

Carbono en ambientes biofísicos y productivos

línea base sobre cambio climático

MARÍA ESTELA OROZCO HERNÁNDEZ • PATRICIA MIRELES LEZAMA
(Coordinadoras)



UAEM

Universidad Autónoma
del Estado de México

CARBONO EN AMBIENTES
BIOFÍSICOS Y PRODUCTIVOS
LÍNEA BASE SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

Dr. en D. Jorge Olvera García
Rector

Dr. en Ed. Alfredo Barrera Baca
Secretario de Docencia

Dra. en Est. Lat. Ángeles Ma. del Rosario Pérez Bernal
Secretaria de Investigación y Estudios Avanzados

M. en D. José Benjamín Bernal Suárez
Secretario de Rectoría

M. en E. P. y D. Ivett Tinoco García
Secretaria de Difusión Cultural

M. en C. I. Ricardo Joya Cepeda
Secretario de Extensión y Vinculación

M. en E. Javier González Martínez
Secretario de Administración

Dr. en C. Pol. Manuel Hernández Luna
Secretario de Planeación y Desarrollo Institucional

Mtra. en Ed. A. Yolanda E. Ballesteros Senties
Secretaria de Cooperación Internacional

Dr. en D. Hiram Raúl Piña Libien
Abogado General

Lic. en Com. Juan Portilla Estrada
Director General de Comunicación Universitaria

Lic. Jorge Bernáldez García
Secretario Técnico de la Rectoría

M. en A. Emilio Tovar Pérez
Director General de Centros Universitarios y Unidades Académicas Profesionales

M. en A. Ignacio Gutiérrez Padilla
Contralor Universitario

FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL

M. en E.U. y R. Héctor Campos Alanís
Director

Dr. en U. Juan Roberto Calderón Maya
Subdirector Académico

M. en E.U. y R. Ana María Marmolejo Uribe
Subdirectora Administrativa

M. en A.S. Jorge Tapia Quevedo
Coordinador del Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Planeación Territorial (CEPLAT)

Dra. en G. Ma. Estela Orozco Hernández
Coordinadora de Posgrado

L. en Pl. T. Francisco Ocaña Chávez
Coordinador de Difusión Cultural

L. en Pl. T. Benigno González García
Coordinador de Planeación y Evaluación

L. en Pl. T. Alberto Sánchez Romero
Coordinador del Centro de Estudios Territoriales Aplicados

M. en C.A. Ricardo Farfán Escalera
Coordinador de la Licenciatura en Ciencias Ambientales

M. en E.U. y R. Isidro Rogel Fajardo
Coordinador de la Licenciatura en Planeación Urbana y Territorial

Dr. en C.S. Pedro Leobardo Jiménez Sánchez
Coordinador del Programa Editorial

CARBONO EN AMBIENTES BIOFÍSICOS Y PRODUCTIVOS LÍNEA BASE SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

María Estela Orozco Hernández

Patricia Mireles Lezama

(COORDINADORAS)



UAEM

Universidad Autónoma
del Estado de México



“2014, 70 Aniversario de la Autonomía ICLA-UAEM”

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

1ª edición 2014

© María Estela Orozco Hernández

© Patricia Mireles Lezama

(Coordinadoras)

CARBONO EN AMBIENTES BIOFÍSICOS Y PRODUCTIVOS

LÍNEA BASE SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

© Derechos reservados

Universidad Autónoma del Estado de México

Instituto Literario 100 Ote.

Toluca, Estado de México

[http:// www.uaemex.mx/](http://www.uaemex.mx/)

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra
—incluyendo el diseño tipográfico y de portada— sea cual fuere el medio, electrónico o mecánico,
sin el consentimiento por escrito de la Universidad Autónoma del Estado de México.

ISBN: 978-607-422-503-7

Impreso y hecho en México

Printed and made in Mexico

PRESENTACIÓN

La temática abordada cobra relevancia al contextualizarse en el marco de la Estrategia Nacional de Acción Climática para reducir la vulnerabilidad de los diversos sectores socioeconómicos y ambientales del país frente a condiciones extremas del clima, en los objetivos del área de investigación de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Universidad Autónoma del Estado de México y en la línea de generación y aplicación del conocimiento de Estudios Ambientales del cuerpo académico Estudios Territoriales y Ambientales. Asimismo, dentro de las estrategias de apoyo del Centro de Investigación en Estudios Avanzados en Planeación Territorial y la Facultad de Planeación Urbana, y en concordancia con los objetivos del proyecto “Cambios de uso del suelo, inducidos por actividades agropecuarias en ecosistemas terrestres templados y cálidos del Estado de México: impactos locales y emisiones globales de gases de efecto invernadero” (Conacyt-Semarnat).

En el libro se exponen las experiencias de investigación que los autores de variados campos disciplinarios desarrollan en torno a la temática del carbono y otros gases de efecto invernadero en ambientes biofísicos y productivos; la discusión de las ideas y los resultados advierten la importancia de integrar las experiencias individuales en comunidades científicas que fortalezcan su capacidad de opinión en el diseño y evaluación de las estrategias de mitigación y adaptación ante los previsibles cambios extremos del clima y en la formulación de políticas públicas.

Agradecemos la participación de los investigadores de Pronatura México A.C., de la Universidad Nacional Autónoma de México, del Institute of Biology, Karelian

Research Center RAS, Russia del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Colombia; de la Universidad San Francisco de Quito, Ecuador, del Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS); del Institute for Climatic and Atmospheric Science, School of Earth and Environment, University of Leeds, United Kingdom, de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Palmira, El Colegio de Ingenieros del Estado de México y de la Universidad Autónoma del Estado México.

