con una eficiencia del 70%; 26% para las que presentan 85% de eficiencia y de 35% cuando la eficiencia es total. En cualquier caso, el costo laboral en los regímenes de regulación propuestos siempre serán menores al costo actual.

Fig. 1. Número de trabajadores para esquemas de regulación.

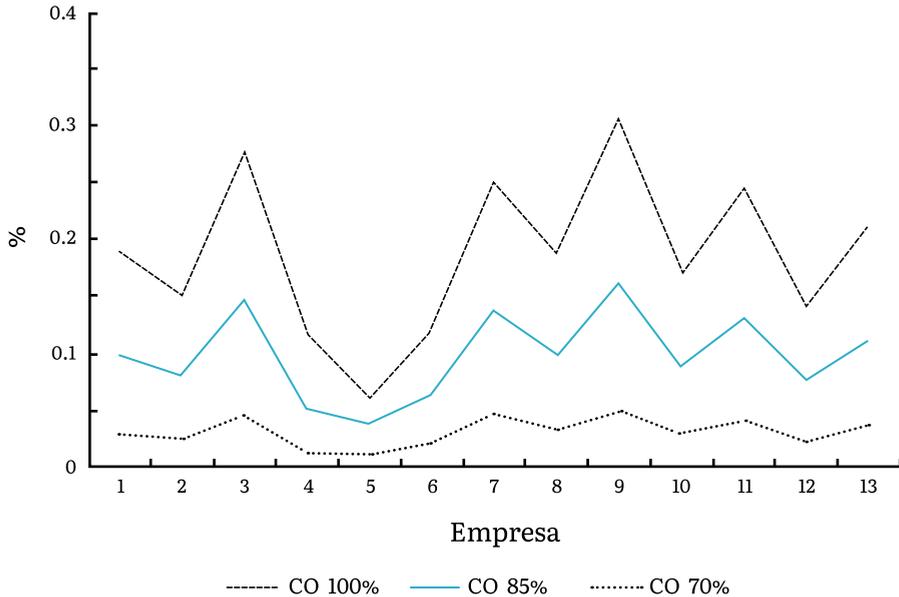


Costos de operación

En la Fig. 2 se muestra la reducción del costo de operación (en porcentaje) para cada nivel de eficiencia que adquieren las empresas, éste varía de acuerdo con las características particulares de cada una de las empresas.

Se muestra que en promedio, para cuando las empresas son totalmente eficientes, el costo de operación se reduce en promedio 21% del costo actual y 10% para el 85% de eficiencia; se observa que el costo de operación siempre se reduce para cuando se adopte el régimen de precio-fijo, tomando en cuenta que el número de unidades y de operadores disminuyen de acuerdo con el nivel de eficiencia que el concesionario adopte.

Fig. 2. Reducción del costo de operación de un vehículo diario.



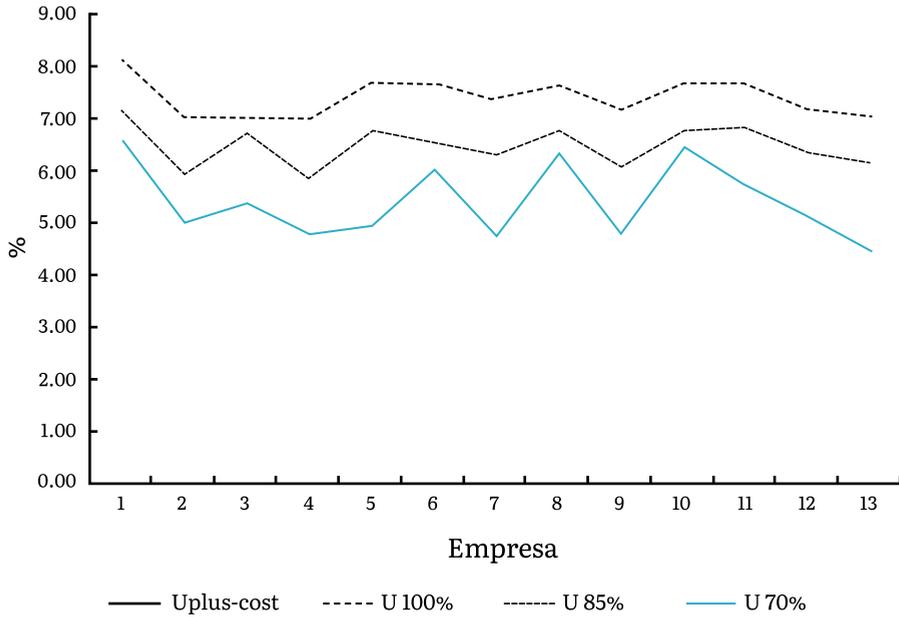
Beneficio de la empresa

En la Fig. 3 se puede observar que si la empresa adopta cualquier tipo de esquema de regulación propuesto, su beneficio (utilidad) siempre será mayor que el actual.

Si adopta el régimen de límite de rentabilidad (mayor-costos) su utilidad esperada es la actual, mientras que si adopta el régimen de precio-fijo el beneficio actual aumentaría entre 5% y 8% dependiendo del nivel de eficiencia que adopte.

Si bien lograr una eficiencia del 100% es poco factible, un rango de 70% a 85% es bastante realizable, por lo que sus beneficios mejorarían al menos en un 5%.

Fig. 3. Beneficios de las empresas.

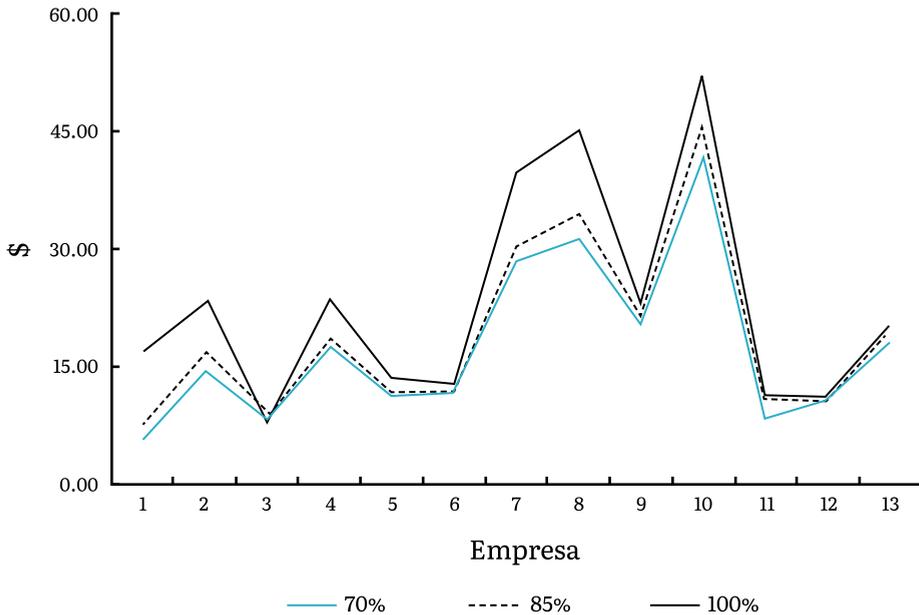


Bienestar social

La Fig. 4 muestra que si la empresa adopta el régimen de precio-fijo, si bien con el mínimo porcentaje de eficiencia, siempre estará entregando un beneficio social mayor al de la situación actual. Para una eficiencia del 85% el beneficio que otorga la empresa 8 a la sociedad es de \$35 pesos por viaje. Se observa que el resto de los concesionarios también ofrecen un nivel más alto de bienestar.

Esta mejora en la eficiencia de los costos de producción, inducidos principalmente por una reducción de la flota vehicular, puede reflejarse en un mejor servicio de transporte, reducción de las emisiones contaminantes, menores riesgos de accidentes y menores tarifas, por mencionar algunos beneficios.

Fig. 4. Bienestar social bajo el régimen de precio-fijo.



Conclusiones

Este estudio ha mostrado que para ofrecer un servicio eficiente y de calidad del transporte público de pasajeros es necesaria la intervención de la autoridad gubernamental. En el caso de la ciudad de Toluca, cualquier regulación a partir de incentivos que sea implementada por el regulador llevaría a una mejor situación que la actual, tanto para la empresa, el gobierno y los usuarios.

Para llegar a esta conclusión se alimentó un modelo matemático bajo la teoría de la regulación e incentivos. Para ello se analizaron dos instrumentos, el de mayor-costos para el cual no hay incentivos, y el de precio-fijo con incentivos para la empresa que esté dispuesta a dar un servicio eficiente. Los resultados obtenidos permitieron verificar las siguientes hipótesis: a) que la eficiencia del sistema de

transporte público, medida a partir de un conjunto de indicadores de desempeño, está definido por el régimen de regulación adoptado y, b) que la regulación a partir de contratos y de incentivos induce a los concesionarios del transporte público a realizar esfuerzos para reducir sus costos de producción. Lo anterior se verifica especialmente en los contratos de precio-fijo en los que es factible aportar incentivos para que las empresas tengan mayores motivaciones para aumentar su eficiencia.

Es importante que haya información simétrica entre la empresa y el ente regulador, que se establezca una base de datos y se actualice constantemente para realizar evaluaciones periódicas de los contratos y orientar de manera correcta la toma de decisiones de parte del regulador, ya que hasta el momento no se sustentan en análisis técnico, ya que se sigue creyendo que la prestación del servicio de transporte público se reduce a una actividad artesanal más que al quehacer industrial en el que están inmersos los procesos tecnológicos, económicos, ambientales y sociales. También cabe mencionar que, en el modelo se pueden agregar o quitar tantas variables se requieran debido a las características de la zona de estudio.

Finalmente, el modelo empleado es lo más general posible para poder considerar a los tres actores (gobierno, empresa y usuario) en caso de regulación por contratos e incentivos, así como tener en cuenta características de un mercado eficiente y la importancia de los incentivos para aquellas empresas que ofrezcan un mayor esfuerzo por brindar un servicio más eficiente y de calidad a la sociedad.

Referencias

- [1] G. De Rus-Mendoza, J. Campos-Méndez, y G. Nombela-Merchán, “Economía del transporte”, 2003, <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=103175>
- [2] S., Leckler, “Organización del transporte público en las áreas metropolitanas europeas”, *Secretario general de EMTA*, vol. 124, p. 12-25, 2002.
- [3] J K., Train. “*Optimal Regulation: The economic theory of natural monopoly*”, MIT Press, 1991.

- [4] J.-J. Laffont, y J. Tirole, “A Theory of Incentives in Procurement and Regulation”, *MIT Cambridge, Massachusetts Institute of Technology*, 1993.
- [5] J.-J. Laffont y D. Martimort, “The Design of Transnational Public Good Mechanisms for Developing Countries”, *IDEI Working Papers*, 2004, <https://ideas.repec.org/p/ide/wpaper/636.html>
- [6] K. Button y E. T. Verhoef, “Road pricing, traffic congestion and the environment: issues of efficiency and social feasibility”, p. 316. 1998, <https://www.e-elgar.com/shop/usd/road-pricing-traffic-congestion-and-the-environment-9781858983653.html>
- [7] B. Finn y J. Nelson, “International Perspective on the Changing Structure of the Urban Bus Market”, núm. 1799, pp. 89–96, 2002, doi: 10.3141/1799-12.
- [8] M. L., Najera, y M. Agüero, “Una aproximación de contratos en el sistema de transporte”. *Diotima, Revista Científica de Estudios Transdisciplinaria*. ISBN 2448-5497, vol. 11, pp. 31-39, 2019.
- [9] K. A. Small, “Urban transportation economics”, *Fundamentals of Pure and Applied Economics*, Harwood Academic Publishers, vol. 51, p. 185, 1992.
- [10] D. P. Baron, D. Besanko, D. P. Baron, y D. Besanko, “Regulation, Asymmetric Information, and Auditing”, *RAND Journal of Economics*, vol. 15, núm. 4, pp. 447–470, 1984, <https://EconPapers.repec.org/RePEc:rje:randje:v:15:y:1984:i:winter:p:447-470>.
- [11] H. J., Chang. “The Economics and Politics of Regulation”. *Cambridge Journal of Economics*, vol. 21, pp. 703–728, 1997.
- [12] D. M. Dalen y G. L. Gomez-Lobo, “Regulation and incentive contracts: An empirical investigation of the Norwegian bus transport industry”, *IFS Working Papers*, 1996, <https://ideas.repec.org/p/ifs/ifsewp/96-08.html>.
- [13] J. J., Laffont, “Incentives and Political Economy: Clarendon Lectures”. *Oxford University Press, Oxford*, 2003.
- [14] P. Gagnepain y M. Ivaldi, “Stochastic Frontiers and Asymmetric Information Models”, 1998, <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/5038>.

CAPÍTULO VI

Predicción de los Índices Nacionales Precio Productor utilizando Redes Neuronales Artificiales

Blas Emilio Bautista Velasco, Otniel Portillo Rodríguez,
Jorge Rodríguez-Arce y David Joaquín Delgado Hernández

Introducción

Los Índices Nacionales Precio Productor (INPP) son importantes indicadores que pueden ser utilizados para conocer la variación de los precios de diversos bienes y servicios, así como de los materiales en la industria de la construcción. En cada país, la publicación de los INPP o similares se realiza por parte de institutos gubernamentales, organismos financieros o de otras instituciones interesadas en la industria de la construcción. En el caso mexicano, la publicación de los INPP es realizada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) [1].

La utilidad de tener una predicción de los INPP se encuentra en que éstos son un reflejo de los costos de diversos productos, materias primas, materiales industrializados y servicios. Por la naturaleza propia de su registro se interpretan como series de tiempo. De acuerdo con lo indicado por Brockwell y Davis [2] una serie de tiempo es un conjunto de datos u observaciones x_i registrada en un determinado periodo de tiempo t . Poder anticiparse a la publicación de dicha información supone una ventaja en la planeación de los costos de proyectos. El objetivo del presente trabajo es predecir el siguiente valor mensual del INPP del concreto premezclado, importante insumo utilizado en grandes obras de infraestructura en México.

Existen varios métodos para predecir los costos de diversos materiales a partir de series de tiempo, entre los cuales se encuentran el promedio móvil autorregresivo (ARMA) [3], el promedio móvil simple (SMA), Holt Winters ES o el promedio móvil autorregresivo integrado

(ARIMA) [4], estos métodos modelan dinámicamente series temporales, es decir, sólo utilizan información del pasado de la serie para hacer pronóstico sobre el futuro, sin utilizar otras variables independientes⁴. En el presente trabajo se han seleccionado las RNA para realizar una regresión no lineal entre los registros de tiempos anteriores y el siguiente registro en el futuro de la serie de tiempo del INPP del concreto premezclado.

Diversas investigaciones, alrededor del mundo, se han llevado a cabo con el propósito de predecir los cambios en los índices y costos en el mercado financiero en general [5]. Para conocer la precisión de los métodos propuestos para la predicción de los costos e índices suelen utilizarse las métricas de error medio cuadrado (MSE), raíz del error medio cuadrado (RMSE) y porcentaje de error absoluto medio (MAPE). Estas métricas comparan la diferencia entre la predicción realizada y la serie de tiempo original en un rango de tiempo determinado. En el presente capítulo se ocupó el valor de MAPE para realizar las comparaciones.

⁴ **Modelo ARMA:** se utiliza para describir una serie temporal estacionaria, es decir, una serie sin tendencia ni estacionalidad; utiliza los valores pasados de la serie y los errores aleatorios pasados para modelar la serie y hacer pronósticos.

Modelo SMA: consiste en calcular el promedio de los valores de la serie en un número determinado de periodos anteriores conocidos como ventanas de tiempo.

Modelo ARIMA: combina la autocorrelación (AR) y el promedio móvil (MA) de una serie temporal para modelar su comportamiento dinámico. El modelo también tiene en cuenta la estacionalidad de la serie mediante la diferenciación integrada (I). Los parámetros del modelo se ajustan a los datos y se pueden utilizar para hacer pronósticos sobre el comportamiento futuro de la serie.

Modelo ARIMA estacional: Este modelo es similar al modelo ARIMA, pero también tiene en cuenta la estacionalidad de la serie mediante el uso de términos estacionales en las partes AR, MA e I. Esto hace que el modelo sea más adecuado para series con patrones estacionales claros.

Modelo Holt ES: Este modelo utiliza un enfoque de suavización exponencial para modelar la serie temporal y hacer pronósticos. Se compone de dos ecuaciones: una de nivel y otra de tendencia. Es útil para series que tienen una tendencia clara, pero no tienen patrones estacionales.

Modelo Holt-Winters ES: Este modelo es similar al modelo Holt ES, pero también tiene en cuenta la estacionalidad de la serie mediante el uso de un término estacional.

Entre los estudios previos relacionados con el objetivo del presente trabajo, se encuentra el realizado por Ashuri [4], quien comparó distintos modelos de predicción de series de tiempo aplicadas a la predicción del CCI (Índice de Costo de Construcción) de Estados Unidos.

En su trabajo, compara los modelos ARIMA, ARIMA estacional, Holt ES y Holt-Winters ES; obteniendo valores de MAE entre 1.00% y 1.29%. Los datos analizados están muestreados en periodos mensuales, a partir de enero de 1975 hasta diciembre de 2008, sumando un total de 408 datos.

Se dividieron en varios grupos, todos partiendo desde 1975, llegando a distintos años e intentando predecir el siguiente, con un mínimo de doce años por grupo. Ilbeigi [6] realizó un estudio similar al anterior para predecir los costos del asfalto donde los modelos ARIMA y Holt-Winters ES los mejores para tal propósito, con valores de MAPE en la predicción menores al 2.00%. Se utilizaron los datos desde enero de 1996 hasta diciembre de 2014 con un total de 228 observaciones. Con las observaciones hasta diciembre de 2013 se entrenaron los modelos y las observaciones correspondientes al año 2014 fueron usadas para evaluar sus precisiones.

Hwang [7], a su vez, desarrolló una predicción de series de tiempo automatizadas de costos de materiales, que fue capaz de determinar tendencias y costos óptimos en el precio de los siguientes materiales: varillas, perfiles de acero y concreto premezclado. Se utilizaron 112 datos, de diciembre del 2000 a marzo de 2010 para la fase de modelado, y de abril de 2010 a marzo de 2011 para validar el modelo.

El MAPE obtenido tuvo una variación de entre 0.97% y 3.50%. Zhang [8] estudió la sincronía existente entre los cambios en los índices de costos de construcción a nivel global y demostró que éstos poseen, en efecto, una correlación con una significancia de 1.00% en una prueba de dos colas. Los resultados arrojaron correlaciones mayores a 0.40 para 18 muestras. Se ocupó información trimestral desde 2006 hasta el tercer trimestre de 2015 de 20 países, además de la información de China y Estados Unidos de forma mensual transformada a trimestral.

Elmousalami [9] propuso un modelo difuso para identificar los principales insumos e incluir el concepto de incertidumbre en el modelo de predicción de costos. Comparó dos modelos, el primero fue un modelo de lógica difusa y el segundo, la combinación del modelo de lógica difusa y un algoritmo genético, el primero obtuvo un MAPE de 26.30% y el segundo de 14.70%.

Faghieh y Kashani [10] presentaron un modelo de corrección de errores vectoriales (VEC) para predecir precios en el corto y largo plazo de materiales para construcción, aplicado en materiales como el asfalto, acero y cemento en los Estados Unidos.

A través de las métricas ya mencionadas, los autores concluyen que el modelo es superior al modelo ARIMA, aunque mejorable. En este caso se utilizaron 240 observaciones, desde 1997 hasta 2016, utilizando la información desde 1997 hasta 2013 como información de entrenamiento y las restantes 36 observaciones, de 2014 a 2016, como información de validación del modelo.

El MAPE obtenido tenía una variación, dependiendo del material, del 0.29% al 1.29%. Lee [11], a su vez, utiliza esta metodología para predecir el precio del hierro, obteniendo mejores resultados en métricas que las obtenidas con el modelo ARIMA. En su caso utilizó la información anual de 2001 a 2006, que utilizó para predecir de 2007 a 2016.

Shiha, Dorra y Nassar [3] realizaron una comparación entre tres modelos de RNA. Sus datos de entrada a la red fueron los indicadores económicos principales de Egipto, tales como el Producto Interno Bruto (PIB), tasa de desempleo, tasa de cambio y el Índice de Precio al Consumidor, con datos de mayo de 2008 a junio de 2018. Las salidas fueron los precios futuros mensuales, con un límite de hasta seis meses de los dos principales materiales de construcción de aquel país: varillas de acero y cemento Portland.

La métrica utilizada fue el MAPE, que varía entre el 4.00% y el 11.00%. La Tabla I muestra un resumen de las técnicas descritas anteriormente indicando el valor del MAPE obtenido en cada predicción.

Tabla I. Resumen del estado de arte.

Autores	Año	Métodos	Objetivo	MAPE
Ilbeigi, Ashuri y Joukar	2016	ARIMA, Holt-Winters ES	Asfalto	2.00%
Elmousalami	2019	Lógica difusa, Algoritmo genético	Identificación de principales insumos	14.70%
Faghih y Kashani	2018	Corrección de errores vectoriales	Asfalto, acero, concreto	0.29% a 1.29%
Shiha, Dorra y Nassar	2020	Redes neuronales	Cemento, acero	4.00% a 11.00%
Hwang, Park, Lee y Kim	2012	Series de tiempo automatizadas	Varillas, perfiles, concreto	0.97% a 3.50%

Metodología

En la Fig. 1 se resume la metodología utilizada para el desarrollo del presente trabajo. Ésta consta de la obtención de la información requerida, la organización de los datos, el entrenamiento de las redes neuronales artificiales, su validación, prueba y el análisis de los resultados obtenidos.

Obtención de información

Los datos empleados se han extraído de las bases de datos públicas del INEGI. La información está disponible al público para su libre descarga en el sitio de internet del Instituto [2]. Se descargaron datos de 15 INPP de los principales insumos y materiales de la industria de la construcción, de los cuales, para este trabajo se ha seleccionado el INPP del concreto premezclado. Este es un material compuesto por cemento, agua, grava y arena con mezclas específicas que se adaptan a la obra en que se requiera. Los índices están calculados con base al mes de julio de 2019. Los datos considerados comprenden el periodo de enero de 1994 a diciembre de 2019.

Organización de datos

Una vez seleccionado el INPP de interés, los datos fueron divididos en tres conjuntos: entrenamiento, validación y prueba. El primer conjunto, tal como su nombre lo indica, permite entrenar el modelo con una parte de la información disponible, este es el conjunto de datos más grande. El conjunto de validación supone una primera prueba para el modelo entrenado. Es un conjunto de datos más pequeño que el de entrenamiento.

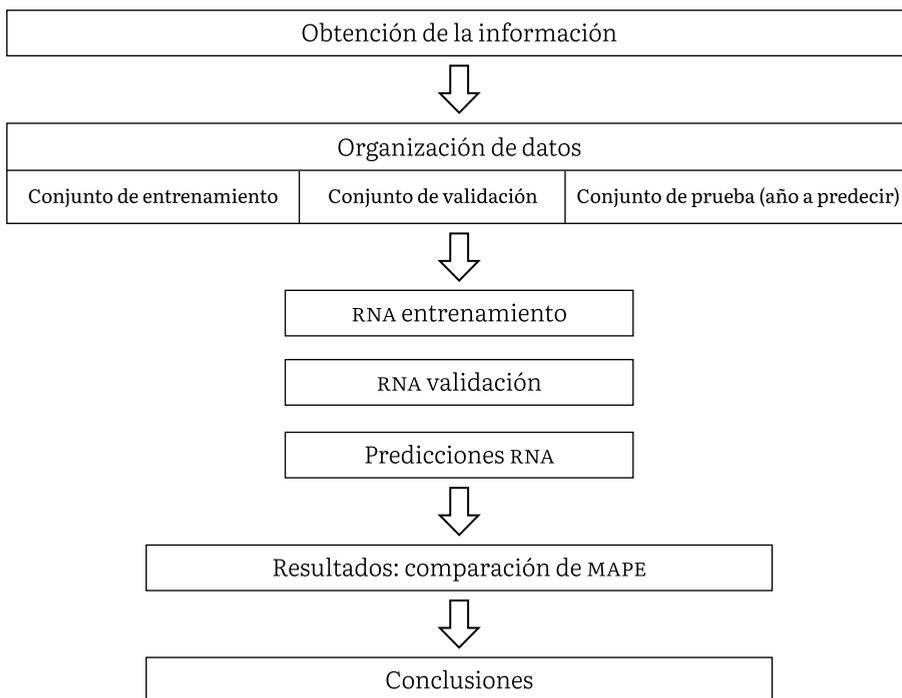
Finalmente, el conjunto de prueba es la colección final de datos con la que se busca comparar las predicciones que el modelo realiza. Esta división en tres conjuntos de datos evita el sobreajuste de las predicciones; es decir, que el modelo tienda a tener un error bajo en las predicciones en el conjunto de entrenamiento y un error mayor en el conjunto de prueba.

La función del conjunto de validación es encontrar el modelo de menor complejidad donde el error de validación es el menor posible, lo cual garantiza el menor error en el conjunto de prueba [12].

En el presente trabajo, los conjuntos de entrenamiento, validación y prueba se dividieron de la siguiente forma:

- **Entrenamiento:** comprende los datos de enero de 1995 a diciembre de 2015, siendo un total de 252 datos para cada uno de los índices a predecir.
- **Validación:** los datos que corresponden a los índices de enero de 2016 a diciembre de 2018, siendo un total de 36.
- **Prueba:** son los últimos doce datos con los que se realizan las predicciones para el periodo de enero a diciembre de 2019.

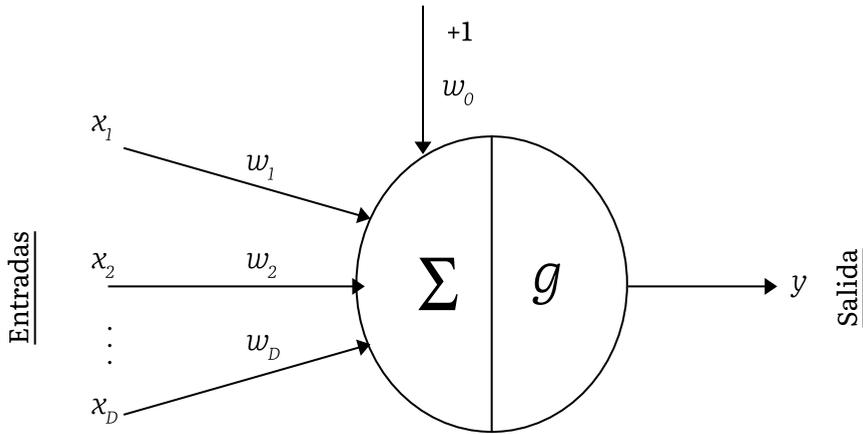
Tabla I. Resumen del estado de arte.



Redes neuronales artificiales

Una Red Neuronal Artificial es un método de procesamiento de la información inspirado en la forma en la que el cerebro humano procesa la información [13], está formada por neuronas distribuidas en capas. McCulloch y Pitts [14] mencionan en su artículo seminal de 1943 que el sistema nervioso se compone de neuronas que permiten o cierran el paso de la información. El trabajo en conjunto de todas las neuronas permite la solución de un problema dado. En la Fig. 2 se representa el funcionamiento de una neurona artificial.

Fig. 2. Modelo de neurona propuesto por McCulloh y Pitts.



El conjunto de datos o información x_i entra a cada neurona que compone la red, siendo cada dato multiplicado por un peso w_i . Cada uno de los valores ponderados $x_i w_i$ se suma dentro de la neurona y se le añade un sesgo w_0 , tal como se indica en la Ec. (1). Este sesgo compensa la diferencia entre el valor promedio de las D entradas del conjunto de entrenamiento y el valor promedio de las salidas deseadas [13].

$$a = \sum_{i=1}^D w_i x_i + w_0 \quad (1)$$

La neurona se activa a través de la función de transferencia g y la neurona da como respuesta la salida y [13].

$$y = g(a) = g(\sum_{i=1}^D w_i x_i + w_0) = (\sum_{i=1}^D w_i x_i) \quad (2)$$

Existen muchas funciones de transferencia, tales como la función de escalón (la propuesta por el modelo de McCulloh y Pitts, indicada en la Ec. (3)), la sigmoidea (Ec. (4)), función usada en este trabajo), la tangente hiperbólica (Ec. (5)) o la gaussiana (Ec. (6)):

$$g(a) = \begin{cases} 0 \rightarrow a < 0 \\ 1 \rightarrow a > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$g(a) = \frac{1}{1 + e^{-a}} \quad (4)$$

$$g(a) = \tanh = \left(\frac{e^a - e^{-a}}{e^a + e^{-a}} \right) \quad (5)$$

$$g(a) = \exp \left(-\frac{(a - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (6)$$

La complejidad de una RNA está determinada por el número de neuronas y capas que la componen. Es de suponer que, a mayor complejidad de la red, el error en sus predicciones será menor. Sin embargo, al aumentar la complejidad se corre el riesgo de un sobreajuste de la RNA a los datos que pretende predecir (tiende a predecir muy bien cuando los datos de entrada son similares o iguales a los de entrenamiento, pero tiene grandes errores de predicción para otros valores), haciendo poco fiable su aplicación debido a su pobre generalización [12]. Para evitar el sobreajuste, la RNA que se utilizará para predecir los datos de prueba será la RNA que obtenga el menor MAPE en los datos de validación (MAPE_v) en cada iteración.

En el presente documento, la arquitectura propuesta de las redes generadas es la siguiente:

- La capa de entrada consta de doce neuronas, cada una corresponde a los doce valores previos del índice que se pretende predecir.
- La capa oculta varía entre una y treinta neuronas que ocupan la función sigmoidea como función de transferencia.
- La capa de salida consta de una neurona, cuyo valor de salida es el valor del índice predicho del mes siguiente.

Se generaron un total de 900 RNA diferentes, utilizando 30 semillas de números aleatorios; con cada una de esas semillas se generaron 30

RNA, variando en cada una de ellas el número de neuronas de su capa oculta entre 1 y 30. Los pesos de las conexiones de las neuronas de cada RNA se generaron a partir de su correspondiente semilla. Para cada semilla utilizada se escogió la RNA con el menor $MAPE_V$ y con ella se realizaron predicciones para el valor del índice para cada mes del año 2019. Así mismo, se registró la moda del número de neuronas de las RNA seleccionadas para conocer la complejidad de la red a la cual tiende la solución; también se registró la media y la desviación estándar de los $MAPE_V$ y los $MAPE$ de prueba ($MAPE_P$) de las 30 RNA seleccionadas. La RNA que obtuvo el menor $MAPE_P$, fue la que se escogió como el modelo de regresión no lineal del INPP del material seleccionado.

Las RNA fueron implementadas en el lenguaje de programación R, utilizando R Studio [15]. Por razones de control, se permitió que la semilla que genera los pesos de las neuronas de cada red fuera aleatoria, dentro del rango de 1 a 100,000. Dichas semillas fueron registradas para poder reproducir posteriormente los pesos y resultados de las arquitecturas de las RNA de interés. El equipo utilizado tiene un procesador Intel^R CoreTM i7-8700T a 2.40 GHz, con 16.00 GB de memoria RAM. Equipos de cómputo con prestaciones similares son habitualmente encontrados en la industria de la construcción, dados los requerimientos técnicos de algunos de los programas que se utilizan en ésta.

Métrica de error

Una métrica de error es una forma en la que puede calcularse la diferencia entre las predicciones y los datos reales. Algunas de las más conocidas son el error medio cuadrático (MSE, Ec. (7)) y la raíz del error medio cuadrático (RMSE, Ec. (8)). Sin embargo, en este trabajo se ocupó como métrica de desempeño el porcentaje de error absoluto medio ($MAPE$, Ec. (9)). El valor de $MAPE$ fue seleccionado ya que es la métrica que se encuentra con mayor frecuencia en la literatura relacionada con el presente trabajo.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \bar{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (9)$$

Donde y_i es la medida real del índice, \bar{y}_i es el valor de la predicción realizada por el modelo y n es el número de datos.

Resultados y discusión

Los resultados se encuentran resumidos en la Tabla II. El número de neuronas en la capa oculta más frecuente (moda) fue de 21 neuronas, cantidad que se repitió un total de 3 ocasiones. El MAPE_V promedio fue de 1.55% mientras que el MAPE_P promedio fue de 1.64%, con desviaciones estándar de 0.38% y 1.08%. El comportamiento promedio con el conjunto de validación arrojó un MAPE_V de 1.55%. La desviación estándar en las predicciones en esta etapa fue de 0.38 puntos porcentuales.

En el caso del comportamiento promedio, el MAPE_P medio fue de 1.64%, y la red con que más se acercó a ese error fue la correspondiente a la corrida 20, con 21 neuronas en la capa oculta y un MAPE_P de 1.73%. La desviación estándar en esta ocasión fue de 1.08%.

Tabla II. Resultados de RNA para predecir los valores del INPP del concreto premezclado para el año 2019.

	Moda	MAPE medio	Desviación estándar
Validación	21	1.55%	0.38%
Prueba		1.64%	1.08%

El mayor $MAPE_V$ encontrado fue de 2.27%, obtenido en la corrida número 13, siendo el resultado de una RNA de 20 neuronas. El mayor $MAPE_P$ se obtuvo en la corrida 19 y fue de 4.57%, arrojado por una RNA de 27 neuronas.

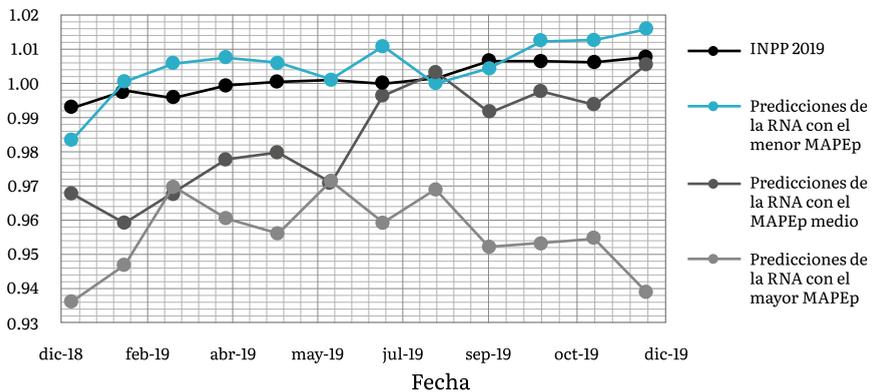
Finalmente, el menor $MAPE_V$ fue de 0.89%, el cual se obtuvo en la corrida número 10, con la semilla 57,970 correspondiente a una red de 14 neuronas. Esta RNA fue la que obtuvo también el valor de $MAPE_P$ más bajo de 0.59%. Está fue la red que se eligió para ser usada como el predictor del INPP.

En la Tabla III se encuentran resumidas las RNA con el menor $MAPE_P$, el mayor $MAPE_P$ y la que tuvo el $MAPE_P$ más cercano al comportamiento promedio. Adicionalmente, en la Fig. 3 se presenta la comparación del INPP del concreto premezclado durante el año 2019 con las predicciones de estas tres RNA.

Tabla III. Resultados de RNA para predecir los valores del INPP del concreto premezclado para el año 2019.

Corrida	Semilla	Neuronas	MAPE validación	MAPE prueba
10	57970	14	0.89%	0.59%
19	7313	27	2.07%	4.57%
20	72007	21	1.46%	4.57%

Fig. 3. Comparación INPP del concreto premezclado.



En general, los mejores resultados presentes en la literatura fueron reportados por Ilbeigi [6], Faghieh [10] y Hwang [7]. Estos trabajos están basados en las técnicas tradicionales para resolver series de tiempo en las cuales las RNA no están incluidas, ya que en éstas se presupone una independencia de los datos de entrada, lo cual en principio explicaría por qué los resultados los MAPE obtenidos por las RNA son mayores a los de los trabajos resumidos en la Tabla III.

Las RNA halladas en la literatura mejoran las predicciones realizadas por Shiha, Dorra y Nassar [3]. En dicho trabajo, para el caso del precio del cemento se halló un MAPE_P de 1.80%, se obtuvo un MAPE_P del 0.59% para el INPP del concreto premezclado. Esta mejora proviene en la metodología de búsqueda de la RNA que tenga el mejor MAPE_V.

Las mejores RNA elegidas de cada corrida no generan un sobreajuste a los datos de prueba ya que tienen el MAPE_V más bajo. El resultado, las predicciones realizadas no muestran en lo general grandes desviaciones. Al examinar la desviación estándar reportada se observa que es de 1.08 puntos porcentuales con el conjunto de prueba, respecto al 0.38% que se obtuvieron en el MAPE_V.

La moda en el número de neuronas de las RNA usadas para la predicción del INPP, muestra la tendencia a la que tiende la complejidad de las mejores RNA para resolver el problema planteado. Una menor complejidad implica menor cantidad de cálculos a realizar y obtención de una predicción en un tiempo más corto. Para el INPP del concreto premezclado, la complejidad del predictor tiende a 21 neuronas. La RNA elegida para ser usada como predictor del INPP en cuestión tiene 14 neuronas en su capa oculta, complejidad menor a las 30 neuronas de la complejidad máxima propuesta.

Para mejorar los resultados obtenidos, se podrían incluir variables de entrada que sí sean independientes y que provengan de indicadores macroeconómicos, tales como el tipo de cambio, producto interno bruto, tasas de interés, inflación, etc. Esto con el propósito de explicar las variaciones en el mercado de los materiales de la construcción como resultado de los cambios en dichos indicadores.

Conclusiones

En el presente trabajo se utilizaron las RNA para predecir los valores del precio de concreto de un año en el futuro tomando como datos de entrada los doce meses previos. Se ha presentado una metodología capaz de predecir el INPP del concreto premezclado, el cual es un insumo importante en la industria de la construcción en México, con potencial para realizar predicciones de otros INPP. Como resultado la RNA elegida tiene un valor de $MAPE_P$ de 0.59%, el cual es menor a los valores reportados en la literatura.

Sin embargo, el presente estudio tiene algunas limitaciones que pueden servir de guía para trabajos futuros:

- Sólo hay una capa oculta en la arquitectura propuesta. Otros trabajos podrían ocupar arquitecturas más complejas, con mayor número de capas y variando la cantidad de neuronas en cada capa.
- Sólo se han considerado el caso del INPP del concreto premezclado, pero puede probarse para otros INPP, como el alambón, ladrillos, cemento, maderas, gasolina o diésel. Adicionalmente, esta técnica puede ser aplicada a otros indicadores económicos del país.
- Se propone estudiar el caso del año 2020, tomando en cuenta el impacto en la economía que la pandemia de coronavirus (COVID-19) ocasionó.
- Proponer estimaciones de los precios en campo de los insumos de la industria de la construcción a partir de las predicciones de las INPP.

Referencias

- [1] INEGI, “Índice Nacional de Precios Productor (INPP). Base julio 2020”, *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/inpp/2019/> (consultado el 25 de junio de 2020).

- [2] P. J. Brockwell y R. A. Davis, “Introduction to Time Series and Forecasting”, Third editions. Springer, 2016, <http://www.springer.com/series/417>.
- [3] A. Shiha, E. M. Dorra, y K. Nassar, “Neural networks model for prediction of construction material prices in Egypt using macroeconomic indicators”, *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 146, núm. 3. 2020, <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0001785>.
- [4] B. Ashuri y J. Lu, “Time Series Analysis of ENR Construction Cost Index”, *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 136, núm. 11, pp. 1227–1237, 2010, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000231.
- [5] R. C. Cavalcante, R. C. Brasileiro, V. L. F. Souza, J. P. Nobrega, y A. L. I. Oliveira, “Computational Intelligence and Financial Markets: A Survey and Future Directions”, *Expert Syst Appl*, vol. 55, pp. 194–211, 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2016.02.006.
- [6] M. Ilbeigi, B. Ashuri, y A. Joukar, “Time-Series Analysis for Forecasting Asphalt-Cement Price”, *Journal of Management in Engineering*, vol. 33, núm. 1, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000477.
- [7] S. Hwang, M. Park, H. S. Lee, y H. Kim, “Automated Time-Series Cost Forecasting System for Construction Materials”, *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, núm. 11, pp. 1259–1269, 2012, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000536.
- [8] R. Zhang, J. Xing, K. Ye, W. Lu, y Y. Shan, “Synchronicity of global construction cost indexes”, *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 26, núm. 3, pp. 367–385, 2019, doi: 10.1108/ECAM-02-2018-0045.
- [9] H. H. Elmousalami, “Intelligent methodology for project conceptual cost prediction”, *Heliyon*, vol. 5, núm. 5, 2019, doi:10.1016/J.HELIYON.2019.E01625.
- [10] S. A. M. Faghih y H. Kashani, “Forecasting Construction Material Prices Using Vector Error Correction Model”, *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 144, núm. 8, pp. 04018075, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001528.
- [11] C. Lee, J. Won, y E.-B. Lee, “Method for Predicting Raw Material Prices for Product Production over Long Periods”, *Journal of Construction*

- Engineering and Management*, vol. 145, núm. 1, pp. 05018017, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001586.
- [12] E. Fox, y C. Gestrin, “Machine Learning Specialization”, *University of Washington*, 2018, <https://github.com/Magho/ML-Washington-specialization-coursera>.
- [13] J. Palma, y R. M. Morales, “Inteligencia artificial. Técnicas, métodos y aplicaciones”, McGraw-Hill Interamericana, Madrid, España, 2008.
- [14] W. S. McCulloch y W. Pitts, “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity”, *The bulletin of mathematical biophysics*, vol. 5, núm. 4, pp. 115–133, 1943, doi: 10.1007/BF02478259/METRICS.
- [15] R. Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing”, *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria, 2019, [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjt55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2631126](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjt55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2631126).

CAPÍTULO VII

Aplicación de la nueva ingeniería en el modelado de un reflector Fresnel para la generación directa de vapor

Eduardo González-Mora, M.D. Durán

Agradecimiento

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a Eugene Adiutori por su valiosa colaboración en el desarrollo de este trabajo. Sus aportaciones y conocimientos fueron fundamentales durante el modelado termohidráulico de la presente investigación. Apreciamos su compromiso y dedicación a este proyecto.

Introducción

Las plantas solares para la conversión de energía térmica en energía eléctrica mediante ciclos de potencia se han orientado a campos solares con colectores cilindro-parabólicos (PTC). Sin embargo, en los últimos años ha habido un interés creciente en el uso de reflectores Fresnel debido a los bajos costos operativos y la posibilidad de utilizar generación directa de vapor. A diferencia del colector parabólico, los análisis que han realizado diferentes grupos de investigación están orientados hacia una configuración única de reflectores Fresnel (LFR), lo que aún limita el análisis de resultados por generar modelos térmicos limitados.

El modelado de plantas de energía juega un papel crucial en la evaluación del diseño y la predicción del desempeño de la planta, lo que implica realizar simulaciones para obtener antecedentes para futuras aplicaciones, ya que es fundamental para apoyar las decisiones relacionadas con la inversión y diseño de plantas de concentración solar de potencia (CSP), pues esto ayuda en la predicción de las

características económicas, energéticas y operativas de una planta real sin los riesgos asociados de posibles accidentes y fallas del sistema que pueden inutilizar una instalación [1].

En este sentido, varios investigadores han realizado análisis de la generación directa de vapor (DSG) con reflectores Fresnel. Giostri, Binotti, Silva, Macchi, y Manzolini [2] comparan el desempeño térmico de dos plantas solares (PTC con aceite térmico y LFR con DSG) y muestran que el campo solar que usa DSG presenta un mejor desempeño que si se usa petróleo para las mismas condiciones de operación. Del mismo modo, Sun, Liu, y Hong [3] simularon numéricamente una planta solar con un canal parabólico en recirculación mediante un análisis 2E, para determinar la eficiencia energética y exergética del sistema.

Alternativamente, Montes, Barbero, Abbas, y Rovira [4] han desarrollado un modelo térmico aplicado al estudio comparativo del rendimiento térmico del receptor LFR basado en diferentes parámetros sobre el campo FRESDEMO.

En el presente trabajo, se describe y valida el modelo térmico del campo solar ubicado en Agua Prieta, Sonora, empleando reflectores Fresnel optimizados ópticamente. El modelo desarrollado se diferencia de los presentados por otros autores en el sentido de que se introduce la metodología de Adiutori [5], conocida como *la nueva ingeniería*, para evitar el uso del coeficiente convectivo en un estudio de transferencia de calor en sistemas de concentración solar. Así, el modelo reduce el tiempo de cálculo y asegura una mejor tolerancia de convergencia en los resultados, además de que tiene la capacidad de poder adecuarse fácilmente para analizar diferentes fluidos de trabajo.

La estructura del capítulo inicia con una explicación detallada de los fundamentos, la motivación y ejemplificación de la nueva ingeniería al contrastarla con la ingeniería convencional, destacando las virtudes que esta novedosa metodología presenta. A continuación, la metodología se aplica para analizar la transferencia de calor de un reflector Fresnel.

Metodología

La nueva ingeniería y la ingeniería convencional

La nueva ingeniería se fundamenta en dos principios elementales:

- Los símbolos de los parámetros en las ecuaciones representan sólo valores numéricos. Por lo tanto, todas las ecuaciones paramétricas racionales son inherentemente adimensionales y dimensionalmente homogéneas.
- Las leyes de ingeniería son generalmente análogas a la Ec. (1). Esta ecuación establece que el valor numérico del parámetro y es una función del valor numérico del parámetro x , y la función puede ser proporcional, lineal o no lineal.

$$y = f\{x\} \quad (1)$$

- Si una ecuación es cuantitativa, las unidades de dimensión que subyacen a los símbolos de los parámetros deben especificarse en una nomenclatura adjunta.
- Los parámetros x y y siempre están separados. Nunca se combinan en análogos de y/x (como el módulo de elasticidad y coeficiente de transferencia de calor).
- En vista de lo anterior, se exponen las ventajas que se presentan al incorporar la nueva ingeniería en los análisis de ingeniería.

Motivación del abandono de la ingeniería convencional

Los análisis realizados bajo el concepto tradicional deben ser abandonados debido a:

- La suposición errónea de que los símbolos de los parámetros en las ecuaciones representan racionalmente el valor numérico y la dimensión.

- Las leyes y los parámetros son irracionales porque fueron creados asignando dimensiones arbitrarias a los números.
- Las leyes que son análogas a la Ec. (2), una ecuación que es ejecutable en matemáticas y debería serlo en ingeniería.

$$y = \left(\frac{y}{x}\right) x \quad (2)$$

Por qué los símbolos de parámetros en las ecuaciones no pueden representar racionalmente el valor numérico y la dimensión

Los símbolos en las ecuaciones no pueden representar racionalmente valores numéricos y dimensiones porque pueden describir racionalmente sólo cómo se relacionan los valores numéricos. Es decir, una ecuación no puede describir cómo se relaciona el flujo de calor con la diferencia de temperatura porque el flujo de calor y la diferencia de temperatura son unidades físicas diferentes [6, 7] y no se pueden relacionar. Sin embargo, una ecuación puede describir cómo se relaciona el valor numérico del flujo de calor con el valor numérico de la diferencia de temperatura porque todos los valores numéricos son las mismas cosas.

La primera ley de la ingeniería convencional

La primera ley de ingeniería convencional fue creada por Fourier [8]⁵ y las leyes posteriores se crearon utilizando la metodología de Fourier. Hasta el siglo XIX, los científicos e ingenieros estaban de acuerdo en

⁵ Adiatori [39] afirma que Fourier hizo tantas contribuciones a la ciencia de la ingeniería moderna que debería ser considerado el padre de la ingeniería moderna. Por ejemplo, a Fourier se le deben atribuir los conceptos de flujo, coeficiente de transferencia de calor, conductividad térmica, homogeneidad dimensional, la solución de problemas de condiciones de contorno, las ciencias de la transferencia de calor por convección y conducción y la metodología necesaria para crear leyes dimensionalmente homogéneas.

que las ecuaciones no pueden describir cómo se relacionan los parámetros porque las dimensiones de los parámetros no se pueden multiplicar o dividir racionalmente. Por eso, la ley de Hooke es una proporción y la segunda ley del movimiento de Newton [9] indica que: “la resultante de fuerzas es proporcional al cambio de *momentum* lineal”.

Fourier realizó experimentos de transferencia de calor por convección forzada. A partir de sus datos, concluyó que si la transferencia de calor se realiza mediante convección forzada al aire en estado estable, la relación entre el flujo de calor y la diferencia de temperatura siempre se describe mediante la Ec. (3).

$$q=c\Delta T \quad (3)$$

Fourier no estaba satisfecho con la Ec. (3) porque c es un número y, por lo tanto, la ecuación no es dimensionalmente homogénea. Fourier reconoció que la Ec. (3) podría transformarse en una ecuación homogénea sólo si fuera racional asignar dimensiones a las constantes, y racional multiplicar y dividir parámetros. En consecuencia, Fourier [8] concibió la siguiente visión revolucionaria y no probada de que es racional multiplicar y dividir dimensiones, y racional asignar dimensiones a los números: “toda magnitud o constante indeterminada tiene una dimensión propia de sí misma, y los términos de una misma ecuación no podrían compararse si no tuvieran el mismo exponente de dimensiones”⁶.

Fourier no incluyó los lemas en su tratado de casi 500 páginas, no identificó a qué lemas se refería, no citó una referencia donde se pudieran encontrar los lemas no identificados y no presentó pruebas de que su punto de vista sea válido. Todo el tratado de Fourier se basa en la validez no probada de su visión revolucionaria de que las dimensiones pueden multiplicarse y dividirse racionalmente, y las dimensiones pueden asignarse racionalmente a los números.

⁶ Esta visión de la homogeneidad es el equivalente de los lemas fundamentales (axiomas) que los antiguos griegos dejaron sin prueba.