Línea base sobre cambio climático

LOS ESTUDIOS DE CARBONO EN MÉXICO

José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz

Pronatura México A.C.

RESUMEN

El problema ambiental más severo al que se enfrenta la sociedad actual es el cambio climático, producto del incremento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. En este contexto, existe una creciente necesidad de estimar el carbono acumulado en diferentes almacenes de distintas clases de cobertura vegetal y las emisiones de carbono derivadas de la dinámica del cambio en dichas coberturas hacia un uso del suelo, a fin de realizar los inventarios locales, regionales, nacionales y mundiales de las emisiones de GEI derivadas de dichos procesos de conversión y modificación de las coberturas presentes en el paisaje; por ello, se propuso compilar algunos estudios de caso que muestren el contenido de carbono en diferentes coberturas vegetales en México, en sus diversos almacenes, tales como la biomasa aérea, el mantillo y el suelo.

Palabras clave: carbono, estudios, México.

CARBON STUDIES IN MEXICO

ABSTRACT

The most severe environmental problem facing society today is climate change, resulting from increased concentrations of greenhouse gases (GHGs) in the atmosphere, in this context, there is an increasing need to estimate the carbon content in different stores of different vegetation cover classes and the carbon emissions arising from the dynamics of land use – land cover change process, to make GHG inventories of local, regional, national and global level arising from such lawsuits conversion and modification of the hedges in the landscape, hence, it was proposed to compile some case studies that show the carbon content in different land cover types in Mexico, including various stores such as ground biomass, litter and soil.

Key words: carbon, studies, Mexico.

INTRODUCCIÓN

En los últimos siglos, la influencia del ser humano sobre la naturaleza ha tenido tal impacto que se han modificado en gran medida los paisajes del planeta. Algunos autores (Daily, 1995; FAO, 1995) consideran que 50% de la superficie terrestre ha sido modificada removiendo o transformando las comunidades vegetales naturales, mientras que Lambin (1997) menciona que a nivel global, la degradación del terreno inducido por el ser humano ha afectado aproximadamente 69.5% de la superficie terrestre, ocasionando una drástica reducción de la diversidad biológica (Lee *et al.*, 1995; Ordóñez, 2008).

La modificación del entorno mencionado anteriormente, es producto de un proceso conocido como deforestación. Otros autores definen a la deforestación como “el cambio físico en la cobertura del bosque” (FAO-UNEP, 1990). Lambin (1994 y 1997), Dale *et al.* (1993) y Mas *et al.* (1996) incorporan factores ambientales, sociales y económicos que promueven dicho cambio, mientras que Landa *et al.* (1997), la definen como “la transformación del ambiente causada por fenómenos

naturales o humanos, que conlleva a la reducción o pérdida completa de sus propiedades físicas y biológicas, cuya última consecuencia es un decremento en la disponibilidad de bienes y servicios que brindan los ecosistemas a los seres humanos”. Algo muy parecido mencionan Kaimowitz y Angelsen (1998), quienes toman en cuenta perturbaciones relacionadas a la deforestación como la pérdida de biomasa, reducción en el periodo de barbecho y otros tipos de degradación forestal (Ordóñez, 2008).

La deforestación implica la tala del bosque o de la cobertura forestal para dar lugar al establecimiento de usos del suelo diferentes, ya sea para desarrollar actividades agrosilvopastoriles (Myers, 1991; González-Medellín, 2001), o para permitir asentamientos humanos (Dirzo y García, 1992; Ordóñez, 2008).

Se ha estimado que dicha conversión de la cobertura de los bosques tropicales a nivel internacional, ha alcanzado un promedio de 15.5 millones de hectáreas por año para el periodo comprendido de 1981 a 1990, lo cual se traduce en una tasa anual de deforestación de 0.8% (FAO-UNEP, 1990; Lambin, 1994). Históricamente, la deforestación ha sido particularmente notable en el oeste del Continente Africano, donde los bosques han sido reducidos en 44%, en América Latina en 32% y en el sur sudeste de Asia en 34% (Houghton, 1994; Bocco *et al.*, 2001; Ordóñez, 2008).

En nuestro país, estudiar la magnitud del cambio en el uso del suelo es una tarea prioritaria, ya que se encuentra entre los países con mayor deforestación a nivel mundial (Myers, 1991; Bocco *et al.*, 2001). Pero esta tarea no es fácil, ya que cuantificar la deforestación tiene grandes implicaciones, por ejemplo, Masera (1996) y Masera *et al.* (1998) mencionan que para inicios de los años noventa las tasas de deforestación oscilaban entre 370 y 720 000 hectáreas al año de bosques, selvas y vegetación semiárida; la tasa de deforestación, reportada por la Comisión Nacional Forestal para el periodo 2000 a 2005, no fue mayor de 314 000 ha al año (Conafor, 2006). Estas cifras muestran un rango muy amplio de los valores estimados debido a la carencia de monitoreos permanentes a lo largo del territorio nacional, a diferencia de la intensidad del trabajo realizado y en relación con la extensión territorial y temporal, es decir, a las inconsistencias en las definiciones de los tipos básicos de vegetación y superficie entre los diferentes inventarios

forestales y entre diversas instituciones (Ordóñez, 1999; Ordóñez, 2008) que, a su vez, son producto de los diferentes propósitos por los que se han llevado a cabo los distintos estudios (González-Medellín, 2001), además no se cuenta en el país con información detallada tanto de los almacenes de C por tipo de ecosistema y uso del suelo, como de los flujos netos de C derivados de los patrones de cambio de uso del suelo a nivel regional. Hasta el momento, los pocos estudios existentes se han concentrado en los ecosistemas tropicales (Ordóñez, 2008).