Basándose en sus revolucionarios puntos de vista de que las dimensiones pueden multiplicarse y dividirse racionalmente, y las dimensiones pueden asignarse racionalmente a los números, Fourier concibió la Ec. (4), la ley de la convección forzada al aire en estado estacionario⁷, la primera ley de la ingeniería convencional.

$$q=h\Delta T \quad (4)$$

En algún momento, antes de mediados del siglo xx, se determinó que las dimensiones no deben asignarse a los números. Por ejemplo, Langhaar [10] afirma: “Las dimensiones no deben asignarse a números, ya que entonces cualquier ecuación podría considerarse dimensionalmente homogénea”. Por lo tanto, todas las leyes y parámetros de ingeniería convencionales que se crearon asignando dimensiones a los números han sido irracionales durante muchas décadas y deben abandonarse.

Por qué las leyes análogas a $y = \left(\frac{y}{x}\right) x$ son execrables en ciencias e ingeniería

En la ingeniería convencional, la Ec. (4) es la ley de transferencia de calor por convección, en donde se define al coeficiente h [11] como la constante de proporcionalidad entre el flujo de calor y la diferencia de temperatura, es decir:

$$h=q/\Delta T \quad (5)$$

Al reescribir la Ec. (4) con la Ec. (5):

⁷ Aunque los textos estadounidenses generalmente atribuyen a Newton la concepción tanto de h como de la Ec. (4), Adiutori [40] y Bejan [41], [42] atribuyen a Fourier [8] tanto h como la Ec. (4). Generalmente se dice que la Ec. (4) es la “ley de enfriamiento de Newton”, pero la Ec. (4) no puede ser la ley de enfriamiento de Newton porque el enfriamiento es transitorio y la Ec. (4) es de estado estacionario.

$$q = \left(\frac{q}{\Delta T}\right) \Delta T \quad (6)$$

Las Ecs. (4), (5) y (6) son idénticas. Las tres ecuaciones son análogas a la Ec. (2) al introducir un parámetro irracional. Es evidente que la Ec. (2) es execrable en matemáticas e ingeniería porque, si el parámetro y es una función no lineal del parámetro x , el parámetro (y/x) es una variable extraña y complica la solución de la ecuación.

La nueva transferencia de calor

En la nueva transferencia de calor:

- Los símbolos de los parámetros en las ecuaciones representan sólo valores numéricos. Por lo tanto, todas las ecuaciones paramétricas son inherentemente adimensionales y dimensionalmente homogéneas.
- Si una ecuación es cuantitativa, las unidades de dimensión que subyacen a los símbolos de los parámetros deben especificarse en una nomenclatura adjunta.
- No hay parámetros (como h y k) que resulten de asignar dimensiones a los números.

En la nueva ingeniería, la Ec. (7) es la ley de transferencia de calor por convección, dicha ecuación siempre tiene dos variables, mientras que la Ec. (4) presenta tres variables si q es una función no lineal de ΔT (como en la transferencia de calor por convección natural, condensación o ebullición).

$$q = f\{\Delta T\} \quad (7)$$

$$\Delta T = f\{q\} \quad (8)$$

La Ec. (7) establece que el valor numérico de q es una función del valor numérico de ΔT , y la función puede ser proporcional, lineal o no lineal.

De la misma manera, la Ec. (8) establece que el valor numérico de ΔT es una función del valor numérico de q .

En este sentido, q y ΔT siempre se encuentran separadas, v.gr. nunca se encuentran combinados como un coeficiente h (la relación $q/\Delta T$), o U ($q/\Delta T_{total}$) como en el empleo de resistencias térmicas. Las correlaciones de coeficientes de transferencia de calor convencionales se transforman fácilmente en la nueva ingeniería reemplazando h con $q/\Delta T$, luego separando q y ΔT , lo que da como resultado correlaciones en la forma descrita por las Ecs. (7) u (8). En el caso de emplear el coeficiente U como en la Ec. (9), ésta puede transformarse a la nueva ingeniería al reemplazar U , h , k/t con $q/\Delta T$, y posteriormente, separar las variables.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{t}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (9)$$

$$\Delta T_{total} = \Delta T_1 \{q\} + \Delta T_{pared} \{q\} + \Delta T_2 \{q\} \quad (10)$$

Las Ecs. (9) y (10) son idénticas y se diferencian sólo porque q y ΔT se encuentran combinadas en la Ec. (9); mientras que en la Ec. (10), las variables q y ΔT se encuentran separadas.

En la nueva ingeniería, la Ec. (10) reemplaza la Ec. (9). La Ec. (10) establece que el valor numérico de ΔT_{total} es igual al valor numérico de ΔT_1 más el valor numérico de ΔT_{pared} más el valor numérico de ΔT_2 .

Todos los problemas que se pueden resolver con la Ec. (9) empleando el coeficiente h también se pueden resolver usando la Ec. (10) sin emplear h .

Si un problema tiene que ver con el comportamiento no lineal de $q\{\Delta T\}$, se puede resolver mucho más simplemente si la Ec. (10) se utiliza en la solución.

Prueba de que h es innecesario e indeseable

Los gráficos que describen la transferencia de calor por convección natural, generalmente tienen la forma número de Nusselt frente al número de Rayleigh. Los gráficos de esta forma se pueden leer directamente si se da ΔT y se desea q , porque el número de Rayleigh es independiente de q . Sin embargo, si se da q y se desea ΔT , el gráfico no se puede leer directamente. Debe leerse indirectamente porque ambos ejes dependen de ΔT .

Hay que tener en cuenta que el número de Nusselt es proporcional a $q/\Delta T$ (es decir, proporcional a h), y el número de Rayleigh es proporcional a ΔT . Por lo tanto, el producto del número de Nusselt y el número de Rayleigh elimina h porque el ΔT en el denominador del número de Nusselt cancela el ΔT en el numerador del número de Rayleigh. Cuando este producto se representa frente al número de Rayleigh, la eliminación de h hace posible leer el gráfico directamente si se da ΔT y se desea q , o si se da q y se desea ΔT .

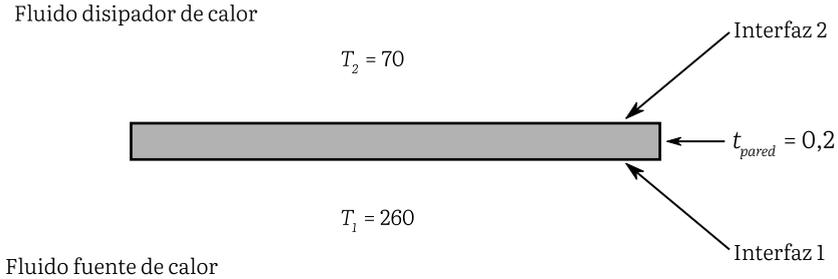
Para ejemplificar esta metodología, considérese la configuración de la Fig. 1, que corresponde a un problema típico de transferencia de calor. En este caso, se desea conocer el flujo de calor y la temperatura de la pared en ambas caras que se encuentran en contacto con un fluido.

En el esquemático de la Fig. 1, se conocen todos los datos necesarios para resolver el problema. De la literatura convencional de transferencia de calor, se pueden obtener el valor de conductividad $k=8,6$ y las ecuaciones siguientes, con las dimensiones de cada parámetro en J, s, m y °C, según corresponda.

$$\text{Nu}_1 = 0,15 (\text{Gr}_1 P_{r1})^{0,33} \quad (11)$$

$$\text{Nu}_2 = 0,47 (\text{Gr}_2 P_{r2})^{0,20} \quad (12)$$

Fig. I. Configuración del problema de transferencia de calor [13].



Para transformar las Ecs. (11) y (12) de las correlaciones del coeficiente de transferencia de calor a las correlaciones del comportamiento de la transferencia de calor, se sustituye $(qL/\Delta Tk)$ por Nu, y separando q y ΔT , y al evaluar con los valores adecuados acorde a la literatura:

$$q_1 = 0,15 \left(\frac{k}{L} \right) \left(\frac{g\beta L^3}{\nu^2} \right)^{0,33} Pr^{0,33} \Delta T_1^{1,33} = 2,80 \Delta T_1^{1,33} \quad (13)$$

$$q_2 = 0,37 \left(\frac{k}{L} \right) \left(\frac{g\beta L^3}{\nu^2} \right)^{0,20} Pr^{0,20} \Delta T_2^{1,20} = 1,64 \Delta T_2^{1,20} \quad (14)$$

$$q_{pared} = \left(\frac{k_{pared}}{t_{pared}} \right) \Delta T_{pared} = 430 \Delta T_{pared} \quad (15)$$

Con ayuda de la Fig. 1 se pueden establecer las ecuaciones de q y ΔT_{total} , mediante:

$$q_1 = q_{pared} = q_2 = q \quad (16)$$

$$\Delta T_{total} = \Delta T_1 + \Delta T_{pared} + \Delta T_2 = T_1 - T_2 \quad (17)$$

Con las Ecs. (13) a (15), para sustituir ΔT_1 , ΔT_2 y ΔT_{pared} en la Ec. (17) se obtiene

$$\Delta T_{total} = 260 - 70 = \left(\frac{q}{2,80}\right)^{0,75} + \left(\frac{q}{1,64}\right)^{0,833} + \left(\frac{q}{430}\right) \quad (18)$$

Al resolver el sistema, se obtiene que $q=585$ [W/m], $T_1=205$ [°C] y $T_2=204$ [°C]. Así, QED de que el coeficiente h es innecesario e indeseable.

Aplicación de la nueva ingeniería en un reflector Fresnel para la generación directa de vapor

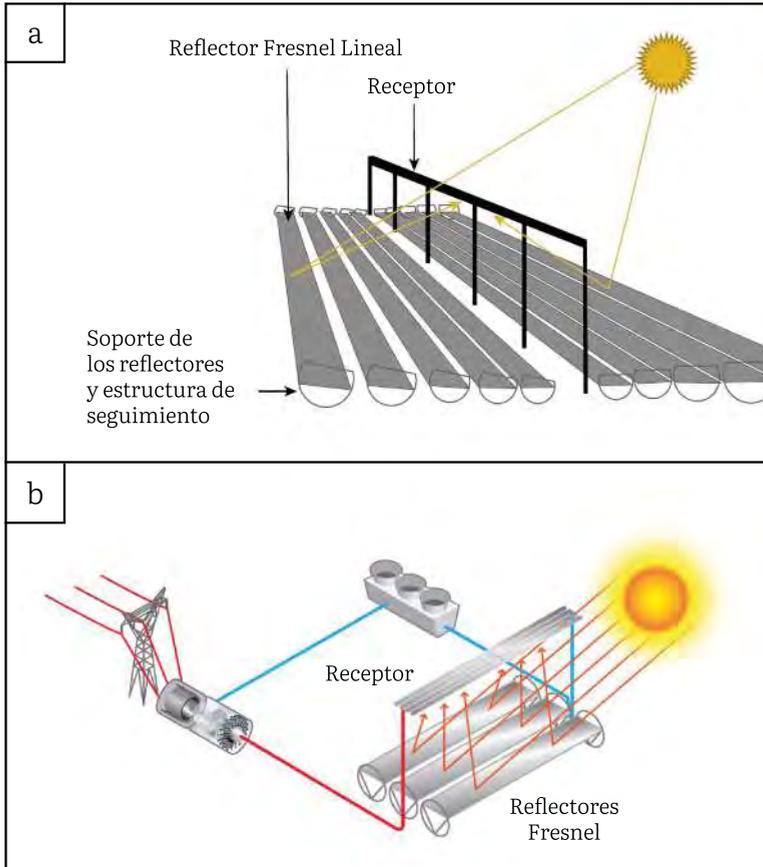
Una vez que se ha descrito la metodología para resolver un problema típico de transferencia de calor, ésta puede aplicarse a cualquier sistema en donde se busque encontrar tanto los flujos de calor, como las temperaturas asociadas. El caso de estudio considera un reflector lineal Fresnel que calentará agua líquida hasta una condición de vapor sobrecalentado; en donde el análisis de la transferencia de calor es esencial para determinar el tamaño de la instalación.

Descripción del sistema

El sistema reflector de Fresnel facilita el diseño del canal parabólico. Se utiliza un conjunto de espejos planos o aproximadamente planos, que se acoplan al nivel del suelo para formar una superficie parabólica [12].

Estos reflectores son largas filas de espejos planos que se desplazan en un solo eje para reflejar los rayos solares hacia el receptor estacionario. En contraste con los canales parabólicos, el receptor de los LFR permanece fijo en el espacio mientras los reflectores rotan para mantener el foco en el receptor inmóvil [13], como se ilustra en la Fig. 2.

Fig. 2. Esquemático de los sistemas Fresnel. a) Configuración de un módulo [13];
b) Configuración de una planta solar con LFR [14].



Cada fila de los reflectores sigue el mismo rastro del movimiento del Sol, pero están inclinados en distintos ángulos en todo momento, debido a que tienen posiciones diferentes en relación con el receptor. Este diseño permite que se construya una unidad básica con reflectores relativamente pequeños y de longitud focal larga, lo que conduce a la utilización de elementos de espejo de vidrio casi planos de menor costo [15], [16].

Aunque la naturaleza óptica de los LFR es simple, hay muy pocos datos disponibles para describir un campo reflector de Fresnel [17]; se deben considerar muchos parámetros para el diseño de un sistema reflector lineal de Fresnel [15], aunque generalmente alcanzan relaciones de concentración dentro del rango de 30 a 70, dependiendo principalmente de la operación del fluido de trabajo [15]-[19].

La central solar por analizar considera una optimización óptica para la ciudad de Agua Prieta, Sonora (Noroeste de México) sobre el campo FRESDEMO (España). La optimización del reflector Fresnel se ha enfocado en el factor de intercepción, dando como resultado el aumento de la altura del receptor y la modificación del CPC de la cavidad, manteniendo el área de apertura del receptor [20]. La Tabla I muestran la descripción general del campo a analizar.

Tabla I. Descripción del campo Fresnel optimizado [20].

Parámetro	Valor
Número de espejos primarios	25
Ancho del campo [m]	21
Longitud del módulo [m]	100
Ancho de los espejos primario [m]	0.6
Factor de llenado	0,71
Altura del receptor [m]	15
Apertura del CPC [m]	0.5
Diámetro del receptor [m]	0.14
Semi-ángulo de aceptación del CPC [deg]	66.3
Factor de intercepción	0.72
Concentración óptica media	81

Recientemente, se ha desarrollado un modelo para la configuración de una planta de energía solar conceptual, con reflectores Fresnel y generación directa de vapor para Agua Prieta, Sonora, en este modelo se utiliza un campo LFR ópticamente optimizado [21]. El modelo desarrollado se diferencia de los presentados por otros autores en el sentido de que se introduce la metodología Adiatori [5] para evitar el uso del coeficiente convectivo en un estudio de transferencia de calor

en sistemas de concentración solar y resolver de manera directa el sistema de ecuaciones, sin requerir a procesos iterativos como lo han hecho los demás investigadores.

Descripción del modelo

Al igual que el modelo de Veynandt [22] y Montes [4], el modelo desarrollado utiliza las ecuaciones de balance de energía en cada superficie de la cavidad, que se muestran esquemáticamente en la Fig. 3, mientras que la Tabla II muestra las definiciones del subíndice asignado para cada superficie. Todos los términos en la Fig. 3 se definen en la Tabla III. Nótese que variables sestasdas con un punto indican tasas de cambio temporal⁸ y junto con las primas indican por unidad de longitud del receptor, en este caso por cada HCE.

Tabla II. Definición de las superficies.

Índice	Superficie
1	Fluido de trabajo
2	Pared interna del tubo
3	Pared externa del tubo
4	Láminas del CPC
5	Aislante térmico
6	Interior de la ventana de vidrio
7	Exterior de la ventana de vidrio
8	Medio ambiente

⁸ Es decir, la derivada lagrangiana con respecto al tiempo. Para más información del significado de la derivada lagrangiana, así como de sus implicaciones en fenómenos físicos, consúltese [43, 44].

Fig. 3. Flujos de calor en el receptor [21].

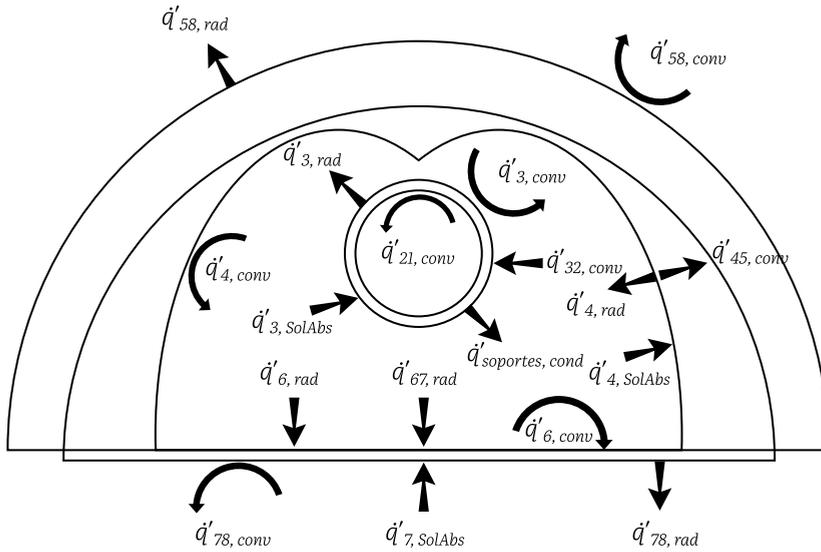


Tabla III. Definición de los flujos de calor [21].

Flujo de calor $\left[\frac{W}{m}\right]$	Modo de transferencia de calor	Flujo de calor $\left[\frac{W}{m}\right]$	Modo de transferencia de calor
$\dot{q}'_{21, conv}$	Convección	$\dot{q}'_{45, cond}$	Conducción
$\dot{q}'_{32, cond}$	Conducción	$\dot{q}'_{58, rad}$	Radiación
$\dot{q}'_{soportes, cond}$	Conducción	$\dot{q}'_{58, conv}$	Convección
$\dot{q}'_{3, SolAbs}$	Absorción de irradiancia solar	$\dot{q}'_{6, rad}$	Radiación
$\dot{q}'_{3, rad}$	Radiación	$\dot{q}'_{6, conv}$	Convección
$\dot{q}'_{3, conv}$	Convección	$\dot{q}'_{67, cond}$	Conducción
$\dot{q}'_{4, rad}$	Radiación	$\dot{q}'_{7, SolAbs}$	Absorción de irradiancia solar
$\dot{q}'_{4, conv}$	Convección	$\dot{q}'_{78, rad}$	Radiación
$\dot{q}'_{4, SolAbs}$	Absorción de irradiancia solar	$\dot{q}'_{78, conv}$	Convección

Las ecuaciones de energía térmica se determinan aplicando el balance de energía a cada superficie de la sección transversal del receptor conforme al modelo de la Fig. 3, mediante:

$$\dot{q}'_{21, conv} = \dot{q}'_{32, cond} \quad (19)$$

$$\dot{q}'_{3, SolAbs} = \dot{q}'_{32, cond} + \dot{q}'_{3, rad} + \dot{q}'_{3, conv} + \dot{q}'_{soportes, cond} \quad (20)$$

$$\dot{q}'_{45, cond} = \dot{q}'_{4, SolAbs} + \dot{q}'_{4, rad} + \dot{q}'_{4, conv} \quad (21)$$

$$\dot{q}'_{45, cond} = \dot{q}'_{58, rad} + \dot{q}'_{58, conv} \quad (22)$$

$$\dot{q}'_{67, cond} = \dot{q}'_{6, rad} + \dot{q}'_{6, conv} \quad (23)$$

$$\dot{q}'_{7, SolAbs} + \dot{q}'_{67, cond} = \dot{q}'_{78, rad} + \dot{q}'_{78, conv} \quad (24)$$

En cuanto a los términos que involucran a los intercambios radiativos ($\dot{q}'_{i, rad}$), se ha tenido en cuenta el intercambio de radiación en la cavidad, que consta de tres superficies a temperaturas T_3 , T_4 y T_6 . Debido a que las superficies de intercambio no son iguales, este término difiere de superficie a superficie. De manera similar, los intercambios convectivos ($\dot{q}'_{i, conv}$) varían de una superficie a otra; pero en vez de calcular los coeficientes convectivos de manera independiente, se modifican las correlaciones respectivas como se discutió en la sección anterior, y así definir funciones para las tres superficies a temperaturas T_3 , T_4 y T_6 .

El sistema de seis ecuaciones con siete variables, Ecs. (19) a (24) se completa con la ecuación de energía aplicada al fluido de trabajo a medida que pasa a través de una longitud dada del receptor:

$$\dot{q}'_{21, conv} = \frac{\dot{m}}{L_{HCE}} (h_{isal} - h_{lent}) \quad (25)$$

donde \dot{m} es el flujo másico [kg/s], h_i es la entalpía específica del fluido [kJ/kg] y $L_{HCE}=5,88$ [m] es la longitud del elemento de calor.

Convección

No existe una metodología directa para calcular la transferencia de calor por convección entre las tres superficies internas de la cavidad, debido a la geometría que involucra la relación entre superficies no

convencionales. Sin embargo, utilizando las definiciones de los grupos adimensionales, es posible aplicarlo a una gran variedad de casos con modificaciones relevantes [23], [24]. Se han realizado algunas propuestas de corrección de las relaciones de superficies convencionales mediante un estudio completo y detallado de la geometría del CPC, siendo la más relevante la propuesta por Veynandt [22] y Montes, Barbero, Abbas, y Rovira [4]. En el presente modelo, se propone aproximar la cavidad a un espacio anular entre dos cilindros concéntricos largos (donde el cilindro interno, absorbedor, es más cálido que el exterior, flujo libre de la cavidad) y utilizar como aproximación la correlación de Raithby y Holland [25] del tipo:

$$\dot{q}'_{conv,i} = f\{T_i, T_c\} \quad (26)$$

donde T_i es la temperatura de la i -ésima superficie (tubo absorbente exterior, CPC o superficie interior de Pyrex), y T_c representa la temperatura corregida de las superficies ponderadas, que se basa en un estudio detallado de las líneas isotérmicas de distribución estratificada para la cavidad. Este análisis ha sido validado por el trabajo experimental y las simulaciones numéricas llevadas a cabo por Kuehn y Goldstein [26].

Para la parte trasera del aislamiento, la pérdida de calor por convección se obtiene al desarrollar las diferentes correlaciones para el caso de viento o ausencia de viento. En el caso de convección libre, se emplea la correlación de Churchill y Chu [27]. En el caso de la convección forzada, la correlación de Žukauskas [28] es adecuada; considerando el diámetro externo del absorbedor como la longitud característica del sistema.

La ventana de vidrio en el receptor se modela como una placa horizontal calentada por la parte inferior, de modo que la pérdida de calor por convección se calcula mediante diferentes correlaciones para el caso de viento o ausencia de viento. Si no hay presencia de viento, la correlación de McAdams [29] es adecuada; de lo contrario, la relación de Pohlhausen [30] es aplicable en el caso del flujo laminar; mientras que si uno tiene una condición de flujo turbulento, la relación de Chilton y Colburn [11] es adecuada.

La convección interna en la parte interna del tubo hacia el fluido de trabajo se divide en dos zonas (involucrando los tres regímenes de flujo):

- Flujo monofásico (líquido subenfriado y vapor sobrecalentado).
- Flujo bifásico (mezcla líquido-vapor).

En el primer caso se utiliza la correlación de Gnielinski [11], que tiene la ventaja de que es válida para un intervalo grande del número de Reynolds. La relación de Gnielinski se complementa con el factor de fricción descrito por Zigrang y Silvester [31]. En el segundo caso, se utiliza la correlación de Gungor y Winterton [32] para flujo bifásico debido a su simplicidad. Una de las ventajas de este modelo es que se puede utilizar para predecir el comportamiento de cualquier fluido de trabajo, tanto monofásico como bifásico.

Radiación

La transferencia de calor por radiación $\dot{q}'_{ij,rad}$, está determinada por la ecuación de Stefan-Boltzmann, para el flujo de calor entre dos cuerpos con emitancia ε_i y temperatura superficial T_i , considerando que en el caso de un objeto pequeño convexo (como el receptor) esta energía térmica se irradia hacia una superficie mucho mayor (el cielo equivalente) [31]-[34], considerando la longitud característica L_c mediante:

$$\dot{q}'_{ij,rad} = \varepsilon_i \sigma L_c (T_i^4 - T_j^4) \quad (27)$$

Para modelar la transferencia de calor por radiación de una superficie a otra dentro de la cavidad, como en el caso del tubo absorbente a la ventana del receptor, la radiosidad y el factor de visión del sistema considerados como un fenómeno de superficie, permite un cálculo simple. Según Siegel y Howell [35], la transferencia de calor por radiación (por unidad de longitud) para cada superficie considerando la radiosidad se determina mediante:

$$q'_{i,rad} = L_i(\varepsilon_i\sigma T_i^4 - (1 - \varepsilon_i)\sum_j J_j F_{i-j}) \quad (28)$$

donde J_i es la radiosidad de la superficie, ε_i es la emitancia, T_i es la temperatura de la superficie y F_{i-j} es el factor de visión.

Conducción

Todos los fenómenos de conducción se modelan mediante:

$$q'_{ij,cond} = L_c k (T_i - T_j) \quad (29)$$

donde k es la conductividad térmica del material.