Las causas que más impacto tienen en la deforestación son la ganadería y los cultivos agrícolas. Estos factores varían en importancia según el tipo de ecosistema (Ordóñez, 1999; Ordóñez, 2008).

Factores que influyen en los procesos de deforestación y degradación

En este sentido, Lambin (1997) indica que la deforestación es, en la mayoría de los casos, el resultado de complejas cadenas de causalidad que se originan más allá del sector forestal. La mayor parte de los cambios en los ecosistemas forestales son provocados por la conversión de la cobertura del terreno, la degradación del mismo o por la intensificación en el uso del terreno; todo esto, resultado de actividades humanas (Lambin, 1997; Nepstad *et al.*, 1999; en Ordóñez, 2008).

Entre los principales factores socioeconómicos que se correlacionan con la deforestación en países tropicales tenemos: el uso de las tierras dedicadas a actividades agropecuarias y la densidad poblacional, aunque la importancia relativa de cada factor es distinta en las diferentes regiones del planeta (Bawa y Dayanandan, 1997). La expansión del área agropecuaria constituye una de las principales fuentes de deforestación en Asia y América Latina, pero el establecimiento de pastizales es especialmente importante en esta última región (Toledo, 1990; Dirzo y García, 1992; Masera *et al.*, 1997; Kaimowitz y Angelsen, 1998; Cortina *et al.*, 1999; Hall, 2000; Ordóñez, 2008). Mientras tanto, en África la densidad poblacional es el factor que más se correlaciona con la deforestación (Bawa y Dayanandan, 1997).

Efectos de la degradación y deforestación sobre comunidades y poblaciones

Estudiar la influencia de los procesos de cambio de uso del suelo en la dinámica de las comunidades y poblaciones es crítico en nuestro país, pues la deforestación y la degradación del recurso forestal han sido muy aceleradas en las últimas décadas, además de que no se cuenta en el país con información detallada de los patrones de cambio de uso del suelo a nivel regional. Hasta el momento, los pocos estudios existentes se han concentrado en los ecosistemas tropicales. La información es especialmente deficiente para los bosques templados del Centro y Sur de México, los cuales sufren actualmente un acelerado proceso de deforestación y degradación, con tasas de cambio comparables a las de las selvas del país (Masera, 1996).

Por ejemplo, en el estado de Michoacán, Bocco *et al.* (2001) mencionan que en los años setenta, 60% de la cobertura vegetal de dicho estado correspondía a los bosques templados y a las selvas bajas caducifolias y que ambas se redujeron en 13% para 1993; es decir, que 513 644 hectáreas de bosques y 308 292 hectáreas de selva se perdieron en un periodo de 23 años. En el mismo estudio se señala que los bosques presentan una tasa de deforestación de 1.8% anual y las selvas de 1% anual (Ordóñez, 2008).

El efecto que tienen estos procesos de pérdida y degradación es cada vez más obvio y en ocasiones desastroso. Las políticas de desarrollo rural que han fomentado la sustitución de la cobertura forestal (primaria) por otro tipo de coberturas de mayor producción a corto plazo (cultivos y pastizales inducidos) pero de bajo rendimiento a mediano y largo plazo, son las causas principales de la deforestación. Por lo tanto, dichos procesos conllevan a reducir la pérdida de forma drástica e irreversible en algunos casos de los bosques y de todo el bagaje genético que albergan (Ordóñez, 2008).

La deforestación mundial anual se calcula en 17 millones de hectáreas, lo que significa una liberación anual de cerca de 1.8 GtC; lo que representa 20% de las emisiones antropogénicas totales (IPCC, 1992 y 1995; Montoya *et al.*, 1995).

Específicamente para nuestro país, este fenómeno es de singular importancia pues, por un lado, México se encuentra entre los 20 países con mayores emisiones de estos

gases y por el otro, se encuentra entre las regiones más vulnerables a los impactos asociados al cambio climático debido a sus condiciones biológicas, climáticas y socioeconómicas (Ordóñez, 2008).

Deterioro ambiental

A los factores físicos y socioeconómicos que se asocian con la deforestación pueden sumarse los efectos de fenómenos naturales como tormentas o plagas, provocando efectos sinérgicos, de manera que el daño causado a los ecosistemas puede ser irreversible (Masera *et al.*, 1998; Ramírez-García *et al.*, 1998). Así, el peso que tienen los distintos factores que provocan la deforestación varía de acuerdo con las condiciones en que ocurren.

Cuando se habla de los factores que promueven la deforestación, es conveniente distinguir entre las causas proximales y las fuerzas conducentes a ésta. Las primeras se refieren a procesos inmediatos que producen cambios pero son resultado de la influencia de las segundas. Las fuerzas conducentes además, suelen ser la combinación de dos o más factores como el crecimiento de la población, condiciones sociales no equitativas, políticas gubernamentales erróneas o el uso de tecnologías inapropiadas (Lambin, 1994). Así, una causa proximal podría ser la transformación de selvas en pastizales mientras que la fuerza conducente sería la combinación de ciertas políticas económicas y las relaciones comerciales internacionales. Por tanto, aunque las causas proximales de la deforestación son generalmente atribuidas a la presión por la explotación de recursos y la competencia por áreas agropecuarias, la problemática estructural a que responde el proceso es más compleja (Ordóñez *et al.*, 2008).