Absorción de la radiación solar

Los fenómenos de absorción de la radiación solar se consideran como fenómenos de superficie con valores constantes, y pueden estimarse mediante:

$$q'_{3,SolAbs} = \tau_{67}\rho_4\alpha_{23}q'_{in,rec-HCE} \quad (30)$$

$$q'_{4,SolAbs} = \tau_{67}\alpha_{45}q'_{in,rec-HCE} \quad (31)$$

$$q'_{7,SolAbs} = \alpha_{67}q'_{in,rec-HCE} \quad (32)$$

donde τ_{67} es la transmitancia de la cubierta de Pyrex, ρ_4 es la reflectancia del CPC, α_{23} es la absorptancia del tubo absorbedor, α_{45} es la absorptancia del CPC y α_{67} la absorptancia del vidrio Pyrex.

El modelo térmico está conformado por 29 ecuaciones, con 29 incógnitas agrupadas en 7 ecuaciones finales, Ecs. (1)-(7), que están agrupadas en 6 grupos bien definidos:

- Grupo 1: 4 ecuaciones de absorción.
- Grupo 2: 4 ecuaciones de conducción.

- Grupo 3: 6 ecuaciones de convección.
- Grupo 4: 5 ecuaciones de radiación.
- Grupo 5: 3 ecuaciones de radiosidad.
- Grupo 6: 7 ecuaciones de balance, una por nodo.
- Grupo 7: 1 ecuación de balance de energía del fluido.

Validación del modelo

Para validar el modelo y la aplicación de la nueva transferencia de calor en su solución, los parámetros de análisis de Montes, Barbero, Abbas, y Rovira [4] se han probado el modelo y se ha resuelto el sistema de ecuaciones para obtener las temperaturas y los flujos de calor involucrados en el receptor. Una vez realizado el análisis, los resultados se comparan con los mostrados por Montes, Barbero, Abbas, y Rovira [4] y Mertins [36] sobre el campo FRESDEMO. El criterio de validación propuesto es que, para los gráficos reportados de pérdidas de calor, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Pérdidas de calor del mismo orden de magnitud (400 a 1800 W/m).
- La gráfica debe ser congruente con ambos modelos.
- No debe existir una discrepancia mayor al 10%.

Las dos primeras condiciones se evalúan directamente al comparar los datos de los gráficos superpuestos en la Fig. 4, donde se aprecia que los resultados están acotados por ambos modelos. La tercera condición se verifica con las barras de error que se muestran en la Fig. 5, donde se percibe que el error más significativo es al inicio de la zona de calentamiento, aunque no supera un valor superior al 5%, por lo tanto, el valor de la discrepancia en esta zona es aceptado.

Fig. 4. Comparativa de las pérdidas térmicas del modelo [21] contra el modelo de Montes [4] y Mertins [36].

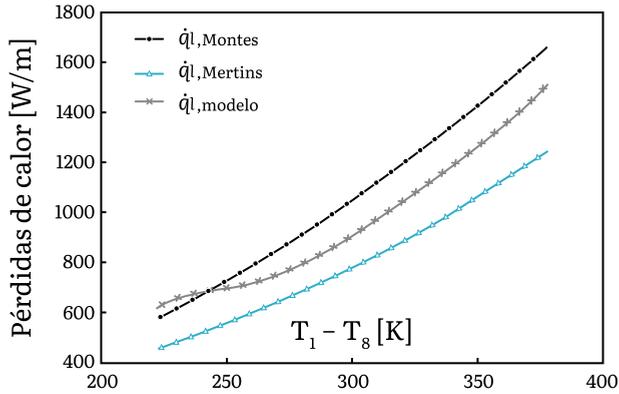
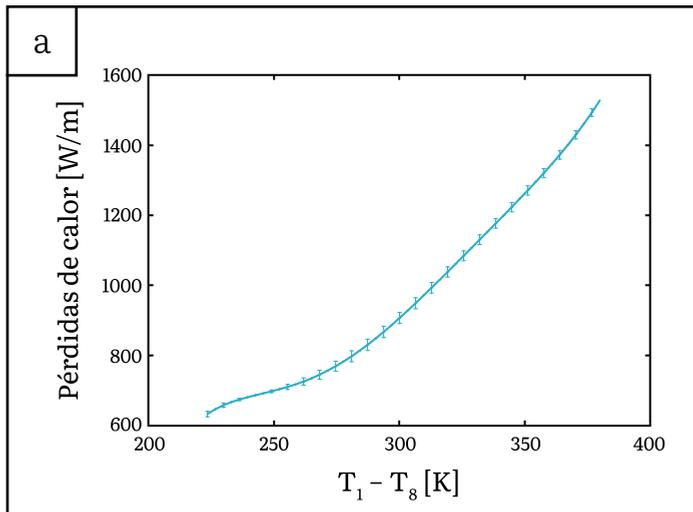
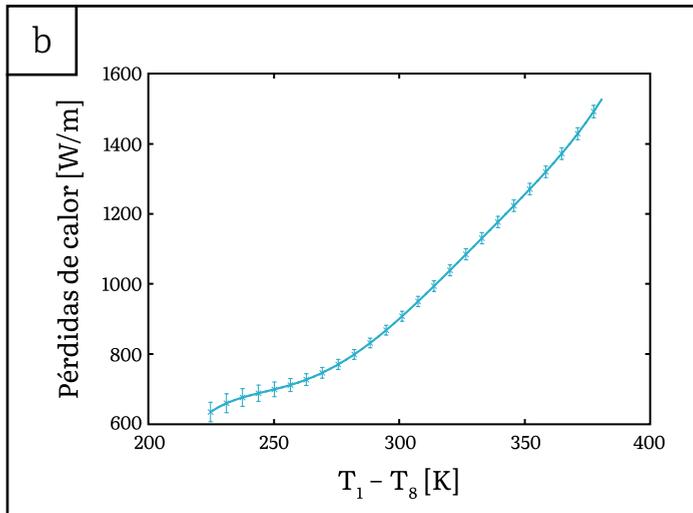


Fig. 5. Barras de error. (a) Comparación con el modelo de Montes [4]; (b) Comparación con el modelo de Mertins [36].





Aplicación del modelo al caso de estudio

Una vez validado el modelo térmico, se procede a aplicarlo directamente al caso de estudio con el objetivo de establecer la longitud de los lazos que conformarán el campo solar. Con la ayuda del *software* Meteonorm [37] es posible establecer las condiciones climatológicas que serán los valores iniciales para iniciar la aplicación del modelo, que se resumen en la Tabla IV para el día del diseño (21 de junio).

Tabla IV. Condiciones de análisis para la ciudad de Agua Prieta, Sonora.

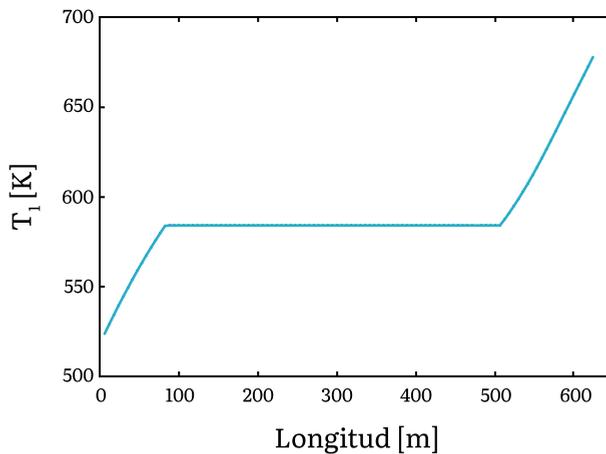
Parámetro	Valor
Día del año	172
Presión atmosférica [bar]	0.886
Temperatura efectiva del cielo [K]	271.95
Temperatura ambiente [K]	300
DNI [W/m^2]	856.48
Velocidad del viento [m/s]	4.1

El modelo térmico se aplica a la simulación de cada HCE que conforma el campo solar que se describió con anterioridad, operando en estado estacionario en un solo paso: precalentamiento, evaporación y sobrecalentamiento. El campo LFR optimizado calentará 12,8 [kg/s] de vapor a 100 [bar]. Se recomienda que los LFR calienten un flujo máximo de 4,5 [kg/s] por lo que el flujo total se divide en tres lazos de 4,27 [kg/s], entrando a 518,3 [K] y saliendo a 673,15 [K], que son valores similares a los adoptados en otras simulaciones [4, 38].

La gráfica de la Fig. 6, muestra el incremento de la temperatura del agua a lo largo del lazo. Se identifica que, para alcanzar la temperatura de 673,15 [K], se requieren 623,5 [m] por lazo; de tal manera que se requieren 1,87 [km] de reflectores Fresnel para calentar todo el flujo másico. La longitud de cada lazo se divide en:

- Precalentamiento: 88,6 [m].
- Evaporación: 423,9 [m].
- Sobrecalentamiento: 111 [m].

Fig. 6. Temperatura del agua/vapor a lo largo de un lazo de reflectores Fresnel [4], [36].



Conclusiones

Con la finalidad de realizar el análisis térmico de un reflector Fresnel en generación directa de vapor, se planteó un modelo unidimensional con la metodología de Adiutori [5]. Esta metodología destaca que Fourier fue quien formuló un primer acercamiento para resolver los problemas de convección, sin embargo, el incluir un coeficiente convectivo h para establecer una proporcionalidad entre flujo de calor y temperatura es innecesario y dificulta la solución de problemas no lineales, porque no hay fundamento para la visión de la ingeniería convencional de que las dimensiones se pueden asignar racionalmente a los números; así como no hay fundamento para la visión de la ingeniería convencional de que las dimensiones se pueden multiplicar y dividir racionalmente.

Estas dos opiniones, concebidas por Fourier y publicadas por primera vez en su tratado de transferencia de calor en 1822 [8] han complicado enormemente la solución de problemas de transferencia de calor con un comportamiento altamente no lineal. Fourier no hizo ningún esfuerzo por probar la validez de estos dos puntos de vista, aunque una valoración crítica de estos dos puntos de vista indica que, de hecho, no son válidos.

El modelo térmico descrito en la Sección 3 se realizó tomando como referencia modelos de transferencia de calor reportados para sistemas Fresnel en generación directa de vapor, como el de Fourier y Freeman [8] y Mertins [12]. Los resultados se validaron con barras de error sobre las gráficas de las pérdidas de calor contra la diferencia de temperatura del fluido de trabajo y el medio ambiente, reportadas por los modelos de marras, en donde el error no supera el 5% para los valores reportados por otros investigadores, como se ha comparado en la Fig. 5.

Así, se observa que el modelo planteado es válido y adecuado para proceder con el análisis de diversas configuraciones de lazo, además de la discutida en la Sección 3.4. El lazo analizado consideró un flujo másico de 4,27 [kg/s]; en el que el agua ingresa a 518,3 [K] y abandona el sistema como vapor sobrecalentado a 673,15 [K]. Así, es posible identificar las zonas de precalentamiento (88,6 [m]),

evaporación (423,9 [m]) y sobrecalentamiento (111 [m]) sobre el lazo del reflector Fresnel.

Al considerar la metodología de Adiutori [5], el modelo térmico puede ser fácilmente adaptado a otros fluidos al cambiar únicamente las propiedades termofísicas de cada fluido, sin necesidad de modificar las funciones de transferencia de calor; esto permite una flexibilidad que no se ha descrito de manera general en otros modelos que permitiría comparar el comportamiento del sistema bajo diferentes regímenes de operación y diferentes fluidos.

Referencias

- [1] G. Morin, “Optimization of concentrating solar power plant designs through integrated techno-economic modelling”, *Concentrating Solar Power Technology*, Elsevier, pp. 545–583, 2021.
- [2] A. Giostri, M. Binotti, P. Silva, E. Macchi, y G. Manzolini, “Comparison of two linear collectors in solar thermal plants: Parabolic trough versus Fresnel”, *Journal Solar Energy Eng*, vol. 135, núm. 1, p. 011001, 2013, doi: 10.1115/1.4006792.
- [3] J. Sun, Q. Liu, y H. Hong, “Numerical study of parabolic-trough direct steam generation loop in recirculation mode: Characteristics, performance and general operation strategy”, *Energy Conversion Manager*, vol. 96, pp. 287–302, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.02.080.
- [4] M. J. Montes, R. Barbero, R. Abbas, y A. Rovira, “Performance model and thermal comparison of different alternatives for the Fresnel single-tube receiver”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 104, pp. 162–175, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.015.
- [5] E. Adiutori, *The New Engineering*, 3a ed. Naples, FL, Ventuno Press, 2017.
- [6] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, y M. B. Bailey, “Fundamentals of Engineering Thermodynamics”, 8a ed. *Hoboken, NJ. Wiley*, 2014.
- [7] A. Bejan, “Advanced Engineering Thermodynamic”, 4a ed. *Hoboken, NJ, Wiley*, 2016.
- [8] J. B. J. Fourier y A. Freeman, “*The Analytical Theory of Heat*”, *Cambridge, Cambridge University Press*, 2009.

- [9] I. Newton, “The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy”, *University of California Press*, 1999.
- [10] H. L. Langhaar, “Dimensional Analysis and Theory of Models”. R.E. *Krieger Publishing Company*, 1987.
- [11] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, y D. P. Dewitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 7a ed. *John Wiley y Sons, Inc.*, 2011.
- [12] P. Breeze, “Solar Power Generation”, 1a ed. *Elsevier*, 2014.
- [13] M. J. Blanco y S. Miller, “Introduction to concentrating solar thermal (CST) technologies”, en *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*, 2017.
- [14] “U.S. Department of Energy”, *Energy.gov*, 2013. <http://energy.gov/eere/energybasics/articles/linear-concentrator-system-basics-concentrating-solar-power/> (consultado el 16 de agosto de 2016).
- [15] S. Karathanasis, Linear Fresnel Reflector Systems for Solar Radiation Concentration: Theoretical Analysis, “Mathematical Formulation and Parameters’ Computation Using MATLAB”, *Springer Nature*, 2019.
- [16] W. J. Platzer, D. Mills, y W. Gardner, “Linear Fresnel Collector (LFC) solar thermal technology”, *Concentrating Solar Power Technology*, Elsevier, pp. 165–217, 2021.
- [17] P. Boito y R. Grena, “Optimization of the geometry of Fresnel linear collectors”, *Solar Energy*, vol. 135, pp. 479–486, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.060>.
- [18] IEA, “Technology Roadmap–Solar Thermal Electricity”, Paris, France, 2014, doi: 10.1007/SpringerReference_7300.
- [19] R. Abbas, M. J. J. Montes, A. Rovira, y J. M. M. Martínez-Val, “Parabolic trough collector or linear Fresnel collector? A comparison of optical features including thermal quality based on commercial solutions”, *Solar Energy*, vol. 124, pp. 198–215, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2015.11.039.
- [20] E. González-Mora y M. D. Durán García, “Methodology for an Opto-Geometric Optimization of a Linear Fresnel Reflector for Direct Steam Generation”, *Energies*, vol. 13, núm. 2, pp. 355, 2020, doi: 10.3390/en13020355.
- [21] E. González-Mora, “Análisis 2E de diferentes configuraciones de plantas solares de generación directa de vapor empleando reflectores Fresnel”, Universidad Autónoma del Estado de México, 2019.

- [22] F. Veynandt, “Cogénération héliothermodynamique avec concentrateur linéaire de Fresnel : modélisation de l’ensemble du procédé”, Université de Toulouse, 2011.
- [23] F. Alhama López, “Análisis dimensional discriminado en mecánica de fluidos y transferencia de calor”, 1a ed. *Reverté*, 2012.
- [24] V. Simon, B. Weigand, y H. Gommaa, “Dimensional Analysis for Engineers”, *Springer International Publishing*, 2017.
- [25] G. D. Raithby y K. G. T. Hollands, “A General Method of Obtaining Approximate Solutions to Laminar and Turbulent Free Convection Problems”, *Advances in Heat Transfer*, vol. 11, pp. 265–315, 1975, doi: 10.1016/S0065-2717(08)70076-5.
- [26] T. H. Kuehn y R. J. Goldstein, “An experimental and theoretical study of natural convection in the annulus between horizontal concentric cylinders”, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 74, núm. 04, p. 695, 1976, doi: 10.1017/S0022112076002012.
- [27] S. W. Churchill y H. H. S. Chu, “Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 18, núm. 9, pp. 1049–1053, 1975, doi: 10.1016/0017-9310(75)90222-7.
- [28] A. Žukauskas, “Heat Transfer from Tubes in Crossflow”, *Advances in Heat Transfer*, vol. 8, pp. 93–160, 1972, doi: 10.1016/S0065-2717(08)70038-8.
- [29] W. H. McAdams, *Heat Transmission*. McGraw-Hill, 1954.
- [30] E. Pohlhausen, “Der Wärmeaustausch zwischen festen Körpern und Flüssigkeiten mit kleiner reibung und kleiner Wärmeleitung”, *ZAMM - J. Appl. Math. Mech. / Zeitschrift für Angew. Math. und Mech.*, vol. 1, núm. 2, pp. 115–121, 1921, doi: 10.1002/zamm.19210010205.
- [31] G. Nellis y S. Klein, “Heat Transfer”, *Cambridge University Press*, 2009.
- [32] K. E. Gungor y R. H. S. Winterton, “A general correlation for flow boiling in tubes and annuli”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 29, núm. 3, pp. 351–358, 1986, doi: 10.1016/0017-9310(86)90205-X.
- [33] A. Bejan, “Heat transfer”. *John Wiley y Sons, Inc.*, 1993.
- [34] J. A. Duffie y W. A. Beckman, “Solar Engineering of Thermal Processes”, 4a ed., *John Wiley y Sons, Inc.*, 2013.
- [35] S. J. R. Howell, M. P. Menguc, y R. Siegel, “Thermal Radiation Heat Transfer”, 6a ed., *Boca Raton: CRC Press*, vol. 92, núm. 1, 2015.

- [36] M. Mertins, “Technische und wirtschaftliche Analyse von horizontalen Fresnel-Kollektoren”, *Universität Karlsruhe*, 2009.
- [37] Meteotest, “Meteonorm”. Meteotest AG, Bern, 2018, <https://www.meteonorm.com/>.
- [38] L. Coco Enríquez, J. Muñoz-Antón, y J. M. Martínez-Val, “Supercritical Steam power cycle for Line-Focus Solar Power Plants Supercritical Steam power cycle for Line-Focus Solar Power Plants”, *Nuclear and Renewable Resources International Conference*, 2014, núm. 1, pp. 2–8, doi: 10.13140/2.1.4031.7769.
- [39] E. Adiutori, “Fourier”, *Mechanical Engineering. The Magazine of ASME*, pp. 30–31, 2005.
- [40] E. Adiutori, “Origins of the Heat Transfer Coefficient”, *Mechanical Engineering. The Magazine of ASME*, pp. 46–50, 1990.
- [41] A. Bejan, “Convection Heat Transfer”, Hoboken, NJ, USA: *John Wiley y Sons, Inc.*, 2013.
- [42] A. Bejan, “Nationalism and forgetfulness in the spreading of thermal sciences”, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 163, p. 106802, 2021, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106802.
- [43] R. B. Bird, W. E. Stewart, y E. N. Lightfoot, “Transport phenomena”, 2a ed. New York: *John Wiley y Sons, Inc.*, 2002.
- [44] G. T. Mase, R. E. Smelser, y J. S. Rossmann, “Continuum Mechanics for Engineers”, *CRC Press*, 2020.

CAPÍTULO VIII

Simulación de la escorrentía e hidrodinámica de una cuenca pequeña utilizando un modelo hidráulico bidimensional

H. Salinas-Tapia, Angélica Lizbeth Álvarez Mejía
y Juan Manuel Becerril Lara

Introducción

La superficie de la tierra está en continuo cambio: valles que crecen y se hacen más profundos o montañas que se elevan son ejemplos de cómo la naturaleza modifica el entorno con el paso del tiempo. Este continuo cambio es consecuencia directa del proceso de la lluvia y el escurrimiento, encargados de modelar y desgastar la superficie de la tierra dando forma al paisaje y al entorno hídrico.

La comprensión del ciclo hidrológico es esencial para poder predecir y gestionar de manera efectiva los recursos hídricos. Sin embargo, la dificultad para obtener datos precisos es una de las limitantes para modelar correctamente los procesos hidrológicos en una cuenca, siendo esto uno de los retos a los que la hidrología se enfrenta como ciencia [1]. Para la ingeniería hidráulica, la estimación de caudales de diseño es un componente básico para la elaboración de cualquier proyecto, donde de manera tradicional es necesario realizar mediciones directas a lo largo del tiempo, convirtiéndose en una tarea extenuante y limitada a proyectos de alta envergadura. Estas particularidades han dado pie al desarrollo de métodos alternativos como la modelación numérica y física, con lo cual se trata de solventar parte de las limitaciones económicas y tecnológicas de los métodos tradicionales [2].

Los modelos numéricos hidráulicos e hidrológicos han sido utilizados y puestos a prueba en la estimación de gastos de diseño, la determinación de la respuesta hidrológica de cuencas, el transporte

de sedimentos, la definición de zonas susceptibles a inundación y de cambios geomorfológicos de los cauces. Sin embargo, una de las limitantes para el estudio de la hidrodinámica en cauces es la falta de datos y la poca confiabilidad de los existentes, por lo que el aporte de este trabajo se centra en mostrar cómo la implementación de técnicas de simulación numérica bidimensional, en conjunto con los SIG, se proyecta como una alternativa viable para estimar la escorrentía superficial de una cuenca, así como la caracterización de las condiciones hidrodinámicas del cauce principal de manera eficiente y con resultados aceptables.

En cuanto a los modelos de simulación numérica, existe una gran variedad de *software* enfocado al análisis de flujo en superficie libre tanto en 1D, 2D y 3D, por ejemplo, IBER 2D, HEC-RAS 1D y 2D, RIVER2D, BRISTARS, RMA-2, FESWMS, SSIM, FLOW 3D, AnsysFluent (3D), OpenFOAM (3D), entre otros. Diferenciándose en el esquema y método de cálculo, escenarios de aplicación y objetivos específicos, con ventajas y desventajas en comparación de los otros [4]. Sin embargo, la mayoría no son de uso libre y acceder a ellos requiere de una inversión económica considerable, por tal motivo, en esta investigación se optó por el uso del modelo IBER. La naturaleza del modelo permite su implementación para el análisis de flujo en lámina libre con un esquema de cálculo que incorpora la resolución de las ecuaciones completas de Saint-Venant, mediante un esquema numérico de volúmenes finitos [3], teniendo presente las fuerzas inerciales, los efectos de la presión hidrostática, esfuerzos por rozamiento y efectos generados por la gravedad. Para la simulación de procesos hidrológicos, el modelo implementa un esquema de discretización hidrológica desacoplada (DHD) que permite resolver las ecuaciones de aguas someras, con una simplificación asociada a los términos inerciales [5].

La simulación de flujo en lámina libre en ríos, la determinación de zonas inundación, el cálculo hidráulico de redes de canales y encauzamientos, el análisis de la calidad de agua en cauces, el análisis del comportamiento del flujo en estructuras hidráulicas, así como el análisis de transporte de sedimentos tanto en suspensión como de fondo y el análisis de erosión y sedimentación son sólo algunos de los campos donde el modelo IBER puede incursionar [3].

Diferentes estudios alrededor del mundo respaldan su aplicación, con una predominancia marcada hacia el análisis y evaluación del riego de inundación, validación y diseño de medidas de protección en cauces, simulación hidrodinámica de cauces naturales, así como la estimación hidrológica de caudales, concluyendo que el modelo es de gran utilidad ya que permite modelar dichos fenómenos con gran exactitud [6-9].

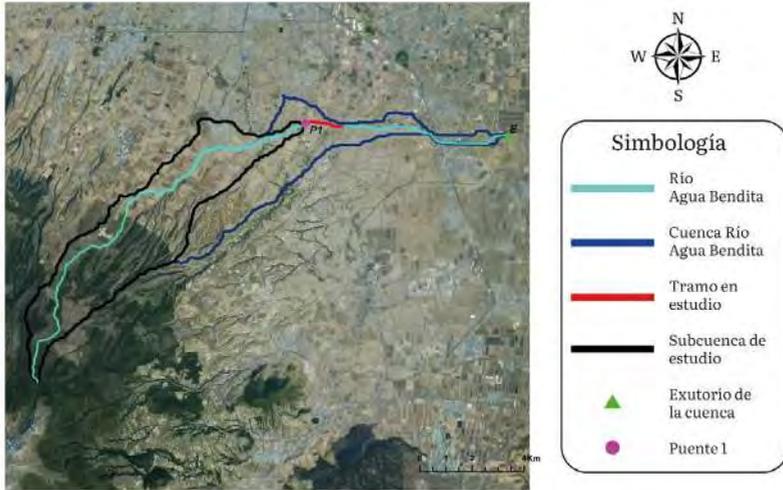
Zona de estudio

El cauce de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrográfica 12 Lerma-Santiago, dentro de la Subcuenca RH12 Almoloya del Río-Otzolotepec. Lleva por nombre arroyo Agua Bendita y nace a una altitud aproximada de 3860 msnm, en los puntos más altos del volcán El Nevado de Toluca, en el Estado de México. Inicia su trayecto en dirección noroeste, rodeando la localidad de San Juan Tilapa en el municipio de Toluca, a una altitud de 2680, msnm llega al municipio de Metepec, rodea el Fraccionamiento Bonanza y cruza la comunidad de San Bartolomé Tlatelulco, para finalmente desembocar en el Río Lerma.

Cuenca Hidrológica del cauce Agua Bendita

La microcuenca tributaria (Fig. 1) al tramo de estudio tiene una extensión aproximada de 27.73 km² y un perímetro de 43.88 km, con una pendiente media aproximada de 20.5% sobre la superficie, con un tiempo de concentración de 1.78 horas en dirección al noroeste. Respecto al río principal, éste cuenta con una longitud de 18.10 kilómetros y una pendiente media de 6.4%.

Fig. 1. Localización de la zona de estudio.



El tramo de cauce en estudio (Fig. 1) cuenta con una longitud de 1.5 km, situando su sección transversal inicial 8 km aguas arriba del exutorio del cauce. La información de precipitación en la zona es registrada por 3 estaciones meteorológicas cercanas al sitio, según la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). La precipitación anual se encuentra entre los 1000 y 1200 mm con temporada de lluvias en los meses comprendidos de mayo-octubre; por el contrario, los meses con menor precipitación se encuentran en el periodo febrero-abril. La Tabla I muestra la información básica de las estaciones que tienen influencia en la zona de estudio.

Tabla. I. Estaciones climatológicas con influencia en la cuenca [10].

Coordenadas geográficas	Ubicación	Nombre	Años Efectivos
19.1186, -99.7814	Zinacantepec	Nevado de Toluca	44.1
19.1983, -99.6483	Calimaya	Zoológico de Zacango	19.1
19.2094, -99.5886	Mexicaltzingo	Mexicaltzingo	36.9

La caracterización topográfica juega un papel importante en este tipo de estudios, ya que rige en gran medida la dirección y cantidad del flujo que emerge en forma de gotas de lluvia hasta llegar al río principal. La topografía de la cuenca en estudio se caracteriza por presentar fuertes pendientes lo cual aumenta en gran medida la capacidad de respuesta hidrológica. La información topográfica donde se encuentra el Arroyo Agua Bendita y sus principales ramales está disponible en dos cartas topográficas del INEGI, siendo éstas la E14A47 y la E14A48.

Así mismo, existe un modelo digital de elevaciones (MDE) de la zona con una resolución de 15 m por 15 m, los valores de elevación en la zona van desde los 3876 y hasta los 2560 msnm [1]. Destacando la importancia y uso de esta información en el desarrollo de la simulación hidrológica para la determinación de la respuesta hidrológica en la cuenca. Por otra parte, uno de los factores más importantes en el estudio de cualquier medio físico es la conceptualización de los efectos antropogénicos a los que ha sido sometido, es por ello por lo que para evaluar este parámetro, el INEGI y el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX) ofrecen distribuciones de los usos de suelos predominantes para cada región.

Específicamente, en la región de la cuenca del arroyo Agua Bendita, 20% se encuentra ocupado por pastizales, 48% está integrado por territorios dedicados a la agricultura, 30% se encuentra ocupado por bosques de pino —particularmente en la zona montañosa— en los puntos más altos, finalmente 2% está integrado por la zona urbana, en la parte baja.

Metodología

Configurar las condiciones iniciales y de contorno en el modelo es un punto clave dentro del proceso de simulación y en donde la calidad y veracidad de la información condiciona, en gran medida, los resultados. La información analizada para la realización de las simulaciones hidrológicas e hidráulicas fue agrupada en 3 categorías: topográfica, hidrológica y sedimentológica.

La caracterización topográfica de la zona fue realizada con la ayuda del MDE del sitio. Dicha información fue representativa para realizar la simulación del proceso de escorrentía en la cuenca, no así para la simulación hidrodinámica en el cauce donde fue necesario realizar un levantamiento batimétrico del cauce para mejorar la resolución en el MDE, permitiendo contar con mayor precisión de las fronteras y sección transversal. La delimitación de la zona de estudio y la preparación de la información relacionada con las características del terreno y del cauce, para configurar el modelo IBER, se realizó utilizando el *software* ArcGIS en su versión 10.3.

Para tener una representación del cauce lo más cerca a la realidad fue necesario incorporar al MDE la información batimétrica obtenida en campo, aumentando así la precisión en el tramo en estudio. Dicho proceso se realizó con la ayuda del *software* ArcGIS 10.3 y sus herramientas automatizadas de modelado 3D.

La Fig. 2 muestra una comparación del MDE obtenido del INEGI y el MDE modificado con la incorporación de la sección del cauce, donde se observa el resultado obtenido mediante un proceso automatizado (Fig. 2a), en contraste con la sección final después de eliminar las imperfecciones generadas por una triangulación automática (Fig. 2b). De este modo se logró obtener a detalle la topografía no sólo de la cuenca sino también del lecho y taludes que componen el cauce a través de la edición de la superficie basada en una red de triángulos irregulares (TIN).

Fig. 2. Procesamiento del Modelo digital de elevaciones de la zona del cauce.
a) Incorporación de los datos del levantamiento topográfico en la sección del río; b) Refinamiento de imperfecciones.



Las superficies TIN son una forma de datos geográficos digitales basadas en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de puntos [11], en este caso, el proceso termina realizando una conversión a formato ráster tipo ASCII para su posterior incorporación al modelo IBER.

El criterio del U.S. Soil Conservation Service (SCS) fue seleccionado para cuantificar las pérdidas por infiltración [10], para ello se obtuvo un número de curva (CN) ponderado en la cuenca de 70.31, requerido por el modelo. Para simular el proceso lluvia-escurrimiento fue necesario determinar la precipitación máxima a 24 horas asociada con diversos periodos de retorno. Se consideraron 3 estaciones que tienen influencia en la cuenca, siendo éstas la Estación Nevado, Zacango y Mexicaltzingo, donde se aplicó el método de los polígonos de Thiessen.

Con los datos de lluvia máxima, en 24 horas se aplicó la función de distribución de probabilidad Gumbel para datos máximos y se obtuvieron las láminas de precipitación en 24 horas asociadas a los periodos de retorno de 2, 5, 10, es decir: $P_{24}^2, P_{24}^5, P_{24}^{10}$. Con los datos resultantes se aplicó el método de Chen para obtener las curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno (IDTr) características de la zona. El análisis se realizó utilizando la herramienta computacional HIDESTAD VER 3.0 desarrollada por el Cuerpo Académico de Hidrología del IITCA-UAEMEX [12]. En la Tabla II se presenta la precipitación máxima diaria anual asociada a diferentes periodos de retorno.

Tabla. II. Precitaciones máximas diarias anuales.

Probabilidad	Tr	Precipitación	Límite Inferior	Límite superior
0.5	2	31.926	28.120	36.732
0.8	5	43.286	36.876	49.695
0.9	10	50.807	42.149	59.464
0.95	20	58.021	47.085	68.957
0.98	50	67.359	53.392	81.326
0.99	100	74.357	58.086	90.628

Para una mejor simulación del comportamiento del flujo se estimó la distribución temporal de la lluvia, con lo que se obtuvieron hietogramas de precipitación que fueron uno de los principales parámetros en la simulación del proceso de lluvia-escorrimento dentro del Modelo IBER.

La distribución de la lluvia a lo largo de la duración de cada uno de los eventos para cada periodo de retorno se realizó aplicando la metodología del hietograma simétrico. El intervalo entre los tiempos de lluvia fue de 10 minutos: la intensidad y precipitación fueron calculadas con las lecturas de las curvas IDTr.

Por otra parte, para asignar el coeficiente de rugosidad de Manning del cauce y de la cuenca se consideran los usos de suelo: agricultura, pastizal, bosque, taludes sin vegetación (TSV), taludes con vegetación media (TVM), taludes con vegetación alta (TVA), zona urbana, zona de enrocado, concreto y lecho del río. La distribución se realizó en ArcGIS10.3, con lo que se asignaron los valores de rugosidad y se creó un archivo tipo ráster con la información propuesta, con ello se asignó automáticamente este parámetro en el modelo de simulación IBER.

Simulación

La finalidad del trabajo es la simulación de la respuesta hidrológica de una cuenca pequeña y el tránsito hidráulico sobre un tramo de su cauce principal. Para este fin, se eligió al modelo hidrodinámico bidimensional IBER, ya que permite simular los procesos descritos, además, es de acceso libre.

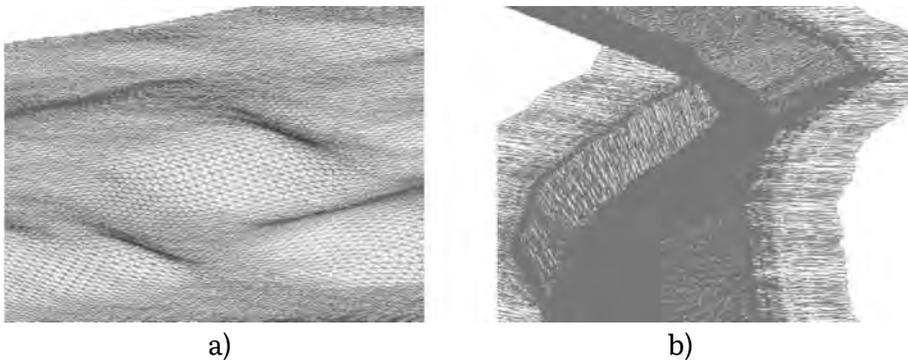
El flujo de trabajo se dividió en dos fases principales. La fase I consistió en la simulación de los procesos hidrológicos con la finalidad de obtener las respuestas hidrológicas de la cuenca correspondientes a los periodos de retorno de 2,5 y 10 años. La fase II se enfocó en simular el tránsito de los hidrogramas obtenidos en la fase I sobre un tramo del cauce principal de la cuenca, con la finalidad de caracterizar el comportamiento hidrodinámico para cada uno de los periodos de retorno analizados.

Las simulaciones con IBER constan de tres etapas denominadas preproceso, proceso y postproceso. La etapa de preproceso tiene como principal objetivo la conceptualización de la problemática, de ésta dependen en gran medida los resultados, por ello requiere un análisis riguroso de 3 rubros: modelo geométrico, proceso de mallaado y datos de entrada.

En el modelo geométrico la elevación se asignó mediante la importación del MDE. Las elevaciones en la cuenca fueron adquiridas gracias al MDE original extraído del INEGI, correspondiente a las simulaciones de escorrentía en la cuenca, donde la superficie generada corresponde al parteaguas de la cuenca. Simular la hidrodinámica del cauce corresponde a la sección del arroyo por zonas, dado que las características del mallado y asignación de parámetros son variables, el arroyo se dividió generando secciones que contenían los taludes del cauce, fondo y obras presentes a lo largo del tramo.

La generación de la malla es un punto importante. Debido a la topografía del terreno se optó por utilizar una malla no estructurada ya que es la que mejor representa terrenos irregulares. La elevación se asignó mediante la importación del MDE antes generado. En la Fig. 3 se observa la malla de cálculo originada y adaptada al MDE en la cuenca y en el lecho del río respectivamente incluyendo las elevaciones obtenidas en el levantamiento topográfico.

Fig. 3. Malla de cálculo. a) Malla de la cuenca; b) Malla en el cauce.



Datos de entrada al modelo IBER

Para la simulación del proceso hidrológico se conceptualizaron tres escenarios mediante los cuales se obtuvo la respuesta de la microcuenca de análisis. Los hidrogramas obtenidos establecieron las condiciones de entrada para la simulación hidrodinámica del cauce. Para configurar el modelo de simulación se importó al modelo IBER la información procesada en ArcGIS10.3, donde se definieron las secciones transversales y características del cauce, además se realizó una discretización por zonas homogéneas con la finalidad de mejorar la calidad del mallado y asignación de los parámetros específicos tales como tipo de entrada, salida y coeficientes de rugosidad en función de los usos del suelo en cada una de las zonas delimitadas. Se estableció como condición de salida 2D en los elementos de la malla que forman parte del exutorio de la cuenca y sobre los cuales se estimó el caudal de descarga.

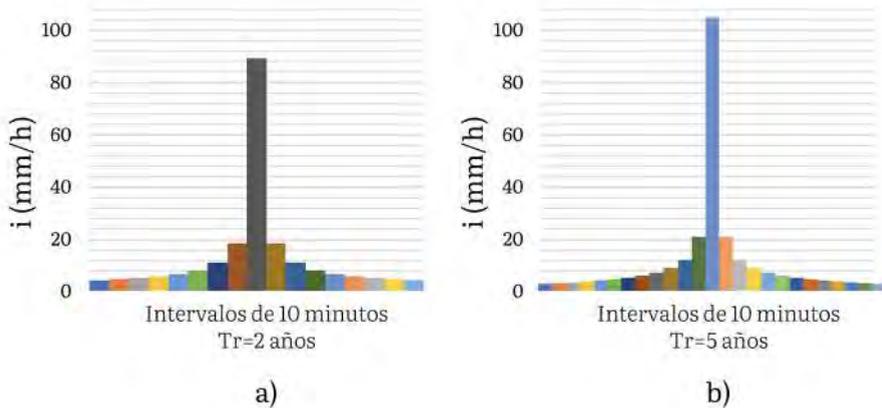
Los hietogramas de intensidad de lluvia en cada periodo de retorno establecieron las condiciones de entrada para las simulaciones hidrológicas (Fig. 4), en conjunto con la distribución espacial del número de curva (CN) para la conceptualización de pérdidas por infiltración.

El manejo y discretización espacial de los usos de suelos se realizó en ArcGIS10.3, facilitando su definición de forma automática en el modelo IBER.

Con respecto a la segunda etapa, correspondiente a la simulación hidrodinámica del cauce, fue necesario incorporar diferentes condiciones de contorno representativas del análisis. Primero se incorporó una condición de Entrada 2D correspondiente al hidrograma generado por la simulación del proceso hidrológico en la microcuenca y el cual representó la avenida a transitar por la sección del cauce, seguido a ello se ingresó una condición de Salida 2D sobre los elementos que limitan la sección transversal al final del cauce. Finalmente se asignaron los valores de rugosidad de forma automática, importando la información previamente tratada en función de los usos de suelo, resaltando que dichas condiciones fueron clave para obtener resultados aceptables.

Los hietogramas de intensidad de lluvia se obtuvieron para la microcuenca correspondiente en intervalos de 10 minutos y periodos de retorno de 2 y 5 años, aplicando la metodología del hietograma simétrico [12] (Fig. 4).

Fig. 4. Hietogramas de intensidad de lluvia. a) $Tr=2$ años; b) $Tr=5$ años.



Resultados y discusión

Los resultados para la simulación de la respuesta hidrológica de la cuenca y la caracterización del comportamiento hidrodinámico en el tramo del cauce analizado, muestran cómo el modelo IBER es una herramienta con grandes capacidades de análisis y aplicación.

Para el caso de estudio, la simulación hidrológica de la cuenca permitió analizar a lo largo del tiempo cómo es el transporte del flujo en superficie y la formación de las principales corrientes (Fig. 5). Dichos comportamientos dependen directamente de la topográfica del sitio, de la composición temporal del hietograma de intensidad de lluvia y de su interacción con el criterio de pérdidas durante el proceso lluvia escurrimiento. Teniendo como resultado final la respuesta hidrológica en la cuenca tributaria al tramo de estudio para diferentes periodos de retorno, así como el comportamiento de la

formación de la red de drenaje en la microcuenca. Esto demuestra la importancia de la configuración de los modelos numéricos y resalta la utilidad de la combinación del uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con la simulación hidrológica.

Fig. 5. Simulación del Proceso Lluvia – Esguerrimiento evento asociado a un $T_r = 10$ Años. a) $t=4.0$ h; b) $t=5.0$ h; c) $t=6.0$ h; d) $t=7.0$ h.

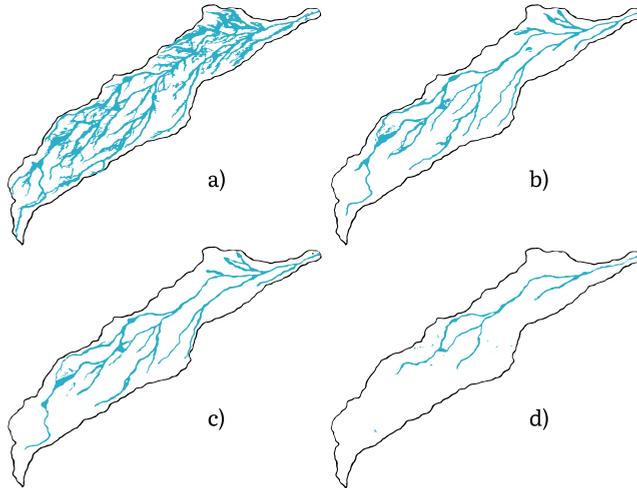
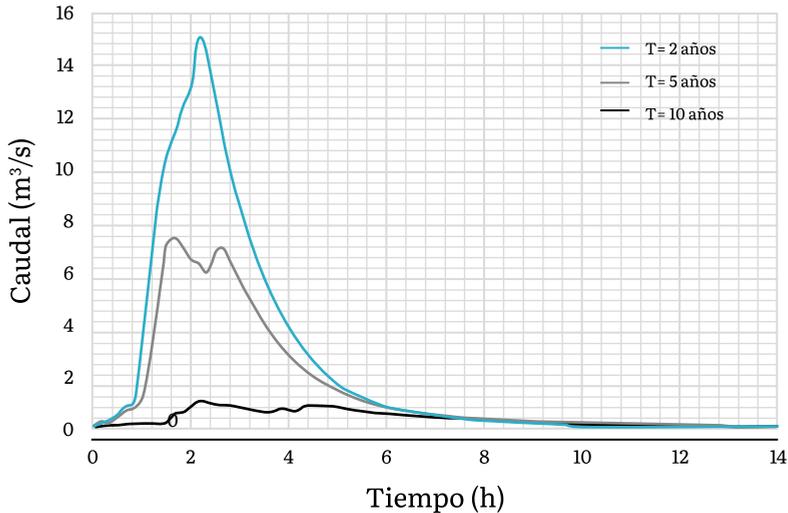


Tabla III. Comparación de caudales máximos por diferentes métodos.

Parámetro	Qp (m ³ /s)		
	Triangular scs	IBER	Snyder
2 años	4.2	1.1	1.5
5 años	13.4	7.4	4.7
10 años	21.7	15.0	7.6

Fig. 6. Hidrogramas de salida en la cuenca tributaria.



Para el análisis de resultados de la simulación hidrodinámica del cauce se dividió el tramo de estudio en cuatro zonas, para la selección de dichas zonas se valoraron las afecciones presentes y las estructuras hidráulicas cercanas o existentes. Los resultados de la simulación se analizaron para diferentes periodos de retorno ($Tr=2, 5$ y 10 años), donde se obtuvieron los tirantes, la velocidad y las tensiones de fondo alcanzadas, como resultados relevantes para realizar el análisis en cada una de las zonas. En la Fig. 7 se muestra el comportamiento de la altura del agua para un gasto de $7.4 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente al periodo de retorno de 5 años, y se observa que los valores del tirante oscilan entre 0.15 a 1.32 m siendo la zona C donde se presentan los valores más altos.

Por otra parte, los valores de velocidades máximas se ubican en las zonas A y D con valores de 4.2 y 4.8 m/s respectivamente, atribuidos a las condiciones geométricas de la sección transversal y longitudinal del cauce. Este comportamiento hidrodinámico se encuentra relacionado con el incremento de los valores en la tensión de fondo del cauce para este periodo de retorno (5 años). Los valores de tensión

de fondo sufrieron incrementos sustanciales en las diferentes zonas analizadas tal como se muestra en la Fig. 8. Para este caso, en la zona A, B y C los valores se encuentran entre 33 y 166 N/m², caso distinto para la D donde las tensiones de fondo máximas escalaron hasta los 299 N/m², lo cual es un indicativo de erosión en el cauce.

Fig. 7. Tirantes máximos para el periodo de retorno de 5 años:
a) Zona "A"; b) Zona "B"; c) Zona "C"; d) Zona "D".



Fig. 8. Tensión máxima de Fondo
a) Zona "A"; b) Zona "B"; c) Zona "C"; d) Zona "D".



El presente estudio comprueba, al igual que los estudios realizados [2, 3, 4], que los resultados de la simulación numérica reproducen satisfactoriamente procesos hidrológicos e hidrodinámicos. Sin embargo, el tratamiento de la información inicial condiciona la precisión de los resultados y en donde los SIG juegan un papel importante.

Además, el uso de MDE con mayor resolución permite una mejor representación del medio físico potenciando la precisión de los resultados mediante los modelos de simulación, sin embargo, debe tenerse en cuenta la capacidad de cómputo demandada en contraste con el nivel de precisión requerido en el análisis a realizar. Es así como la simulación numérica es una herramienta importante en el ámbito de la ingeniería, ya que reduce los costos y permite eficientar la solución de problemas relacionados con los recursos hídricos.

Conclusiones

Los hidrogramas obtenidos mediante el modelo hidráulico bidimensional resultan ser de gran utilidad ya que aportan una distribución espacial y temporal del escurrimiento considerando intensidades de lluvia en toda la cuenca, observando que los caudales pico obtenidos presentan valores cercanos a los obtenidos mediante hidrogramas sintéticos.

El modelo IBER demostró ser un *software* flexible, eficiente y económico que permite el análisis de los procesos de interceptación, distribución, infiltración y escurrimiento superficial en una microcuenca. Destacamos que los caudales pico obtenidos son cercanos a los obtenidos mediante métodos teóricos existentes.

Las simulaciones del caudal en el cauce para periodos de retorno $Tr=2, 5$ y 10 años permitió determinar la Tensión de Fondo en cuatro zonas fácilmente identificables a lo largo del tramo del cauce, resultando que el modelo bidimensional IBER en conjunto con los SIG, así como los MDE, pueden ser aplicables en distintas fases del diseño, siendo capaz de abordar problemas de carácter hidráulico e hidrológico.

Referencias

- [1] F. Javier. Aparicio Mijares, “Fundamentos de hidrología de superficie”, 1989, <https://pdfcoffee.com/fundamentos-de-hidrologia-de-superficie-aparicio-9-pdf-free.html>.
- [2] D. F. Campos Aranda, “Procesos del ciclo hidrológico”, UASLP. San Luis Potosí, México, p. 20, 1998, https://books.google.com/books/about/Procesos_del_ciclo_hidrol%C3%B3gico.html?hl=es&id=tkUYqd0Aac8C.
- [3] E. Bladé et al., “Iber — River modelling simulation tool”, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 30, núm. 1, pp. 1–10, 2014, doi: 10.1016/J.RIMNI.2012.07.004.
- [4] R. Moussa y B. Cheviron, “Modeling of floods—state of the art and research challenges”, *GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences*, pp. 169–192, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-17719-9_7/FIGURES/7.
- [5] L. Cea y E. Bladé, “A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications”, *Water Resour Res*, vol. 51, núm. 7, pp. 5464–5486, 2015, doi: 10.1002/2014WR016547.
- [6] R. Roblero, “Modelación hidrometeorológica de áreas con riesgos de inundación en la cuenca del río la Sierra, en los estados Chiapas y Tabasco”, Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México, México, 2013. <https://llibrary.co/document/wq2mlk6y-mo-delacion-hidrometeorologica-riesgos-inundacion-sierra-chiapas-tabasco-mexico.html>.
- [7] I. Fraga, L. Cea, J. Puertas, J. Piñeiro, I. Maestro, y E. Calvo, “Diseño de soluciones de protección frente a avenidas mediante modelización numérica bidimensional”, *Confederación Hidrográfica*, La Coruña, España, 2007. <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2011/pdf/p559.pdf015>.
- [8] I. Juárez D., M. L. Arganis J., R. Domínguez, G. Esquivel G, M., E., Bladé, J. Dolz, M. Sánchez, H. Sánchez, y G. Corestein, “Comparación del hidrograma de salida de una cuenca con un modelo Hidráulico y un modelo distribuido”, *XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*, Puerto Vallarta, Jalisco, México, 2014.
- [9] M. van Kreveland, “Digital elevation models and TIN algorithms”, pp. 37–78, 1997, doi: 10.1007/3-540-63818-0_3.

- [10] V. T. Chow, D. Maidment, y L. Mays, “Applied Hydrology”, E.E.U.U., Mc-Graw- Hill, 1988.
- [11] K. M. Bâ, C. Díaz-Delgado, F. Magaña-Hernandez, y H. Salinas-Tapia, “Avances en el análisis de frecuencia de valores extremos en hidrología: software y caso de estudio”, en *Avances en ciencia del agua*, C. Fall, Ed., 2015, pp. 313–337, http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/65416/L_568_6-split-merge.pdf?sequence=4&isAllowed=y.
- [12] H. Salinas-Tapia, A. L. Alvarez-Mejía, J. M. Becerril-Lara, J. A. García-Aragón, B. M. López-Rabollar, y M. Narvaez-Saucedo, “Estimación de zonas de alto riesgo erosivo en ríos pequeños, utilizando un modelo hidráulico bidimensional”, *xxviii Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Buenos Aires, Argentina, sep. 2018, pp. 1–2, https://www.ina.gov.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_440.pdf.