El desarrollo tecnológico paradójicamente ha favorecido la pérdida masiva de bosques y selvas al impulsar la creación de nuevas vías de comunicación y de sistemas de desmonte cada vez más eficientes. Aunado a estos factores va el crecimiento demográfico y sus implicaciones en cuanto a la presión sobre los recursos y por otra parte la distribución inequitativa de las tierras y los bienes. Ahora bien, sabemos que existen causas estructurales y otras inmediatas que determinan el cambio en el uso del

terreno y no siempre son tan fáciles de discriminar. Por ejemplo, la correlación que se ha observado entre la presencia de caminos y deforestación puede no evidenciar los vínculos causales entre la primera respecto de la segunda. Algunos caminos se construyen precisamente porque un área ha sido talada y existen asentamientos y no lo contrario, pero también puede ocurrir que ambas variables puedan estar influidas por un tercer grupo de factores como la calidad del suelo o densidad de población (Kaimowitz y Angelsen, 1998).

Cuando la Organización Mundial para la Alimentación publicó su primera evaluación de los recursos forestales mundiales (FAO, 1948), definió los bosques como “vegetación predominante constituida por árboles de cualquier tamaño, capaces de producir madera u otros productos forestales, o bien influir sobre las condiciones climatológicas o el régimen de aguas”. Aunque el efecto invernadero ya se había descubierto y predicho el calentamiento mundial, esta definición no pretendía referirse a un papel de los bosques en la mitigación del cambio climático. Sin embargo, que este fenómeno mundial terminaría por afectar a la silvicultura era claro en 1989, cuando los ministros de medio ambiente de 68 naciones propusieron la forestación de 12 millones de hectáreas cada año en la Declaración Ministerial de Noordwijk sobre Cambio Climático (IUCC, 1993). Hoy es reconocido que los bosques contribuyen a mitigar el cambio climático, necesitan su adaptación y ayudan a resistir a sus efectos (Ordóñez *et al.*, 2008).

La teledetección, las mediciones de flujo del carbono y la modelación atmosférica inversa permiten comprender mejor el ciclo mundial del carbono y el papel de los bosques en el mismo. Sin embargo, son indispensables inventarios terrestres para realizar o complementar estimaciones y modelos que cuantifiquen las enormes existencias de carbono y sus flujos en los ecosistemas forestales. Urge mejorar y hacer más frecuentes las evaluaciones forestales nacionales al hacerse obligatoria la información de los países sobre cambios en las existencias de carbono (Brown, 1997). Además, la contabilidad de las emisiones de gases de invernadero evitadas reduciendo la deforestación y la degradación forestal no sería factible sin unos buenos inventarios de bosques y de gases de invernadero (Schoene y Netto, 2005; Ordóñez *et al.*, 2008).

Específicamente en lo referente a estudios sobre la contribución de las emisiones y de la captura de carbono del sector forestal, es un área de investigación de frontera a escala mundial. En México, al igual que en la mayoría de los países en desarrollo, son insuficientes los estudios detallados a escala regional y nacional sobre la dinámica (ya sea temporal o espacial) de las emisiones y del potencial de captura de carbono de las diversas áreas forestales, asociado con los procesos de cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo. Es por ello que dichos estudios son ahora los principales focos de la investigación actual, porque se requieren datos confiables que analicen conjuntamente a los principales almacenes de carbono y sus cambios relativos y de retirar las incertidumbres en las estimaciones por tipo de almacén y por tipo de cobertura (Ordóñez *et al.*, 2008).

Por ello, el presente estudio tiene como objetivo compilar estudios de cuantificación de carbono en diferentes almacenes a fin de que los conocedores y personas que empiezan a manejar el tema conozcan estimados del contenido de carbono, que sirven como referencia, para saber cuánto carbono hay en diferentes coberturas vegetales y dentro de este contexto nos referimos al contenido de carbono que tiene la biomasa de las diferentes comunidades vegetales, en los diferentes tipos de cobertura vegetal y uso del suelo.

Densidades de carbono

La cobertura vegetal presente en un territorio dado presenta una composición (de las especies vegetales presentes) y estructura (el conjunto de especies herbáceas, arbustivas y arbóreas relacionadas e interdependientes entre sí, que se encuentran distribuidos en un espacio determinado, con una altura y una cobertura dada), característica que permite clasificarla y definirla (Ordóñez *et al.*, 2008) con una leyenda específica (e.g., tipos de vegetación o clases de cobertura vegetal).

Con base en la compilación de estudios del contenido de carbono por diferentes autores, las densidades del carbono total estimado para las clases no forestales (incluyendo sistemas agroforestales) se presentan en un rango de 89-159 MgC ha⁻¹; de

80-257 MgC ha⁻¹ para bosque no manejado, de 154-281 MgC ha⁻¹ para plantaciones, de 234-309 MgC ha⁻¹ para bosques bajo manejo y de 97-305 para bosques protegidos; es decir que los rangos de carbono contenido en la vegetación van de 9-16 MgC ha⁻¹ en agricultura y pastizales a 223 MgC ha⁻¹ en bosques tropicales.

El carbono contenido en suelos presenta un rango de 81 MgC ha⁻¹ en agricultura a 126 MgC ha⁻¹ en bosques templados de hojosas (*op cit.*). Cabe señalar que el suelo es el almacén de carbono más estable y que al ser expuesto o descubierto, los procesos de erosión y lixiviación vulneran este reservorio y se vuelve en un emisor (Ordóñez *et al.*, 2008). Lo relevante de este análisis es que nos permite apreciar los contrastes que existen respecto a la cantidad de carbono contenido en cada almacén por tipo de cobertura vegetal y usos del suelo (cuadro 1).

Cuadro 1

DENSIDADES DE CARBONO POR CLASE DE COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO EN MÉXICO

<i>Cobertura vegetal / Uso del suelo</i>	<i>Carbono total (Mg C/ha)</i>	<i>Carbono en vegetación (Mg C/ha)</i>	<i>Carbono en suelo (Mg C/ha)</i>
Bosques sin manejo			
Bosque de coníferas	257	118	120
Bosque de hojosas	236	105	126
Selva perenne	305	186	115
Selva deciduas	154	54	100
Vegetación semiárida	80	19	60
Bosques degradados	122	42	81
Plantaciones			
De larga rotación	191	78	108
De corta rotación	154	42	96
Plantaciones de restauración	180	89	84
Plantaciones energéticas	281	42	96
Bosques manejados			
Bosque de coníferas	234	118	120
Selva perenne	309	180	115
Bosques protegidos			
Templado	240	134	123
Selva perenne	305	223	115
Selva deciduas	154	64	100
Humedales	282	223	115
Vegetación semiárida	97	49	60
Otros usos			

Agricultura	89	9	81
Pastizales	95	16	81
Agroforestería	159	63	97

Nota: El carbono total no es necesariamente la suma del carbono en vegetación más carbono en suelos; en algunos casos se incluye carbono contenido en materia en descomposición, productos forestales y carbono por sustitución de combustibles fósiles.

Fuente: Masera *et al.*, 1995 y 1997; De Jong *et al.*, 1997; Ordóñez *et al.*, 1998; Hughes *et al.*, 1999 y 2000; Rentarías, 1997; Castellanos *et al.*, 1991; Ordóñez, 1998 y 1999; Ordóñez y Escandón 1999; Masera *et al.*, 2001; Ordóñez *et al.*, 2008.

Algunos autores señalan la importancia del carbono almacenado en raíces, pero el tiempo y costo que implica tomar una muestra lo hace poco viable. En el siguiente cuadro, se muestra la relación de biomasa aérea respecto de la biomasa de raíces en diferentes coberturas vegetales y usos del suelo de estudios realizados en México.

Cuadro 2

RELACIÓN BIOMASA AÉREA / BIOMASA DE RAÍCES PARA DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES Y USOS DEL SUELO

<i>Cobertura forestal / Uso del suelo</i>	<i>Factor de expansión</i>	<i>Fuente</i>
Hojosas	0.25	Cairns, 1997
Coníferas	0.26	Cairns, 1997
Matorrales	0.13	Rangel, 2004
Matorrales	0.35	Ordóñez <i>et al.</i> , 2008
Agricultura	0.10	Ordóñez <i>et al.</i> , 2008
Agricultura	0.10	Lee <i>et al.</i> , 2004
Pastizales	0.18	Jaramillo <i>et al.</i> , 2003

Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

El cambio de la cobertura vegetal hacia un uso de suelo, la deforestación y el deterioro en las coberturas vegetales, son procesos de trascendencia mundial que al perder el carbono almacenado se convierten en emisores aumentando la

concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y nutriendo con ello el cambio climático global, aunado con la pérdida de la biodiversidad. Lo nocivo de sus efectos ha hecho necesario el diseño e implementación de mecanismos de mitigación en donde la participación comprometida entre científicos, políticos y poseedores de los recursos, se ha convertido en uno de sus principales retos, pero aún es incipiente, cabe señalar que se han realizado 16 Conferencias de las Partes, cuyo objetivo es reducir, mitigar y compensar las emisiones de GEI y a la fecha, no lo han logrado.

De acuerdo con los expertos nacionales, las tecnologías de mitigación de GEI son viables. Sin embargo, una de las principales barreras para instrumentar dichas tecnologías son las altas inversiones requeridas que no se compensan con el pago de servicios ambientales. Las opciones de mitigación en el sector forestal deberán estar acompañadas con esfuerzos en el sector energético, a fin de promover la energía renovable e incrementar su eficiencia. Adicionalmente, la gran cantidad de carbono que podría capturarse por las opciones forestales, permitiría la introducción de energías renovables en el mediano y largo plazos.

Es imprescindible identificar y proponer estrategias viables dirigidas a la mitigación del cambio climático, por un lado, conocer la dinámica del carbono en los ecosistemas y, por otro, identificar el origen de las modificaciones a los flujos de C derivadas de los patrones de cambio de uso de suelo. Un primer paso indispensable para lograr este objetivo es contar con la información básica sobre los contenidos de carbono en los diferentes almacenes del ecosistema, tener datos finos sobre los almacenes de carbono asociados a las diferentes clases de cobertura forestal y uso del suelo, lo cual se refleja en las diferentes densidades de carbono total para cada clase presentada. Cabe señalar que la información referida corresponde al carbono almacenado y no al potencial de carbono capturado.

Es necesario desarrollar nuevos estudios que muestren la densidad de la madera de las especies forestales, ya que en México se encuentran muchas especies donde los valores de referencia son tomados de la literatura internacional de especies del mismo género, pero de características de crecimiento diferentes, aunado a la determinación del contenido de carbono en biomasa de las muestras vegetales.