CAPÍTULO IX

Estimación del rendimiento hídrico y su contribución a la recarga potencial del agua subterránea con el modelo hidrológico Seasonal Water Yield en una subcuenca del Acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro

Guillermo Hervis Granda, Miguel Ángel Gómez Albores, José Luis Expósito Castillo, Carolina M. Medina Rivas, Carlos Roberto Fonseca y Ricardo Arévalo-Mejía

Introducción

A nivel mundial, 2.2 miles de millones de personas (31.5% de la población mundial) dependen exclusivamente de los recursos de aguas subterráneas [1]. En México, el 39.1% del volumen total concesionado para usos consuntivos procede de agua subterránea [2] y se reportan 105 acuíferos sobreexplotados [2], [3]. Uno de éstos es el Acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro (AVSJR) que desde 1949 se encuentra en veda para el aprovechamiento del agua subterránea.

En el Acuífero Valle de San Juan del Río, el agua subterránea constituye la fuente principal para el abastecimiento de agua potable de 426,600 habitantes [2]. Los escurrimientos superficiales de las zonas, en general, son intermitentes, lo que implica que la única fuente de abastecimiento permanente segura sea el agua subterránea del acuífero, que presenta un déficit de 136.3 hm^3 [2], [4]. Un método de comprobada eficacia para evaluar la disponibilidad de recursos hídricos regionales consiste en la estimación del rendimiento hídrico, definido como la diferencia entre la precipitación recibida (P) y la evapotranspiración (ET), que está en función de diversos factores como el clima, el uso del suelo y la cobertura de la tierra (ucs) [5].

Debido a la variabilidad de factores como el clima, el conocimiento de la evaluación cuantitativa y la visualización de la distribución espacial del rendimiento hídrico en zonas áridas, en donde se presentan problemas de escasez de agua y dificultades para una buena gestión de los recursos hídricos, constituye una gran herramienta para comprender las tendencias de la disponibilidad de suministro de agua [6], [7].

Los modelos hidrológicos juegan un papel importante en la evaluación del rendimiento hídrico actual y futuro, ya que pueden estimar y simular la distribución [8] espacial de los componentes de los flujos superficiales para diferentes condiciones y ayudan a obtener información relevante sobre los aspectos hidrológicos y ambientales de las cuencas hidrográficas [9]. Por lo tanto, contribuyen a una comprensión sistematizada del funcionamiento de los subsistemas de cuencas [10], apoyando a la toma de decisión en la gestión integrada de los recursos hídricos.

A partir de la modelación hidrológica, esta investigación pretende simular el comportamiento de los escurrimientos medios mensuales de la subcuenca del río Prieto en la zona sur del AVSJR en el periodo 1975-1980, como vía para aproximarse a la cuantificación del rendimiento hídrico y su contribución a la recarga del agua subterránea y validar la viabilidad de la aplicación del modelo hidrológico para su utilización como herramienta para las condiciones edafoclimáticas de la zona.

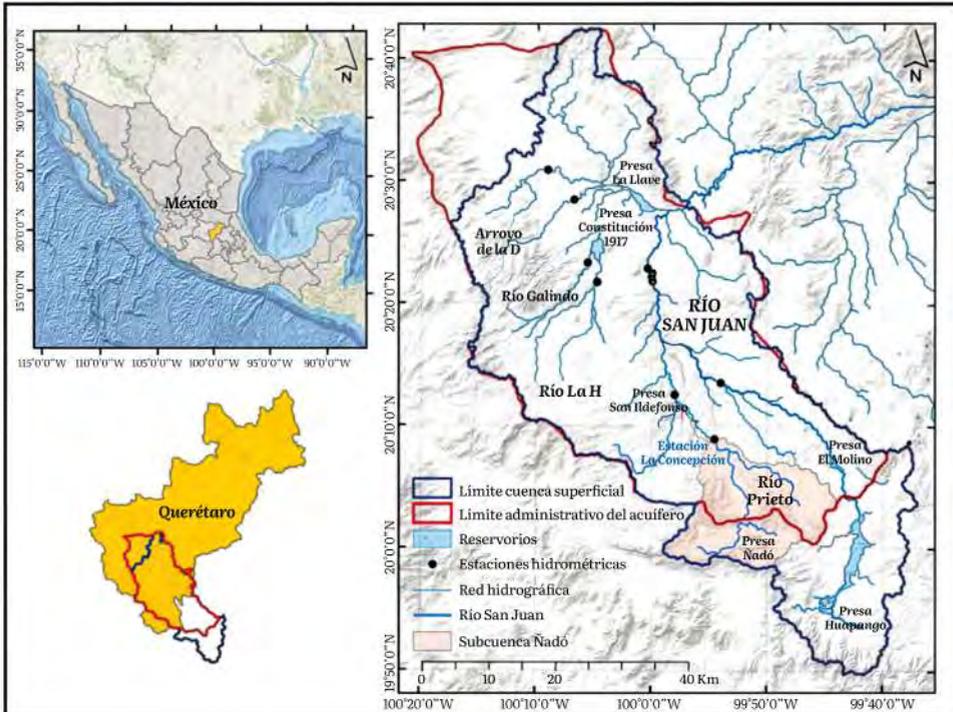
Metodología

Descripción del área de estudio

La cuenca del Valle de San Juan del Río se localiza en la porción sur del Estado de Querétaro (Fig. 1). Fisiográficamente está limitado por un parteaguas continental en su porción occidental que lo cruza en dirección norte-sur [11] y cuenta con una superficie aproximada de 2,735 km². Administrativamente, el área de estudio se enmarca en la Región Hidrológico-Administrativa golfo-norte [11] y en la región hidrológica No. xxvi Cuenca del río Pánuco. El clima predominante en

la zona, según la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García, es semiseco templado y templado subhúmedo donde el de mayor predominio es el semiseco templado (BS, K) [12].

Fig. 1. Localización de la región de estudio. Valle de San Juan del Río.



La Fig. 1 muestra la subcuenca alta del río Prieto, para ilustrar parte del proceso de modelación del rendimiento hídrico y mostrar la validez del modelo en la representación de los procesos de balance hídrico en la región. Esta área se encuentra en la porción montañosa sur del Acuífero de San Juan del Río, se divide en una porción que comprende 122.5 km² desde el nacimiento del río hasta su cierre en la presa Ñadó, y otra que comprende 185 km² y se extiende hasta la estación hidrométrica La Concepción.

Desarrollo teórico del modelo Seasonal Water Yield

El modelo se basa en un balance hídrico simplificado en la escala de píxeles. Considerando la hipótesis de que el rendimiento hídrico puede aproximarse a la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, teniendo en cuenta las propiedades del suelo para almacenar agua.

Las variables de entrada del ciclo hidrológico se consideran con una escala temporal mensual, haciendo posible la estimación de los flujos estacionales, y la determinación del flujo rápido o escorrentía superficial (QF), el flujo base real ($Bsum$) y el flujo de recarga local por precipitación o flujo base potencial (L) [13].

En función de las propiedades de la cobertura y las características del suelo, una determinada porción de la lluvia que cae puede escurrir rápidamente, generando un flujo rápido, que va a desembocar en los arroyos y ríos, en lugar de infiltrarse en el suelo y producir una recarga local.

La lámina de escurrimiento superficial o flujo rápido (QF), en milímetros, se calcula con un enfoque basado en el Número de la Curva (CN) [14]:

$$QF_{i,m} = n_{i,m}^* \left((a_{i,m} - S_i) \exp\left(-\frac{0.2S_i}{a_{i,m}}\right) + \frac{S_i^2}{a_{i,m}} \exp\left(\frac{0.8S_i}{a_{i,m}}\right) E_1\left(\frac{S_i}{a_{i,m}}\right) \right) * 25.4 \quad (1)$$

donde $a_{i,m}$ es la lámina media [in] del evento de lluvia en un día con lluvia en el píxel i en el mes m (Ec. (2)), S_i es un parámetro que expresa la capacidad potencial de lluvia [in] que puede retener el suelo y depende el número de la curva (Ec. (3)), E_1 es la función integral exponencial función del tiempo t .

$$a_{i,m} = \frac{n_{i,m}}{P_{i,m}} * 25.4 \quad (2)$$

$$S_i = \frac{1000}{CN_i} \quad (3)$$

$n_{i,m}$ se refiere a los eventos de lluvia dado el píxel i , mes m , $P_{i,m}$ lámina de lluvia por mes [mm], CN_i es el número de curva en función del UCS local así como del tipo de suelo [14].

La contribución potencial de cada píxel a la Recarga local (L) (Ec. (4)) se calcula a partir del balance hídrico local a escala anual, utilizando los valores de disponibilidad de agua mensual:

$$L_i = P_i - QF_i - ATE_i \quad (4)$$

donde, P_i es la precipitación anual [mm], QF_i es el escurrimiento superficial [mm] y ATE_i es la evapotranspiración real [mm]; en todos los casos del píxel i .

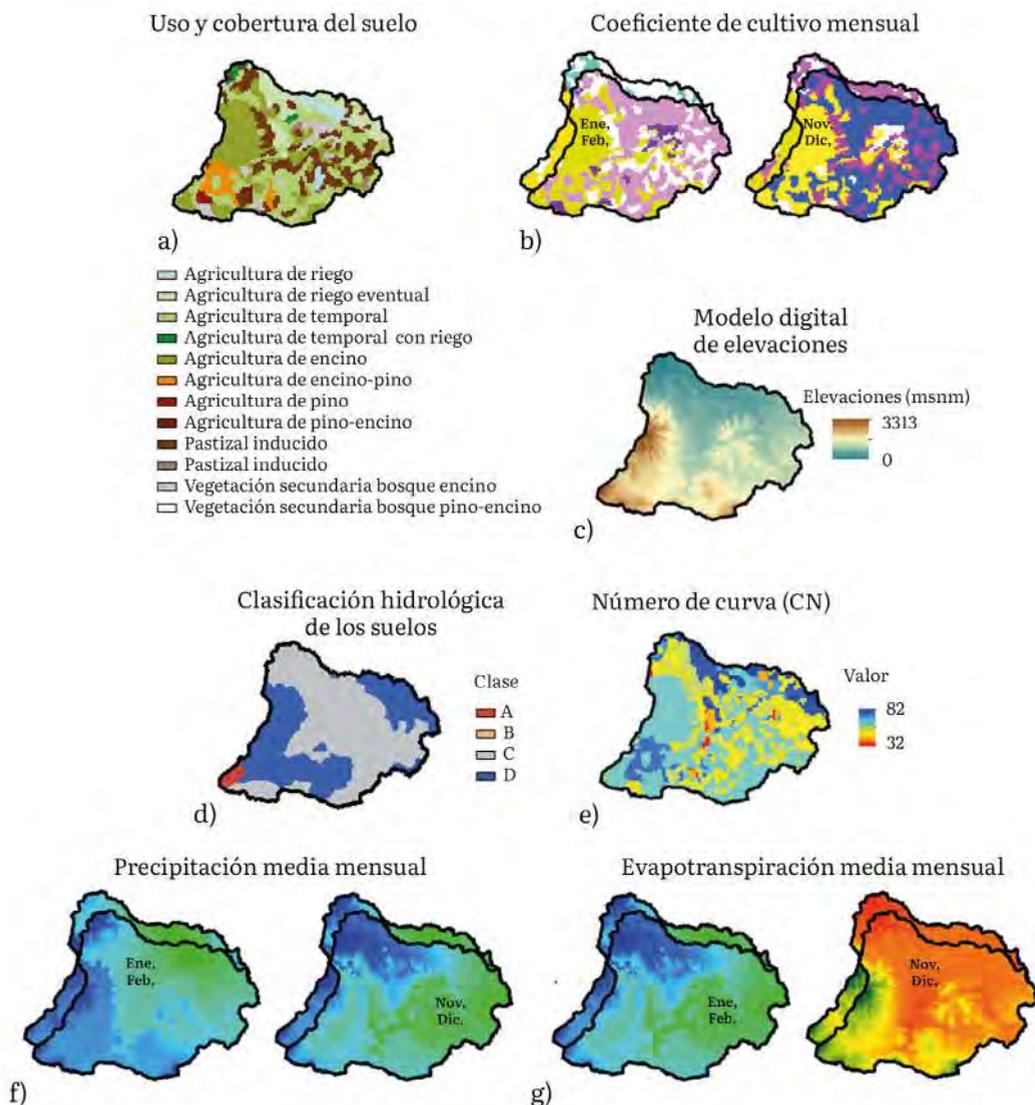
Estimación del rendimiento hídrico

La estimación del rendimiento hídrico se realizó a partir de las corridas del modelo hidrológico InVEST Seasonal Water Yield, considerando las variables de entrada que se dividen en espaciales y alfanuméricas (Fig. 2).

Se eligió el periodo 1975-1980 en función de la disponibilidad de datos hidrométricos para la calibración y de la información de uso y cobertura del suelo. Las imágenes mensuales de precipitación, temperatura máxima y mínima para la región fueron descargadas del *Centro de Recursos Idrisi-México* a una resolución espacial de 30 arcos de segundo (~1 km) [15]. La evapotranspiración de referencia mensual (ET_o) se estimó a partir de la ecuación de *Hargreaves modificada*, que considera la temperatura máxima y mínima y la radiación solar extraterrestre. Se consideró para el periodo 1975-1980 la precipitación y evapotranspiración mensual del periodo como el promedio de las imágenes mensuales de cada año.

El modelo digital de elevaciones fue descargado de la página del Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR) [16] con una resolución de 9 arcos de segundo. El uso y cobertura del suelo fue extraído del Geoportal de la CONABIO (Serie I: 1980-1991) [17] con una escala de 1:25000. La agrupación de los suelos en clases hidrológicas, considerando el enfoque del método de cálculo del método de la Curva Número (Tabla I), se generó con base a la información base de edafología.

Fig. 2. Capas de entrada para estimar el rendimiento hídrico estacional:
 a) Clases de uso y cobertura del suelo; b) Coeficiente de cultivo mensual;
 c) Modelo digital de elevaciones; d) Clasificación hidrológica de los suelos;
 e) Número de la curva; f) Precipitación media mensual;
 g) Evapotranspiración de referencia mensual [20].



La información alfanumérica necesaria para la aplicación del método se requiere en forma de tablas con parámetros biofísicos, eventos de lluvia y parámetros del modelo, que posteriormente son convertidos en imágenes raster por el modelo.

Los valores del Número de la Curva (CN) para cada clasificación hidrológica de los suelos, en función de la clasificación hidrológica de los suelos y los valores del coeficiente de cultivo mensual (Kc) para los diferentes usos y cobertura del suelo, fueron establecidos considerando la información disponible en la literatura científica base de estos parámetros [14], [18], [19]. Para establecer el número de eventos de precipitación en el periodo fueron revisados los registros diarios de precipitación por mes, buscando el número medio de eventos de lluvias ocurridos, considerando que un evento de lluvia se define como una precipitación mayor a 0.1mm.

Tabla I. Criterios para la consideración de las clases hidrológicas del método de la Curva Número según su textura y potencial de escurrimiento de los suelos [20].

Clase	Textura	Potencial de escurrimiento
A	Más de 90% de arena y menos de 10% de arcilla	Bajo
B	Entre 10-20% de arcilla y 50 a 90% de arena	Moderadamente bajo
C	Entre 20-40% de arcilla y menos de 50% de arena	Moderadamente alto
D	Más de 40% de arcilla y menos de 50% de arena	Alto

Calibración del modelo

Se comparó el escurrimiento superficial mensual simulado por el modelo SWY con los valores observados hasta la ubicación de la estación hidrométrica La Concepción en el periodo analizado. Se realizó el ajuste de los parámetros del modelo hasta lograr una correcta aproximación entre los valores simulados y observados, considerando el rango de valores de los parámetros y su interpretación en términos físicos, como se presenta en la Tabla II.

Para evaluar el grado de similitud entre el rendimiento hídrico simulado y observado en el periodo de calibración se evaluaron los índices de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), sesgo o desviación relativa (PBIAS) y desviación estándar (RSR) presentados en la Tabla III.

Tabla II. Parámetros del modelo Seasonal Water Yield para calibración [20].

Parámetro	Descripción	Valor por defecto	Rango de valores
α_m	Fracción de recarga anual media	1/12	$\sum \alpha_m = 1$
β_i	Porcentaje de subsidio agua, caracteriza el flujo subsuperficial	1	0-1
γ	Fracción de la recarga del píxel	1	0-1
CN	Número de curva	-	0-1000
Kc	Coefficiente de cultivo mensual	-	0-1

Tabla III. Interpretación cualitativa de los parámetros estadísticos para calibración y validación [21].

PBIAS	NSE	RSR	Interpretación cualitativas
PBIAS < ±10	0.75 < NSE < 1.0	0.00 < RSR < 0.50	Muy Bueno
±10 < PBIAS < ±15	0.65 < NSE < 0.75	0.50 < RSR < 0.60	Bueno
±15 < PBIAS < ±25	0.50 < NSE < 0.65	0.60 < RSR < 0.70	Satisfactorio
PBIAS > ±25	NSE < 0.50	RSR > 0.70	No satisfactorio

Resultados y discusión

La comparación de los volúmenes de escurrimiento observados y modelados por Seasonal Water Yield para la subcuenca analizada se presenta en la Tabla IV, apoyada de la Fig. 3a que muestra las diferencias mensuales entre los volúmenes. Puede observarse que existen diferencias puntuales entre los valores observados a nivel mensual, que resultan poco significativos en los meses del periodo seco del año

(0.87 hm³/periodo, lo que representa una sobrestimación del 45.5% del volumen real que se produce en el periodo).

En todos los meses, excepto noviembre, la respuesta del modelo con los parámetros calibrados supera los volúmenes promedio observados en el cierre de la subcuenca por la estación hidrométrica.

En los meses del periodo húmedo se evidencia una sobrestimación de los volúmenes medios mensuales, de los meses de mayo y octubre, que ascienden a 1.44 y 0.94 hm³ de agua más que los observados en la región para los respectivos meses.

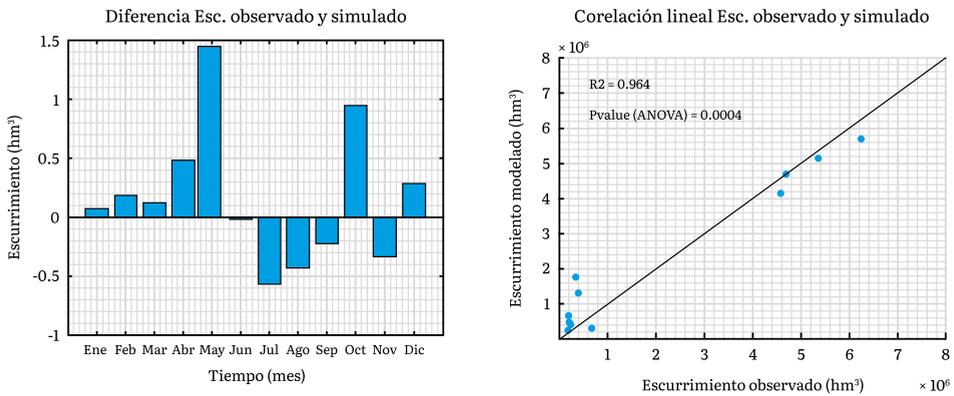
Tabla IV. Resumen de los escurrimientos medios mensuales observados y modelados por Seasonal [22].
Water Yield en el periodo 1975-1980.

	observado (hm ³)	Qmodelado (hm ³)
Enero	0.203	0.294
Febrero	0.222	0.424
Marzo	0.148	0.281
Abril	0.186	0.678
Mayo	0.341	1.787
Junio	4.700	4.685
Julio	6.240	5.678
Agosto	4.570	4.149
Septiembre	5.357	5.137
Octubre	0.388	1.336
Noviembre	0.663	0.335
Diciembre	0.203	0.499
Acumulado	23.222	25.285

En los meses de junio a septiembre se subestiman los volúmenes medios observados en más de 1.21 hm³, destaca el mes de julio donde la diferencia asciende a más de 0.56 hm³. Representándose para estos meses por el modelo el 94.6% de los volúmenes medios observados hasta el cierre.

Los resultados del índice NSE (0.126), $Sesgo$ (-0.692) y RSR (0.984) indican que el modelo calibrado representa correctamente los volúmenes mensuales observados, evaluándose cualitativamente como bueno para todos los índices estadísticos, de acuerdo con los criterios de la literatura sobre este tema [20]. Del análisis del índice $PBIAS$ puede concluirse que el modelo hidrológico con los parámetros calibrados subestima el volumen de escurrimientos medios anuales que se generan en la subcuenca en un 0.692%.

Fig 3. a) Diferencia entre los volúmenes medios medidos por la estación hidrométrica y los obtenidos por el modelo;
b) Correlación entre el escurrimiento observado y modelado.



La correlación indica una relación fuerte entre los valores simulados y observados (Fig. 3b). El resultado del valor p - $value$ en la tabla ANOVA es menor que 0.01, por lo que puede concluirse que hay una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 99%. A pesar de que el análisis estadístico de la calibración del modelo refleja un buen ajuste de los valores simulados y observados en el área de estudio, es posible mejorar el ajuste sobre todo en los meses de julio, agosto y septiembre.

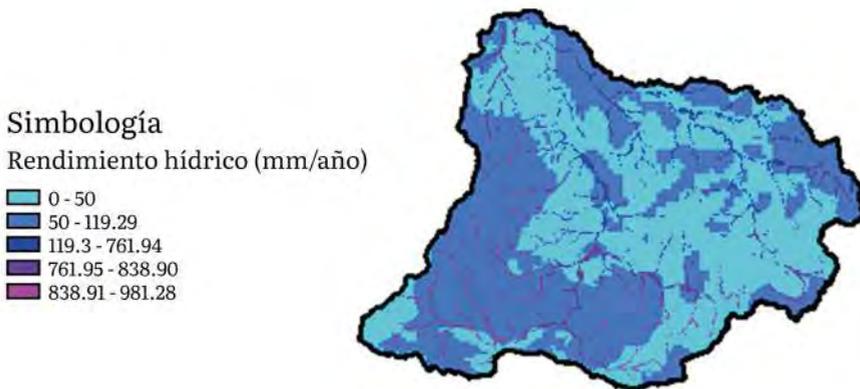
Rendimiento hídrico periodo 1975-1980

La distribución de los escurrimientos superficiales anuales por píxel (Fig. 4), considerado como el componente superficial del rendimiento hídrico anual de cada píxel se presenta en la Fig. 5.

A partir del promedio de los resultados de la región se puede estimar que el rendimiento hídrico en la región para el periodo analizado, considerando los parámetros calibrados, asciende a 25.28 hm³ anuales, con una diferencia de 2.063 hm³ entre los valores simulados y observados.

Del análisis derivado del método para estimar el escurrimiento superficial se obtiene el mapa de infiltración a partir del ajuste de los parámetros de la CN que influye directamente en el potencial de escurrimiento de una cobertura del suelo en función de la clasificación hidrológica del suelo, donde se encuentra. Puede observarse en la Fig. 5a que el potencial de infiltración en la región oscila entre 2.74 mm a 23.24 mm.

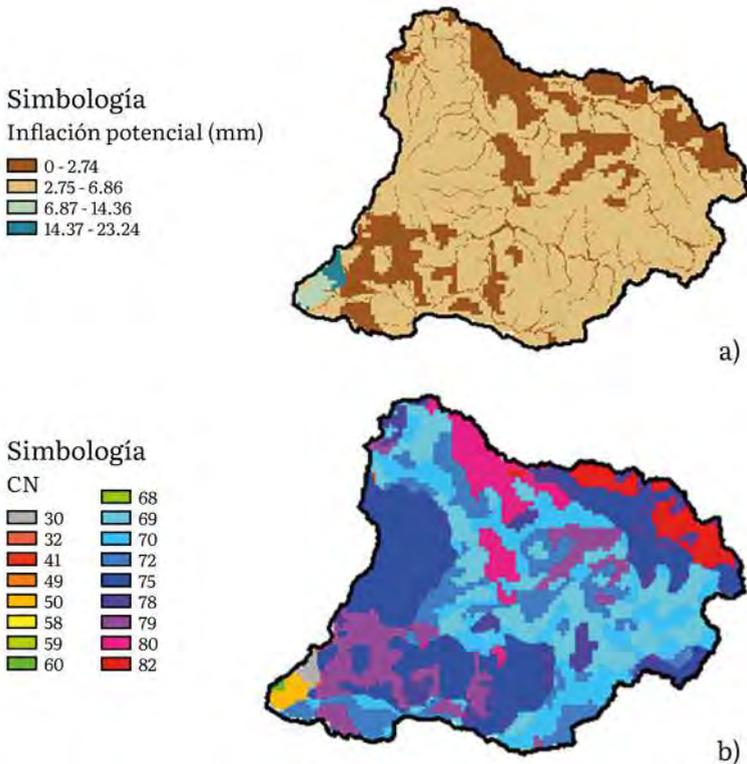
Fig 4. Distribución espacial del escurrimiento superficial o rendimiento hídrico anual.