BIBLIOGRAFÍA

- Bawa, K.S. y S. Dayanandan (1997), "Socioeconomic factors and tropical deforestation". *Nature*, 386:562-563.
- Bocco, G., O. Masera y M. Mendoza (2001), "La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación", *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 44: 18-38.
- Brown, S. (1997), "Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. FAO Forestry Paper 134", *Food and Agriculture*, Organization of the United Nations, Rome, 55 pp.
- Cairns M.A., S. Brown, E.H. Helmer and G.A. Baumgardner (1997), "Root biomass allocation in the world's upland forests", *Oecologia*, 111: 1-11.
- Castellanos, J., J.M. Maass, J. Kummerow (1991), "Root biomass of dry deciduous tropical forest in Mexico", *Plant Soil*, 131:225-8.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor) (2006), *Desarrollo forestal sustentable en México. Avances 2001-2006*, Comisión Nacional Forestal, 181 pp.
- Cortina Villar, S., P. Macario Mendoza y Y. Ogneva-Himmelberger (1999), "Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México", *Investigaciones Geográficas*, boletín, 38:41-56.
- Daily, G.C. (1995), "Restoring value to the world's degraded lands", *Science*, 269: 350-354.
- Dale, V.H., R.V. O'Neill, M. Pedlowski y Frank Southworth (1993), "Causes and effects of land-use change in Central Rondonia, Brazil", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(6):997-1005.
- De Jong, B., Tipper, R. and Taylor, J. (1997), *A framework for monitoring and evaluating carbon mitigation by farm forestry projects: Example of a demonstration project in Chiapas, Mexico*.
- Dirzo, R. y M.C. García (1992), "Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a neotropical area in southeast Mexico", *Conservation Biology*, 6(1):84-90.
- Food and Agriculture Organization (FAO) (1948), "Recursos forestales del mundo", *Unasylva*, 2(4): 1-22.

- Food and Agriculture Organization (FAO-UNEP), (1990), *Tropical Forest Resources Assessment Project*, vol. 1. FAO, Roma. 343 pp.
- Food and Agriculture Organization (FAO) (1995), *Forest resources assesment 1990*, FAO forestry paper 124, Roma.
- González-Medellín, (2001), *La vegetación y sus tasas de deforestación en una zona comunal chinanteca en Oaxaca con apoyo de un sistema de información geográfica*, tesis de maestría, UNAM, 100 pp.
- Hall, M. (2000), "A land-use model to predict the without-project baseline for Guaraqueçaba climate action project in the Guaraqueçaba environmental protection area", en: Brown, S., Calmon, M., Delaney, M. *Development of a deforestation and forest degradation trend model for the Guaraqueçaba climate action project*, 14 pp.
- Houghton, R.A. (1994), "The worldwide extent of land-use change", *BioScience*, 44, 5:305-306.
- Hughes, R.F., Kauffman, J.B. and Jaramillo, V.J. (1999), "Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of Mexico", *Ecology*, 80(6), 1892-1907.
- _____(2000), "Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in humid tropical region of Mexico", *Ecol. Appl.* 10, 515-527.
- Information Unit on Climate Change (IUCC) (1993), *Noordwijk Ministerial Declaration on Climate Change*, Châtelaine, Suiza, PNUMA. www.cs.ntu.edu.au/homepages/jmityro/sid101/uncc/fs218.html, fecha de actualización: 7 de junio 2010.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1992), *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge.
- _____(1995), *Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jaramillo, V. J., J. Boone, L.Rentería-Rodríguez, D.L. Cummings, and L. Ellingson (2003), "Biomasa, carbon and nitrogen pool in Mexican Tropical Dry Forest landscapes", *Ecosystems*, 6:609-629.
- Kaimowitz, D., Angelsen, A. (1998), *Economic models of tropical deforestation: a review. Center for International Forestry Research*, Indonesia, 139 pp.
- Lambin, E.F., (1994), *Modelling deforestation processes: A review. Trees, Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites. European Commission Joint Research Centre*

- Institute for Remote Sensing Applications- European Space Agency, Luxembourg, Tree Series B, Research Report no. 1, 113 pp.*
- _____ (1997), "Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions", *Progress in Physical Geography*, 21(3): 375-393.
- Landa, R., J. Meave y J. Carabias (1997), "Environmental deterioration in rural Mexico: An examination of the concept", *Ecological Applications*, 71(1):316-329.
- Lee, H., J.L. Carr y A. Lankerani (1995), "Human disturbance and natural habitat: a biome level analysis of a global set", *Biodiversity and Conservation*, 4:128-155.
- Lee, J., J. Six, A.E. Patrick, J.L. MacIntyre, C. van Kessel, D.E. Rolston, J.W. Hopmans, R.E. Plant, and K.T. Paw U. (2004), *Greenhouse gas emissions from convencional versus minimum Till fields: baseline data*, University of California, Davis, Poster.
- Mas, J.F., V. Sorani y R. Álvarez (1996), "Elaboración de un modelo de simulación del proceso de deforestación", *Investigaciones Geográficas*, boletín, número especial 5: 43-57.
- Masera, O.R., Hernández, T., Ordóñez, A. and Guzmán, A. (1995), *Land use Change and Forestry. Preliminary Inventory of National Greenhouse Gases*, México, Instituto Nacional de Ecología,
- Masera, O. (1996), "Desforestación y degradación forestal en México", Documento de Trabajo no. 19, GIRA, A.C. Pátzcuaro, México.
- Masera, O., Ordóñez, M.J. and Dirzo, R. (1997), "Carbon emissions from Mexican forests: the current situation and long-term scenarios", *Climatic Change* 35, 265-295.
- Masera, O., D. Masera y J. Navia (1998), *Dinámica y uso de los recursos forestales de la región purépecha: El papel de las pequeñas empresas artesanales*, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada A.C. Michoacán, México.
- Masera, O. R., A. D. Cerón and A. Ordóñez (2001), *Forestry mitigation options for Mexico: finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns*, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 6: 291-312.
- Montoya, G., L. Soto, Ben De Jong, K. Nelson, P. Farias, Pajal Yakac Tic, J. Taylor y R. Tipper (1995), *Desarrollo forestal sustentable: Captura de carbono en las zonas Tzeltal y Tojolabal del Estado de Chiapas*, Instituto Nacional de Ecología (INE), Cuadernos de Trabajo no. 4. México, 50 pp.