Por otra parte, con la calibración del método se generan los valores del parámetro CN calibrados para la región (Fig. 5b), que es un producto importante del aporte de la investigación a actividades prácticas de la gestión.

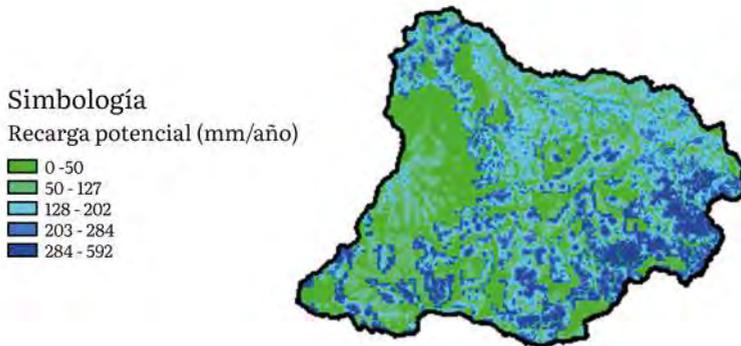
Del parámetro CN se puede realizar una analogía para el coeficiente de escurrimiento que considera la Norma Mexicana en la estimación de los escurrimientos. Este mapa puede interpretarse considerando qué valores de CN próximos a 0 se refieren a zonas muy permeables, por el contrario, si tiende a 100 representa condiciones de impermeabilidad.

Fig 5. Elementos derivados del análisis del escurrimiento superficial.
a) Infiltración potencial por píxel; b) Distribución de los valores del coeficiente del Curva Número (CN) por píxel.



Del resultado del balance hídrico a nivel de píxel en las subcuencas analizadas se obtiene el resultado preliminar de la contribución a la recarga potencial al agua subterránea, que en la zona asciende a 4.09 hm^3 (Fig. 6), este volumen representa un 17.6% del rendimiento hídrico superficial.

Fig 6. Recarga local anual por píxel.



El análisis simplificado de los componentes del balance hídrico hace que los resultados del modelo SWY se consideren correctos para la estimación del rendimiento hídrico, situación que se demuestra con los indicadores estadísticos presentados en la calibración del modelo. Sin embargo, el enfoque simplificado para estimar el balance hídrico no incluye muchas de las complejidades que se presentan cuando el agua se mueve sobre el terreno. Por lo tanto, no deben considerarse los valores de la recarga potencial al agua subterránea producto de la precipitación como un valor absoluto, sino una aproximación lineal de un fenómeno, en esencia, no lineal [13].

Un elemento para considerar en el análisis teórico del modelo es la producción del flujo base, pues el procedimiento no produce directamente valores de caudal (sino que separa los resultados en dos componentes: Q_F y B). Debe considerarse que existen regiones donde este

enfoque no es correcto debido a la interacción que existe entre el agua subterránea y la superficial, por ejemplo, en algunas zonas estudiadas el nivel piezométrico se encuentra por debajo de la cota más baja del río, lo que significa que es poco probable que se produzca flujo base. En la zona de estudio no se cuenta con un caudal base pues el nivel piezométrico se encuentra a una profundidad mayor de 30 m, por lo tanto, se considera que todo el escurrimiento medido por la estación hidrométrica es únicamente flujo superficial rápido.

En el análisis se comprobó la agrupación de los suelos en clases hidrológicas, en el ajuste del modelo existe una diferencia cuando se emplean fuentes de datos globales pues, generalmente, son muy generales y al usar la información las características edafológicas del área de estudio generan un mapa propio.

Se ha comprobado que en el análisis de las variables de entrada la parametrización basada en la literatura, por ejemplo, del coeficiente de cultivo, puede generar resultados eficientes para la modelación siempre y cuando se tenga un conocimiento adecuado sobre la zona de estudio y, por lo tanto, una asignación adecuada de los coeficientes correspondientes. Por otra parte, también se recomienda realizar una comparación de los resultados con las variables medidas en la zona, así como con modelos espacialmente explícitos diferentes, si éstos se encuentran disponibles [22].

Por otra parte, para abordar la incertidumbre en torno a los valores de los parámetros se sugiere verificar la evapotranspiración real con las observaciones, por ejemplo, de MODIS, considerando la variación de parámetros en función de la diferencia entre ETR modelada y observada [13]. Este enfoque no es posible aplicarlo en el periodo de modelación seleccionado por este estudio, debido a que los datos de evapotranspiración registrados por el sensor MODIS se tienen a partir de los años dos mil.

Conclusiones

Los resultados estadísticos de la calibración del modelo demuestran que es posible, con los datos de entrada y los parámetros calibrados,

alcanzar una buena aproximación entre los volúmenes de escurrimientos superficiales simulados y observados en las subcuencas analizadas.

Los resultados derivados de la calibración de la subcuenca tomada como ejemplo en este trabajo permiten mejorar el conocimiento de los valores de recarga de agua subterránea, producto de la precipitación, reduciendo las incertidumbres que genera el desconocimiento del potencial de recarga y generación de recursos hídricos superficiales en los encargados de gestionar los recursos hídricos en la región. Así, es posible prevenir y proteger a corto y largo plazo para evitar dificultades.

Referencias

- [1] H. M. Murphy, M. D. Prioleau, M. A. Borchardt, y P. D. Hynds, "Epidemiological evidence of groundwater contribution to global enteric disease, 1948–2015", *Hydrogeology Journal*, vol. 25, no. 4, pp. 981-1001, 2017, <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1543-y>.
- [2] CONAGUA, "Estadísticas del Agua en México", Edición 2018. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, México, 2020.
- [3] G. Hatch Kuri, C. Denzin, F. Taboada, y R. Pacheco-Vega, "Agua subterránea en México: retos y pendientes para la transformación de su gestión", *El estado del agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social- ecológica*, pp. 149-170, 2017.
- [4] CONAGUA, "Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero del Valle de San Juan del Río (2203), Estado de Querétaro", Publicado en el *Diario Oficial de la Federación*, México, *Comisión Nacional del Agua*, 2018.
- [5] N. Lu, G. Sun, X. Feng, y B. Fu, "Water yield responses to climate change and variability across the North–South Transect of Eastern China (NSTEC)", *Journal of hydrology*, vol. 481, pp. 96-105, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.020>.
- [6] Z. Ouyang, C. Zhu, G. Yang, X. Weihua, H. Zheng, Y. Zhang, y Y. Xiao, "Gross ecosystem product concept accounting framework and case study", *Acta Ecológica Sinica*, vol. 33, núm. 21, pp. 6747-6761, 2013.

- [7] X. Lian, Y. Qi, H.-w. Wang, J.-l. Zhang, y R. Yang, "Assessing Changes of Water Yield in Qinghai Lake Watershed of China", *Water*, vol. 12, núm. 1, pp. 11, 2020, <https://doi.org/10.3390/w12010011>.
- [8] T. J. Baker, y S. N. Miller, "Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed", *Journal of hydrology*, vol. 486, pp.100-111, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.041>.
- [9] V. P. Singh, y D. A. Woolhiser, "Mathematical modeling of watershed hydrology", *Journal of hydrologic engineering*, vol. 7, núm. 4, pp. 270-292, 2002.
- [10] Mirchi, D. Watkins Jr. y K. Madani, "Modeling for watershed planning, management, and decision making", *Watersheds: management, restoration, and environmental impact (Vaughn JC ed)*, Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, USA, ISBN: 978-1-61668-667-3, 2010.
- [11] CONAGUA, "Estadísticas del Agua en México". *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, México, 2018.
- [12] L. A. Joulia, "Atlas de Riesgo del Municipio de San Juan del Río Querétaro. Capítulo I: Antecedentes e Introducción", *Secretaría de Desarrollo Local*, 2012.
- [13] R. Sharp, H. Tallis, T. Ricketts, A. Guerry, S. Wood, R. Chaplin-Kramer, E. Nelson, D. Ennaanay, S. Wolny, y N. Olwero, "InVEST 3.7.0. User's Guide. The Natural Capital Project", *The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund*, Stanford University, University of Minnesota, 2018.
- [14] NRCS-USDA, "National Engineering Handbook Hydrology Chapters, Chapter 9: Hydrologic Soil-Cover Complexes", Retrieved, 2020, <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelpr,db1043063>.
- [15] A. P. Cuervo-Robayo, O. Téllez-Valdés, M. A. Gómez-Albores, C. S. Venegas-Barrera, J. Manjarrez, y E. Martínez-Meyer, "An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico", *International Journal of Climatology*, vol 34, no. 7, pp. 2427-2437, 2014. <https://doi.org/10.1002/joc.3848>.
- [16] A. Jarvis, H. Reuter, A. Nelson, y E. Guevara, "Hole-filled SRTM [Shuttle Radar Topographic Mission] for the globe, version 4: available from the CGIAR [Consultative Group for International Agricultural Research]-Consortium for Spatial Information SRTM 90m Database", 2008.

- [17] INEGI, "Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación. Serie VI. (Capa Unión). Escala 1: 250 000", *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*, 2016.
- [18] C. Ross, L. Prihodko, J. Anchang, S. Kumar, W. Ji, y N. Hanan, "Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling", ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2018, <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1566>.
- [19] W. J. Rawls, A. Shalaby, y R. H. McCuen, "Evaluation of methods for determining urban runoff curve numbers", *Transactions of the ASAE*, vol. 24, núm. 6, pp. 1562-1566, 1981, <https://doi.org/10.13031/2013.34490>.
- [20] R. Allen, L. Pereira, D. Raes, y M. Smith, "Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO", *Irrigation and Drainage Paper*, núm. 56, 2006.
- [21] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, y T. L. Veith, "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations", *Transactions of the ASABE*, vol. 50, núm. 3, pp. 885-900, 2007, <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- [22] Z. Wang, A. M. Lechner y T. Baumgartl, "Ecosystem services mapping uncertainty assessment: A case study in the Fitzroy Basin mining region", *Water*, vol. 10, núm. 1, p. 88, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10010088>.

CAPÍTULO X

Modelo de decisión para tratamientos secundarios de aguas residuales

Edgardo Medina Rivera, Carlos Roberto Fonseca,
Iván Gallego-Alarcón, Oswaldo Morales-Nápoles,
Miguel Ángel Gómez Albores, Mario Esparza-Soto,
Carlos Alberto Mastachi-Loza y Daury García-Pulido

Introducción

Con un tratamiento confiable y definido que cumpla con los criterios adecuados de calidad, el agua reutilizable es un recurso que puede producirse cerca del mismo lugar de consumo [1]-[3]. La terminología asociada con el tratamiento de las aguas residuales y su reutilización varía a nivel mundial. Algunas regiones usan el término *agua recuperada* y otras *agua reciclada* [2]. Los principales desencadenantes de su reutilización son la falta de agua, la deficiente gestión de los impactos de la sequía, el ahorro de agua dulce para el primer uso que requiere una alta calidad, el uso de fuentes de agua más económicas, una opción de bajo costo para la disposición del agua residual y la restauración del agua en el ambiente [4].

La reutilización del agua ha sido practicada por muchas comunidades en todo el mundo [3] y, actualmente, más de 60 países practican diversos tipos de reutilización, pero el rezago aún es importante. Por ejemplo, China, México y Estados Unidos son los países con la mayor cantidad de agua reutilizada, los dos primeros, sin embargo, con un pobre tratamiento [5]. A nivel mundial, en el 2011, se utilizaron 7,000 millones m³/año de agua recuperada, lo que representa sólo el 0.59% del uso total de agua [6].

Los sistemas de reutilización de agua requieren diferentes estándares de calidad, los cuales son alcanzados por medio de diferentes niveles de tratamiento que dependerá del uso previsto [6].

El Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities [7] sugiere que el costo del proyecto de reutilización del agua debe determinarse caso por caso, es decir, se puede seleccionar un tren de tratamiento de aguas residuales para un proyecto de reutilización de agua en función del uso final del agua recuperada para lograr la eficiencia económica y la sustentabilidad ambiental [2].

Esto se conoce como tratamiento de aguas residuales adecuado para su uso. Su objetivo es evitar el tratamiento excesivo o insuficiente; el primero conlleva costos innecesarios y uso excesivo de recursos (como la energía); el segundo está legalmente prohibido [3].

La incorporación de sistemas de reutilización de agua es un proceso complejo de toma de decisiones que involucra diversos criterios económicos, tecnológicos y ambientales [8]. Las tecnologías de tratamiento de aguas residuales se comparan por aspectos económicos [9], eficiencia del reciclado (afectada especialmente cuando las aguas residuales influentes están altamente contaminadas), consumo de energía y emisiones de carbono (principales afectaciones ambientales).

Además, estos componentes están expuestos a una variedad de incertidumbres relacionadas con los seres humanos y condiciones operativas [10]. Los factores mencionados requieren un sistema de soporte de decisiones (DSS, Decision Support System) para la evaluación de los trenes de tratamiento [3].

El desarrollo de un DSS que apoye en la selección del tratamiento secundario (biológico) de agua residual involucra variables y resultados relacionados entre sí, con cierta incertidumbre. Por lo que es necesario implementar un sistema estadístico que modele el comportamiento individual de las variables, las dependencias que existen entre ellas y las dependencias de los resultados de acuerdo con el proceso unitario secundario elegido.

Para ello, este capítulo abordará la evaluación de las variables de entrada y los indicadores de rendimiento que, de manera potencial, puedan ser involucrados en el DSS basado en un modelo de redes Bayesianas.

Metodología

La metodología de la presente investigación está agrupada en tres etapas principales: la evaluación tanto de variables de entrada (VE), como de indicadores de rendimiento (IR) y la construcción del modelo basado en redes Bayesianas.

Los procesos unitarios secundarios (PU) considerados en el modelo abarcan los convencionales, de tipo aerobio y no complementarios (Tabla I).

Tabla I. Procesos secundarios seleccionados y sus variantes seleccionadas [12].

<p>Contactores Biológicos Rotatorios (CBR)</p>	<p>Lagunas aerobias (LAE)</p>
<p>b. Secundario</p>	<p>a. Aerobia de baja tasa b. Aerobia de alta tasa c. Laguna Aireada</p>
<p>Filtros percoladores (FPR)</p>	<p>Lodos activados (LAS)</p>
<p>a. Baja tasa b. Intermedia tasa c. Alta tasa d. Súper alta tasa e. De desbaste f. Dos fases</p>	<p>a. Típico b. Completamente mezclado c. Alimentación por pasos d. Estabilización por contacto e. Oxigenación de alta pureza f. Zanja de oxidación g. Reactor por lotes en secuencia h. Eje profundo i. Aireación extendida</p>

En la primera etapa, los factores de mayor importancia que se tomaron en cuenta en la selección de las VE son [11]-[13]:

1. *Componentes del agua a tratar:* afectan a los tipos de procesos a utilizar y las exigencias para su adecuado tratamiento.
2. *Limitaciones climáticas:* la temperatura afecta a la velocidad de reacción en la mayoría de los procesos químicos y biológicos y también puede afectar al funcionamiento de las operaciones físicas. Las temperaturas cálidas pueden acelerar la aparición de olores y limitar la dispersión en la atmósfera.
3. *Constituyentes no afectados e inhibidores:* no pueden ser descompuestos por el tratamiento y disminuyen la cinética de descomposición de materia orgánica y nutrientes.
4. *Intervalo de caudal:* ciertos procesos unitarios sólo pueden trabajar o trabajan mejor en un rango de caudales de entrada.
5. *Variación de caudal:* la mayoría de los procesos unitarios trabajan mejor a caudal constante, a pesar de que pueden tolerar algunas variaciones. Si la variación de caudal es demasiado grande, puede ser necesaria su regulación.
6. *Limitaciones ambientales:* factores ambientales tales como la presencia de vientos, direcciones preferentes del viento o la proximidad a núcleos de población, pueden implicar restricciones sobre la aplicabilidad de determinados procesos de tratamiento, especialmente en el caso de procesos que puedan generar olores. Tanto el tráfico como los ruidos pueden afectar a la ubicación de las instalaciones.
7. *Disponibilidad de espacio:* ¿existe espacio suficiente, no sólo para la implantación de las instalaciones que se están estudiando, sino también para instalaciones futuras? ¿Qué superficie de terreno hay disponible para minimizar el impacto visual de la construcción de las instalaciones?

Con el objetivo de comparar cuantitativamente cada proceso, se seleccionaron indicadores que estuvieran relacionados con los impactos ambientales, monetarios, sociales y de la calidad del agua del efluente (segunda etapa). A diferencia de las VE, los IR se derivan directamente del posible proceso unitario a elegir y representan la solución del problema de tratamiento del agua residual. Se seleccionaron de acuerdo con un extracto de los factores de mayor importancia que se deben tener en cuenta en la selección y evaluación de las operaciones y procesos unitarios. Algunos de los criterios a seguir son [11]-[13]:

- a. *Eficiencia*: se mide en función de la calidad del efluente respecto al influente, que debe estar de acuerdo con las exigencias formuladas respecto al vertido de efluentes.
- b. *Residuos del tratamiento*: es necesario conocer o estimar los tipos y cantidades de residuos sólidos, líquidos y gaseosos producidos.
- c. *Tratamiento de lodos*: ¿existe alguna limitación que convierta el tratamiento de lodos en un proceso excesivamente caro o inviable? La elección del sistema de tratamiento de lodos debe estar estrechamente relacionada con la elección del sistema de tratamiento de la fracción líquida.
- d. *Limitaciones ambientales*: las aguas o entidades receptoras cuentan con limitaciones específicas que pueden precisar la eliminación o conservación de constituyentes específicos como los nutrientes.
- e. *Costo de construcción y operación*: además de la infraestructura, existen necesidades químicas, energéticas, de otros recursos, de personal y de mantenimiento.
- f. *Estabilidad*: ¿cuál es la estabilidad a largo plazo de la operación o proceso unitario en cuestión?, ¿puede desestabilizarse el proceso fácilmente?, ¿puede hacer frente a cargas de choque

- periódicas? Si es así, ¿cómo afectan estas circunstancias a la calidad del efluente?
- g. *Complejidad del sistema*: ¿qué grado de complejidad presenta la operación del proceso, tanto en condiciones rutinarias como de emergencia?, ¿qué nivel de preparación de los operadores es necesario?
- h. *Impactos ambientales*: ¿cuáles son los probables efectos al ambiente derivados del proceso a implementar?

El modelo de decisión en la presente investigación está basado en redes bayesianas (etapa 3). Este enfoque bayesiano tiene una configuración básica entre las VE, los PU y los IR. La configuración de la red bayesiana debe considerar aspectos como la independencia entre sus elementos y la continuidad o discretización de sus funciones. Por ello, en esta etapa se realiza una discusión sobre las limitaciones y ventajas de las características que puede presentar el modelo.

Bajo este modelo de decisión será posible proporcionar dos tipos de resultados: a) la elección de un proceso unitario secundario, con mejor puntuación, asignando valores a las variables de entrada, y b) la elección de un proceso unitario secundario valorando los IR.

Estas opciones podrán ser representadas en un gráfico radial, proporcionando información integral para la toma de decisiones.

Resultados y discusión

De manera análoga a un proceso de cribado, las VE pasaron por un proceso de filtrado con los criterios mostrados en la metodología. Con los 3 primeros factores para determinar las VE se obtuvieron 10 parámetros característicos de las aguas residuales a tratar en un proceso convencional [11], [14], seis fueron asociados con un proceso secundario: sólidos suspendidos totales (SST), temperatura, materia orgánica biodegradable (MOB), pH, oxígeno disuelto (OD) y nutrientes.

Bajo los otros factores se definieron cuatro variables más: caudal de aguas residuales (QAR), variaciones del caudal (DQ), cercanía con viviendas (CRC) y disponibilidad de terreno y su costo (TR). Con ello fue posible determinar las clases (o intervalos) para cada variable y determinar si la variable permite diferenciar entre un proceso, es decir, si representa una disyuntiva o no, para que el proceso sea elegido desde la perspectiva de la variable. Esto podría conducir a la eliminación de esta VE. Además, permite identificar si alguna variable puede considerarse parte de otra, ayudando a la simplificación del modelo y determinar los estados de cada variable en caso de requerir variables de tipo ordinales o nominales en el modelo.

Las clases para cada variable se denotaron de la letra A a la C indicando el nivel con el que cada proceso puede operar (Tabla II). Para los SST se consideraron concentraciones con las que pueden operar de manera satisfactoria los procesos, clasificando en baja (A; $SST < 75$ mg/L), media (B; $75 < SST < 125$ mg/L) y alta (C; $SST > 125$ mg/L), basado en [11], [15].

Para la temperatura, se consideró la diferencia con la óptima de operación del proceso (DTO). Por lo que, con datos de Zhou, Li, Xu y Yu [16] se determinaron las clases: A (diferencia óptima), $DTO < 5^{\circ}C$; B (diferencia alta), $5 < DTO < 15^{\circ}C$; y C (muy alta), $DTO > 15^{\circ}C$. Para la MOB se consideraron A, $MOB < 100$ mg/L DBO_5 ; B, $100 < MOB < 200$ mg/L DBO_5 ; y C, $MOB > 200$ mg/L DBO_5 [11], [15]. En relación con los nutrientes, pH y OD, todos los procesos, usualmente, cuentan con mecanismos reguladores, por lo que podrían incluirse en la misma clase.

El QAR fue clasificado con base en información de [1] en A: bajo, $QAR < 4000$ m³/día; B: medio, $4000 < QAR < 40000$ m³/día; y C: alto, $QAR > 40000$ m³/día. Si las DQ son lo suficientemente altas como para impactar en el influente del tratamiento secundario, el caudal usualmente se regula por medio de tanques de regulación y/o con la recirculación de los lodos del efluente de este tratamiento, por ello todos los procesos estarían incluidos en una misma clase.

En relación con la CRC, los procesos de CBR y LAS se incluyeron en una misma clase y los procesos FPR y LAE en otra debido a que estos últimos pueden generar efectos indeseables mayores (insectos y malos olores).

En cuanto a la TR, las lagunas tienen una desventaja sobre los demás procesos estudiados. Éstas requieren extensiones grandes de terreno para su construcción. De existir terreno suficiente en una zona urbana, su costo podría ser elevado y tendría un alto rechazo social. Los sistemas de tratamiento “estanques o lagunas” sirven a pequeñas comunidades, el 90% con poblaciones menores a 10,000 personas [17], es decir, poblaciones rurales [18]. Las clases asignadas a los procesos de acuerdo con esta variable es A) LAS, CBR y FPR, y B) LAE.

Tabla II. Clasificación de procesos por niveles de operación según potenciales VE.

Potencial VE	¿La variable genera una disyuntiva con los demás procesos? Se marcan con la misma letra los procesos que no generan disyuntiva entre ellos. La letra A representa los valores menores del parámetro expresado; la letra C, los mayores			
	LAS	LAE	FPR	CBR
SST	A	A	A	A
DTO	C	A	B	B
MOB	C	B	A	B
Nutrientes	A	A	A	A
pH	A	A	A	A
OD	A	A	A	A
QAR	C	A	B	A
DQ	A	A	A	A
CRC	A Y B	B	B	A Y B
Terreno*	A	B	A	A

* Esta variable se considerará dentro de la variable caudal de aguas residuales

Si para un proceso se presenta al menos una disyuntiva con los demás procesos, es suficiente para considerar la variable en el modelo. De esta manera las VE resultantes son: DTO, MOB, QAR y CRC.

Con los factores para los IR fue posible identificar los siguientes elementos que dependen del PU e, indirectamente, de las VE: eficiencia de remoción de SST (RSS) y MOB (RMO), cantidad de lodos (LDS), estabilidad (EST) y complejidad del proceso (CPJ), costo de construcción (CCO) y operación (COP) y consumo energético (CEN).

En la construcción de la red bayesiana, primero se discutió la independencia entre variables de entrada (VE), procesos unitarios secundarios (PU) e indicadores de rendimiento (IR). En segundo lugar, se realizó una discusión sobre la configuración y tipo de red que resulta más adecuada al fenómeno.

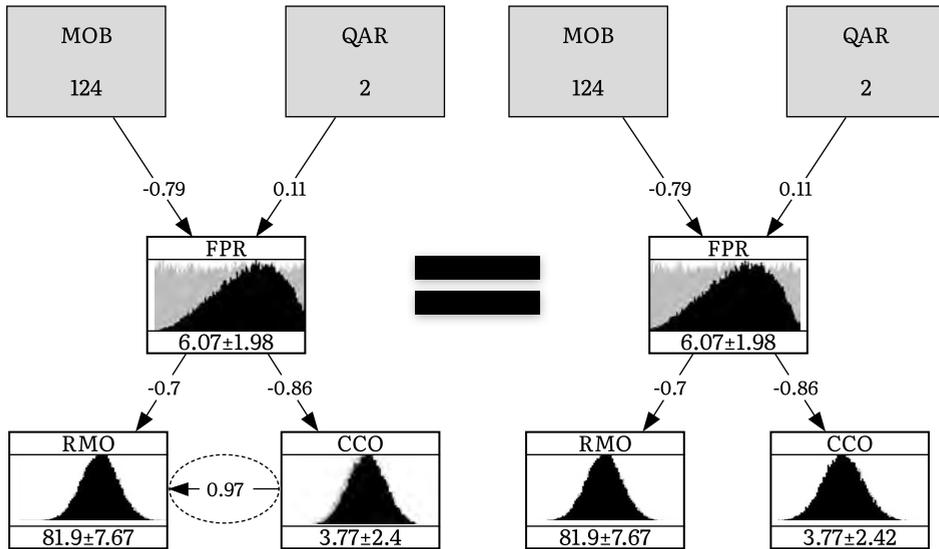
En relación con las variables de entrada QAR, DTO y MOB, puede considerarse una independencia entre sí debido a la naturaleza propia de las aguas residuales. Es decir, “las aguas residuales son aquellas aguas de desecho que contienen una gran cantidad de sustancias contaminantes y que han sido empleadas en alguna actividad humana, sea doméstica, industrial, pecuaria, agrícola o recreativa” [19]. Estos diversos orígenes, el clima y el tamaño de la comunidad o la actividad determinan sus diversas características (temperatura, materia orgánica biodegradable, caudal de aguas residuales) [1], [13]. Por lo tanto, es indispensable conocer el origen del agua residual para estimar valores de referencia de sus parámetros o características [19]. Esta fuerte dependencia hacia el origen del agua residual determina que las VE pueden considerarse independientes entre ellas.

Hablando de la dependencia entre los procesos, como el objetivo del modelo es elegir un PU, no existe la posibilidad de elegir otro proceso dado que ya se eligió otro.

Por otro lado, existen dependencias entre algunos IR, por ejemplo, entre RMO y CCO (Fig. 1a). Es claro que invertir más dinero en un proceso unitario puede aumentar la eficiencia de remoción de los contaminantes, por ejemplo, cuando se usa un empaque plástico en los filtros percoladores. Sin embargo, de acuerdo con las propiedades de redes bayesianas, las configuraciones con y sin esta dependencia (Fig. 1b) pueden ser equivalentes si se instancian sólo las VE [20]. En

la estructura cabeza-con-cabeza (FPR y CCO hacia RMO; Fig. 1a) la comunicación está cerrada y se abre al instanciar el hijo común (RMO); cuando una variable se instancia o cambia su probabilidad, informa a sus hijos y éstos actualizan su probabilidad.

Fig 1. Dependencia entre indicadores de rendimiento.



De manera similar a la relación entre IR, existen VE que influyen en ellos, pero no se les asignó una dependencia. Por ejemplo, la temperatura (o DTO) influye sobre la RMO, así como el QAR puede influir en los costos. Cuando se determina la curva de probabilidades de un IR o su intervalo de ocurrencia, como el caso de un FPR que tiene una eficiencia de remoción de materia orgánica entre 40% y 95%, ese intervalo existe por las diferentes condiciones (como la temperatura) en que operaron los FPR de la muestra. Por lo tanto, las influencias de las VE sobre los IR se encuentran implícitas en sus curvas de probabilidades y no es necesario asignar arcos de dependencia.

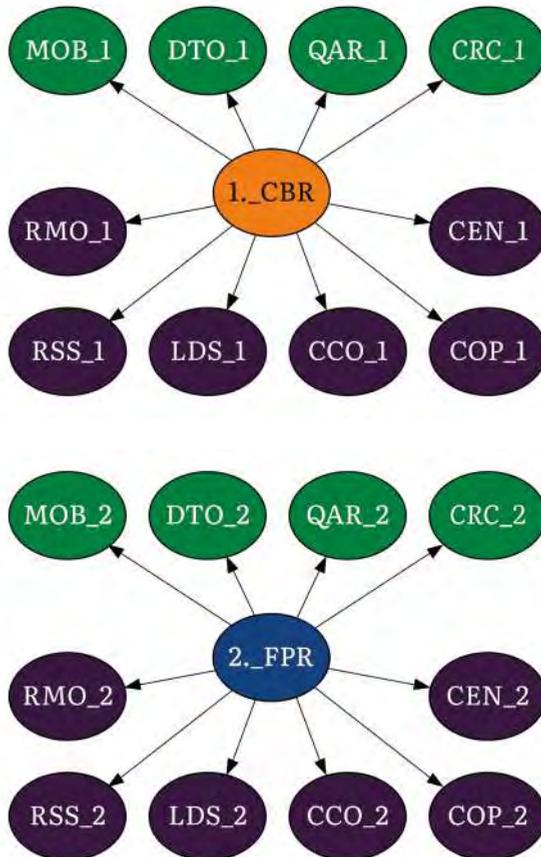
A partir de las relaciones determinadas por la dependencia entre los nodos, se definió una red bayesiana no paramétrica continuo-discreta. A pesar de que una red bayesiana discreta permite considerar la naturaleza discreta de la selección de PU, las demás variables (VE e IR) no lo son. Además, las redes bayesianas discretas requieren de la construcción de tablas de probabilidad condicional, las cuales aumentan su complejidad dependiendo del número de estados discretos en los nodos. El tratar de imitar la precisión de una variable continua, aumentando el número de estados discretos, conlleva a calcular o determinar tablas condicionales demasiado grandes, las cuales requieren bases de datos muy extensas y para un juicio de expertos no es factible. Entonces, las redes bayesianas discretas sólo son eficientes para modelos cuyas variables tienen un número limitado de estados debido a la forma en que se calculan las probabilidades condicionales [21].

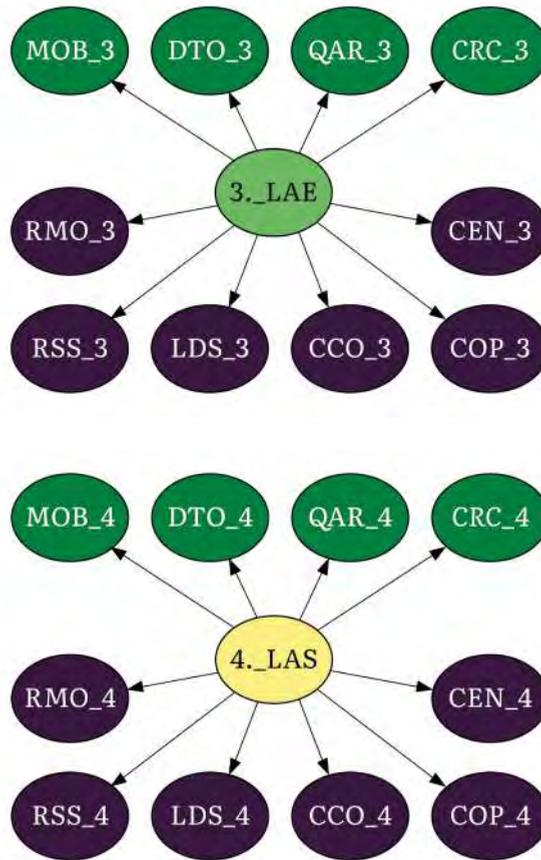
Dado que los PU son un conjunto no ordinal, no pueden medirse en una sola variable continua. Sin embargo, la puntuación que pudiera obtener cada PU, dependiendo de las VE, es una variable continua. A cada uno de los procesos le afectan de manera diferente las restricciones de diseño (VE) y se obtienen resultados y costos (IR) muy diferentes de ellos. Por lo tanto, es conveniente analizarlos por separado. De acuerdo con lo anterior, el modelo se configuró en redes bayesianas independientes por PU y se invirtió la dirección de las influencias (arcos) entre las VE y los PU hacia un sentido que podría considerarse no causal (Fig. 2). Existen importantes ventajas de construir redes bayesianas causales. Aunque, desde un punto de vista matemático o abstracto, las redes bayesianas no imponen la dirección del arco causal [22].

Cambiar la dirección de un arco cambia su significado [22]. En el sentido causal (VE a PU), la puntuación o elección de un proceso depende de las VE que se tienen. Esto coincidía con la lógica del proceso de diseño, donde primero obtenemos los datos básicos del problema de tratamiento y de ahí son contemplados los tratamientos posibles. Al invertir la dirección de los arcos, las VE dependen de la puntuación del PU. Es decir, los valores que pueden existir en las VE dependen de la puntuación o elección del proceso.

Con esta configuración se consideró que era posible obtener las siguientes ventajas: a) se obtienen curvas de distribución de los IR de cada uno de los procesos que se apegan a su comportamiento, b) es posible obtener la mayoría de los parámetros de las redes por medio de datos obtenidos de la literatura y, c) se considera la naturaleza discreta de los procesos unitarios al estructurarlos en modelos separados.

Fig2. Red bayesiana propuesta para la selección del proceso unitario secundario.





Conclusiones

Los elementos para la elección del tratamiento secundario convencional de aguas residuales deben considerar: variables del modelo, tipo de variables, tipo de modelo y tipo de salidas. Por ello, contactores biológicos rotatorios, filtros percoladores, lagunas aerobias y lodos activados se determinaron como procesos unitarios secundarios suficientes para la toma de decisión sobre un tratamiento convencional. Las variables de entrada identificadas como más relevantes en la decisión fueron materia orgánica biodegradable, diferencia de

temperatura con la óptima, caudal de aguas residuales y cercanía con las viviendas. Los indicadores de rendimiento que proporcionan información para la toma de decisión se engloban en eficiencia de remoción de materia orgánica biodegradable, eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales, cantidad de lodos, estabilidad del proceso, complejidad del proceso, costo de construcción, costo de operación y consumo energético.

El tipo de variable adecuado para los procesos unitarios fue variable discreta, mientras que las variables de entrada y los indicadores de rendimiento pueden ser visualizados y procesados mejor como variables continuas.

Se ha configurado satisfactoriamente un modelo estadístico basado en redes Bayesianas. El tipo de red Bayesiana más adecuado para las variables involucradas fue no paramétrica continuo-discreta, estructurada por separado para cada proceso unitario.

Referencias

- [1] T. Asano, F. Burton, H. L. Leverenz, R. Tsuchihashi, y G. Tchobanoglous, *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. McGraw-Hill Education, 2007, <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071459273>.
- [2] U. S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), “Guidelines for Water Reuse, Development”, *Washington, D.C.: U.S. Agency for International Development*, 2012.
- [3] G. Chhipi-Shrestha, K. Hewage, y R. Sadiq, “Fit-for-purpose wastewater treatment: Conceptualization to development of decision support tool (I)”, *Science of the Total Environment*, vol. 607–608, pp. 600–612, 2017, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.06.269.
- [4] B. Jiménez-Cisneros, “Water Recycling and Reuse: An Overview”, *Water Reclamation and Sustainability*, Paris, France, UNESCO, 2014, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247683>.
- [5] A. N. Angelakis y P. Gikas, “Water reuse: Overview of current practices and trends in the world with emphasis on EU states”, *Water Utility Journal*, vol. 8, pp. 67–78, 2014.

- [6] European Union, “EU-level Instruments on Water Reuse: Final Report to Support the Commission’s Impact Assessment”, 2016.
- [7] Department of Sustainability, Environment, Water, P. and C. (DSEWP aC), “Progress against the national target of 30% of Australia’s wastewater being recycled by 2015”, *Canberra*, 2012.
- [8] F. Nasiri, T. Savage, R. Wang, N. Barawid, y J. B. Zimmerman, “A system dynamics approach for urban water reuse planning: A case study from the Great Lakes region”, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 27, núm. 3, pp. 675–691, 2013, doi: 10.1007/S00477-012-0631-8.
- [9] T. Guo, J. Englehardt, y T. Wu, “Review of cost versus scale: Water and wastewater treatment and reuse processes”, *Water Science and Technology*, vol. 69, núm. 2, pp. 223–234, 2014, doi: 10.2166/WST.2013.734.
- [10] A. Roozbahani, B. Zahraie, y M. Tabesh, “Integrated risk assessment of urban water supply systems from source to tap”, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 27, núm. 4, pp. 923–944, 2013, doi: 10.1007/S00477-012-0614-9/FIGURES/13.
- [11] J. Jacinto, “Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización”, *Metcalf y Eddy, McGraw-Hill/Interamericana*, México, vol. 2, 1996.
- [12] M. Rodgers, J. Mulqueen, G. Carty, y G. O’Leary, “Treatment systems for small communities, business, leisure centres and hotels”, *Wexford, Ireland: Environmental Protection Agency*, 1999.
- [13] C. E. Adams, “Wastewater Treatment,” *Environmental Engineers’ Handbook*, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press LLC, pp. 507–926, 1999.
- [14] V. César y G. Vásquez, “Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales”, *Fundación ICA*, p. 341, 2003, https://www.academia.edu/31205529/Ingenier%C3%ADa_de_los_sistemas_de_tratamiento_y_disposici%C3%B3n_de_aguas_residuales.
- [15] A. Hernández-Muñoz, “Depuración de aguas residuales”. *Madrid, España: Servicio de publicaciones de escuela de ingenieros de caminos, canales y puertos*, 1996.
- [16] H. Zhou, X. Li, G. Xu, y H. Yu, “Overview of strategies for enhanced treatment of municipal/domestic wastewater at low temperature”, *Science of the Total Environment*, vol. 643, pp. 225–237, 2018, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2018.06.100.

- [17] L. K. Wang, N. C. Pereira, Y. T. Hung, y N. K. Shammass, *Biological Treatment Processes*. New York, USA, Humana Press, 2009.
- [18] M. Cervera-Flores y J. W. Rangel-González, “Distribución de la Población por Tamaño de Localidad y su Relación con el Medio Ambiente”, *Dirección General de Estadísticas Sociodemográficas*, INEGI, 2015.
- [19] W. A. Lozano-Rivas, “Fundamentos de Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales”, *Universidad Piloto de Colombia*, Bogotá, 2012.
- [20] F. J. Díez-Vegas, “Introducción al Razonamiento Aproximado”, *Inteligencia Artificial*, UNED, España, 2005, <https://studylib.es/doc/1504907/razonamiento-aproximado-introducci%C2%B4-on-al-f.-j.-d%C2%B4%C4%Blez>.
- [21] D. Paprotny y O. Morales-Nápoles, “Estimating extreme river discharges in Europe through a Bayesian network”, *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 21, núm. 6, pp. 2615–2636, 2017, doi: 10.5194/HESS-21-2615-2017.
- [22] E. Millán, T. Loboda, y J. L. Pérez-De-La-Cruz, “Bayesian networks for student model engineering”, *Comput Educ*, vol. 55, núm. 4, pp. 1663–1683, 2010, doi: 10.1016/J.COMPEDU.2010.07.010.

Conclusiones generales

La aplicación de la teoría de grafos para el tratamiento de complejidades de datos permite observar que los métodos basados en grafos obtienen conjuntos de datos reducidos sin pérdida de información útil y con un mejor comportamiento en términos de media geométrica, en comparación de otros métodos. El uso de la teoría de grafos resulta prometedor ya que esquematiza el conjunto de datos en un grafo completo y permite mantener la información de todo el conjunto de datos. Adicionalmente, la reducción del tamaño del conjunto sin pérdida de información es ideal frente a los nuevos retos de grandes volúmenes de datos.

Por otro lado, la gramática para la estructura morfológica de criaturas virtuales, considerando premisas de vida permite comprender y estudiar ecosistemas en un ambiente controlado. Además, facilita observar fenómenos que, por lo general, son muy difíciles de estudiar y ofrece la oportunidad de generar nuevas estructuras para la construcción de artefactos o robots que apoyen a las actividades del ser humano. El análisis de los procesos evolutivos es útil para obtener y analizar resultados, pero es igualmente evidente que se necesita una jerarquización de las premisas a usar para tener una experimentación razonable.

Los Patrones Similares Frecuentes representan un nuevo enfoque para describir a los conjuntos de datos. La minería de PSF está atrayendo fuertemente la atención como una solución alternativa en el desarrollo de estrategias descriptivas. Los experimentos realizados en este trabajo validan que, cuando se utilizan funciones de

semejanzas diferentes a las de la igualdad, se puede obtener un cúmulo de conocimiento superior que cuando se utiliza la igualdad entre los valores de los atributos como función de semejanza. Además, cuando los PSF son utilizados en tareas como la clasificación, el clasificador obtiene una mayor precisión que cuando los PF del enfoque tradicional son usados. Por tanto, cuando se usa el enfoque de minado de Patrones Similares Frecuentes se descubre todo el universo de Patrones Frecuentes existente y como consecuencia se tiene un mayor conocimiento del conjunto de datos.

En la evaluación de riesgos en eventos naturales, principalmente eventos hidrometeorológicos, desde el punto de vista de logística humanitaria se tiene que evaluar como un paso básico para diseñar estrategias preventivas, de operación y de reconstrucción en las áreas dañadas. Con base en la información presentada por Behl y Dutta así como con la revisión de otros documentos, se concluye que el desarrollo de nuevos trabajos en cualquiera de los enfoques (cualitativo, cuantitativo e híbrido) contribuye al campo de logística humanitaria y cadena de suministro, lo que apoya sustancialmente a los tomadores de decisiones y a las personas en áreas vulnerables con nuevas herramientas para prevenir los efectos catastróficos de un desastre.

Por su parte, la regulación del sistema de transporte público de pasajeros, basada en la teoría de contratos, ha mostrado que para ofrecer un servicio eficiente y de calidad del transporte público es necesaria la intervención de la autoridad gubernamental. Se ha expuesto, para el caso la ciudad de Toluca, que cualquier regulación a partir de incentivos, que sea implementada por el regulador, lleva a una mejor situación que la actual, tanto para la empresa, el gobierno y los usuarios.

La predicción de los índices nacionales precio-productor del concreto premezclado utilizando Redes Neuronales Artificiales, el cual es un insumo importante en la industria de la construcción en México, con potencial para realizar predicciones de otros índices, muestra un valor de $MAPE_P$ de 0.59%, que es menor a los valores reportados en la literatura.

Sin embargo, el presente estudio tiene algunas limitaciones que pueden servir de guía para trabajos futuros: sólo hay una capa

oculta en la arquitectura propuesta y otros trabajos podrían ocupar arquitecturas más complejas, con mayor número de capas y variando la cantidad de neuronas en cada capa.

Con la finalidad de realizar el análisis térmico de un reflector Fresnel en generación directa de vapor, se planteó un modelo unidimensional basado en la metodología de Auditori. El modelo térmico puede ser fácilmente adaptado a otros fluidos al cambiar únicamente las propiedades termofísicas de cada fluido, sin necesidad de modificar las funciones de transferencia de calor; esto permite una flexibilidad que no se ha descrito de manera general en otros modelos que permitiría comparar el comportamiento del sistema bajo diferentes regímenes de operación y diferentes fluidos.

Los hidrogramas obtenidos mediante el modelo hidráulico bidimensional son de gran utilidad ya que aportan una distribución espacial y temporal del escurrimiento al considerar intensidades de lluvia en toda la cuenca, se observa que los caudales picos vistos presentan valores cercanos a los obtenidos mediante hidrogramas sintéticos.

Respecto a la simulación de la escorrentía e hidrodinámica de una cuenca pequeña, un modelo hidráulico bidimensional permitió determinar la tensión de fondo en cuatro zonas fácilmente identificables a lo largo del tramo del cauce, resultando que el modelo bidimensional IBER en conjunto con los SIG, así como los MDE, pueden ser aplicables en distintas fases del diseño siendo capaz de abordar problemas de carácter hidráulico e hidrológico.

Los resultados estadísticos de la calibración del modelo de estimación del rendimiento hídrico y su contribución a la recarga potencial del agua subterránea, con el modelo hidrológico Seasonal Water Yield, en una subcuenca del Acuífero Valle de San Juan del Río, Querétaro, demuestran que es posible alcanzar una buena aproximación entre los volúmenes de escurrimientos superficiales simulados y observados en las subcuencas analizadas.

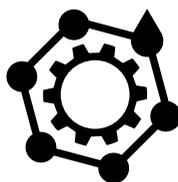
Lo anterior permite mejorar el conocimiento de los valores de recarga de agua subterránea producto de la precipitación, con lo que se reducen las incertidumbres que genera el desconocimiento del potencial de recarga y generación de recursos hídricos superficiales

en los encargados de gestionar los recursos hídricos en la región, con lo que es posible prevenir y proteger la zona a corto y largo plazo.

Los elementos para la elección del tratamiento secundario convencional de aguas residuales deben considerar variables del modelo, tipo de variables, tipo de modelo y tipo de salidas.

Los indicadores de rendimiento que proporcionan información para la toma de decisión se engloban en eficiencia de remoción de materia orgánica biodegradable, eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales, cantidad de lodos, estabilidad del proceso, complejidad del proceso, costo de construcción, costo de operación y consumo energético.

Finalmente, se ha configurado satisfactoriamente un modelo estadístico basado en redes bayesianas. El tipo de red bayesiana más adecuado para las variables involucradas fue no paramétrica continuo-discreta y estructurada por separado para cada proceso unitario.



Contribuciones a la Ingeniería y Ciencias del Agua

Coordinado por Ma. de Lourdes Najera López
y Rosa María Valdovinos Rosas.

Se terminó de imprimir el 4 de abril de 2024 en
los Talleres Gráficos Santa Bárbara S. de R.L. de C.V., Pedro Cortéz 402-1,
Col. Santa Bárbara, C.P. 50050, Toluca, Estado de México.
En su composición se utilizó la fuente tipográfica Literata.

La edición estuvo a cargo de la Dirección de Difusión y Promoción
de la Investigación y los Estudios Avanzados, mediante
el Departamento de Producción y Difusión Editorial,
y consta de 300 ejemplares.

Lourdes Gómez Zamora
Análisis e interpretación del sistema antiplagio

Guadalupe Álvarez Martínez
Corrección de estilo y ortotipográfica

Juan Manuel García Guerrero
Diseño de forros, formación y calibración de figuras

Patricia Vega Villavicencio
Coordinación editorial

Por disposición del Reglamento de Acceso Abierto
se publica la versión PDF de este libro en el Repositorio Institucional
de la Universidad Autónoma del Estado de México.



Publicaciones UAEMEX

Retos de Física Nuclear y Fenómenos No Lineales

Tatyana Belyaeva Leonidovna,
Maximo Augusto Aguero Granados
y Omar Pavón Torres (coords.)

Simulación de Objetos. Aplicaciones por Salome Meca, Code Saturne y ParaView

Mario Ibañez Olvera y Alien Blanco Flores

Investigaciones y Experiencias en Enseñanza de las Ciencias y la Matemática

Carlos Armando Cuevas Vallejo,
Magally Martínez Reyes y
Judith Alejandra Hernández Sánchez
(coords.)

Consulta éstos y otros títulos en el
catálogo de Producción Editorial
de la Secretaría de Investigación
y Estudios Avanzados:

ri.uaemex.mx



Ma. de Lourdes Najera López

Doctora en Ciencias Económico-Administrativas, con enfoque en Opciones sobre tipo de cambio, y maestra en Ingeniería, encauzada al área terminal en transporte. Destacan sus investigaciones para la regulación de transporte público y cadena de suministro.

Ha sido servidora pública de la UAEMEX en la Subdirección Administrativa del Plantel Nezahualcóyotl y de la Facultad de Ingeniería, donde actualmente es subdirectora académica. Sus intereses son los procesos estocásticos, mercados financieros, transporte, modelación matemática de sistemas de transporte y dinámica de estructuras solitónicas.

Fue asesora del proyecto “Celda solar con colorante orgánico” en la Feria de Ciencias Internacional y asesora en las Olimpiadas de Física, a nivel nacional. Ha contribuido en publicaciones de libros científicos y cuenta con derechos de autor en tres libros de Física para Nivel Medio Superior.



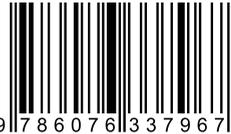
Rosa María Valdovinos Rosas

Es investigadora reconocida nacional e internacionalmente, con los doctorados en Ciencias Computacionales de la Universitat Jaume I en España y del Instituto Tecnológico de Toluca, en México. Su afiliación al SNI y su participación en el PRODEP destacan su compromiso con la excelencia en investigación y docencia. Sus intereses se centran en sistemas computacionales y ha contribuido significativamente en diversas redes de investigación, incluyendo la Red Temática de Inteligencia Artificial UAEM-ITT-UJI y la Red de Algoritmos Combinatorios y Reconocimiento de Patrones. Sus publicaciones y proyectos han tenido un impacto notable en la comunidad académica, enriqueciendo el campo de las ciencias computacionales.

Contribuciones a la Ingeniería y Ciencias del Agua incluye propuestas de investigación en ciencia básica y aplicada a problemas de inteligencia artificial, minería de datos, ingeniería sísmica, análisis de riesgo, transporte y tratamiento de aguas e hidrología.

Los temas abordados en este libro son actuales y obligados para estudiantes y tomadores de decisiones de instituciones gubernamentales y privadas en el área de ingeniería y tecnología, mismos que involucran a la ingeniería civil, ingeniería en computación, hidráulica y las que promuevan la mejora de nuestro ambiente.

ISBN 978-607-633-796-7



9 786076 337967

Secretaría de Investigación
y Estudios Avanzados