- Myers, N. (1991), "Tropical forests: present status and future outlook", *Climatic Change*, 19:3-32.
- Nepstad, D.C., A. Veríssimo, A. Alencar, C. Nobre, E. Lima, P. Lefebvre, P. Schlesinger, C. Potter, P. Moutinho, E. Mendoza, M. Cochrane y V. Brooks, (1999), "Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire", *Nature*, 398: 505-508.
- Ordóñez, J.A.B. (1998), *Estimación de la captura de carbono en unos estudios de caso para Bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán*, tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 61pp.
- Ordóñez, A., Masera, O. y V. Jaramillo (1998), *Estimación del contenido de carbono en la biomasa aérea, mantillo, suelos y raíces de los bosques de mesa y de pino-encino en El Carricito, en la Sierra Madre Occidental*, Instituto de Ecología, UNAM, México, 14 pp.
- Ordóñez, A. y J. Escandón (1999), *Estimación preliminar del contenido de carbono para el Ajusco medio*, Instituto de Ecología-Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 13 pp.
- Ordóñez, J.A.B. (1999), *Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso*, Instituto Nacional de Ecología, Semarnap, México, 72 pp.
- Ordóñez, J.A.B., B.H.J. de Jong, F. García-Oliva, F.L. Aviña, J.V. Pérez, G. Guerrero, R. Martínez and O. Masera, (2008), Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico, *Forest Ecology And Management*, volume 255, issue 7, 20 April, ISSN 0378-1127.
- Ordóñez, J.A.B. (2008), *Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha*, tesis doctoral, Instituto de Ecología, UNAM, Posgrado en Ciencias Biomédicas, UNAM, México, 140 pp.
- Ramírez-García, P., J. López-Blanco y D. Ocaña (1998), "Mangrove vegetation assessment in the Santiago Mouth, by means of supervised classification using Landsat TM imagery", *Forest Ecology Management*, 105:217-229.
- Rangel, B. (2004), *Evaluación de la captura de carbono en sistemas agrícolas en producción, abandonados y reforestados de áreas afectadas por cenizas del volcán Parícutín, Michoacán, México*, tesis de Maestría en Conservación y Manejo de Recursos Naturales (especialidad en manejo de recursos terrestres), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 177 pp.

- Rentería, L. (1997), Biomasa y almacenes de carbono radical en tres comunidades vegetales en la costa de Jalisco, México, tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Schoene, D. y M. Netto, (2005), “¿Qué significa el protocolo de Kyoto para los bosques y la silvicultura?”, *Unasylva*, 222, vol. 56.
- Toledo, V.M. (1990), El proceso de ganaderización y la destrucción biológica y ecológica de México, en E. Leff (coord.), *Medio ambiente y desarrollo en México*, vol. I., Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades, UNAM, Porrúa, México, pp. 115-139.

AGENDA DE INVESTIGACIÓN AMBIENTAL.
CAMBIOS DE USO DEL SUELO, INDUCIDOS
POR ACTIVIDADES AGROPECUARIAS
EN ECOSISTEMAS TERRESTRES DEL ESTADO DE MÉXICO:
IMPACTOS LOCALES Y EMISIONES GLOBALES
DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

María Estela Orozco Hernández

*Centro de Investigación en Estudios Avanzados en
Planeación Territorial, Facultad de Planeación Urbana
y Regional, Universidad Autónoma del Estado de México*

RESUMEN

Los cambios de uso del suelo en los ecosistemas terrestres templados y cálidos del Estado de México, causados por la expansión de las actividades agropecuarias, incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero debido a las inapropiadas prácticas de manejo de las tierras y ocasionan la disminución, fragmentación y deterioro de las coberturas vegetales, lo cual elimina sumideros de carbono atmosférico, fundamentales para regular los cambios del clima local y global. El alcance de la investigación está enfocado hacia la caracterización del comportamiento

de la emisión y absorción de GEI producidos por el cambio de uso del suelo en ambientes seleccionados del Estado de México, a través de la sistematización de los procedimientos de medición y recogida de datos, con el objeto de aportar un diagnóstico integrado, un informe metodológico y escenarios prospectivos que coadyuven en la definición de estrategias de adaptación social y productiva ante el cambio climático.

Palabras clave: agenda ambiental, cambio de uso del suelo, gases de efecto invernadero.

RESEARCH AGENDA OF ENVIRONMENTAL
CHANGES IN LAND USE, INDUCED BY AGRICULTURAL ACTIVITIES IN
TERRESTRIAL ECOSYSTEMS OF THE STATE OF MEXICO: LOCAL IMPACTS
AND OVERALL EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES

ABSTRACT

The changes in land use in terrestrial ecosystems temperate and warm of the State of Mexico, caused by the expansion of agricultural activities, increase emissions of greenhouse gases and lead to a reduction, fragmentation and deterioration of the vegetation cover, which eliminates the sinks of atmospheric carbon, crucial for regulating the changes of the local climate and global.

The scope of the investigation focuses on the characterization of the behavior of the emission and absorption of GHG produced by the change in land use in selected environments of the State of Mexico, through the systematization of the measurement procedures and data collection, in order to provide an integrated diagnostic, a methodological report and prospective scenarios that contributes in the definition of strategies for social adaptation and productive to climate change.

Key words: environmental agenda, exchange currency for use of the soil, greenhouse gases

ANTECEDENTES

Hay un amplio consenso científico sobre la estrecha relación entre las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero generadas por la actividad humana y los cambios observados en el clima terrestre. Entre los gases de efecto invernadero con ciclo de vida largo, sobresale el dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), gases carbonados como los CFCs y HCFCs, HFC, PFC y SF_6 , metano (CH_4). Estos gases se producen de forma natural y son fundamentales para la vida en la Tierra; impiden que parte del calor solar regrese al espacio. Cuando el volumen de estos gases es considerable, provocan temperaturas artificialmente elevadas y modifican el clima. Las fuentes principales del incremento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera son, en orden de importancia, la industria, en particular, la combustión de petróleo, carbón y gas para producir energía, tala de bosques y algunos métodos de explotación agrícola. Estas actividades han aumentado el volumen de gases de efecto invernadero en la atmósfera, sobre todo de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso.

La expansión de la agricultura tiene una serie de efectos sobre el cambio climático, entre ellos, el aumento de los niveles de emisiones de GEI debido al excesivo uso de fertilizantes, la roturación, la degradación de los suelos y la ganadería. Más de 50% de los fertilizantes aplicados a los suelos se dispersa en el aire o acaba en los cursos de agua. Uno de los GEI más potentes es el óxido nitroso (N_2O), con un potencial de producción de calentamiento global unas 296 veces mayor que el CO_2 . El empleo masivo de fertilizantes y las emisiones resultantes de N_2O representan el mayor porcentaje de contribución agraria al cambio climático: el equivalente a 2,1 mil millones de toneladas de CO_2 cada año. Además, la producción de fertilizantes, que es energéticamente muy demandante, añade otros 410 millones de toneladas equivalentes de CO_2 . De todos los productos químicos, los fertilizantes son los que más contribuyen a las emisiones globales de GEI.

La segunda fuente de emisiones agrarias es la ganadería. Al digerir los alimentos, los animales producen grandes cantidades de metano, un potente GEI; se estima que de mantenerse el aumento de consumo de carne, las emisiones de metano seguirán creciendo y lo harán durante las próximas décadas. Las ganaderías vacuna y ovina

tienen un elevado impacto sobre el cambio climático, cada kilo de vacuno producido genera 13 kilos de emisiones de carbono; en cuanto al kilo de cordero, genera 17 kilos de emisiones. El porcino y las aves, aunque son también grandes productoras de GEI, generan menos de la mitad de esas cifras. Otros efectos ocasionados por las actividades agrarias, se encuentran asociados a la tala de bosques y otras cubiertas vegetales naturales para obtener nuevas tierras para pastoreo o para la producción de cosechas, lo que ocasiona la eliminación de sumideros de carbono fundamentales —plantas y suelos que absorben carbono atmosférico— e incrementa el calentamiento global (Greenpeace, 2008).

Si bien se considera que la agricultura es uno de los mayores productores de gases de efecto invernadero (GEI), también se le atribuye un elevado potencial para pasar a ser uno de los mayores sumideros netos de carbono, la perspectiva se corresponde con las reflexiones vertidas en la sesión marco sobre la mitigación del cambio climático, realizada en Bonn, Alemania en mayo de 2006. Los trabajos presentados coincidieron en aprovechar el potencial de la agricultura y silvicultura para reducir la emisión de gases de efecto invernadero y minimizar la pérdida de los recursos naturales, lo cual se lograría a través de la conservación de los ecosistemas terrestres, el aprovechamiento exitoso de la agricultura y el control de tecnologías de conservación y manejo; también se identifica un interés sobresaliente por la estimación de los costos económicos de la mitigación en la agricultura, silvicultura y uso de la tierra, así como la contribución de la política agrícola para la mitigación del cambio climático (UNFCCC, 2006).

En la tercera comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, se precisa que las principales causas que provocan la degradación de suelos en el país son: el sobre pastoreo, la deforestación y el cambio de uso del suelo, debido principalmente a actividades agropecuarias. Los modos y la intensidad del uso agropecuario de la tierra conducen a la transformación del hábitat, constituyen el factor de mayor impacto sobre la biodiversidad. El resultado de este proceso es una base forestal degradada y subutilizada, que incluye la conversión de bosques y áreas naturales frágiles a usos agrícolas y ganaderos no sustentables, con pérdida de suelo y alteración de regímenes de humedad como resultado de la

sobreexplotación de recursos maderables y no maderables que se traduce en una disminución de la productividad del bosque y de las áreas naturales.

Entre otros factores de degradación, destaca el uso de leña y los incendios inducidos con fines agropecuarios, el uso de la leña representa 90% del consumo residencial rural, así, 28 millones de mexicanos dependen de este combustible para cocinar. Se estima que el consumo doméstico de leña combustible asciende a 37 millones de m³ por año, cifra superior a la producción maderera autorizada en el territorio nacional. Entre 85 y 90% de las viviendas rurales queman leña combustible. La distribución del consumo de leña en el territorio muestra que las entidades que consumen más leña son las que presentan una importante población rural, indígena y con alto grado de marginación. Las proyecciones para México indican que el consumo de leña se mantendrá prácticamente estable en el mediano plazo, en cuanto a los incendios inducidos, sobre todo en la estación seca del año, entre diciembre y agosto, éstos siguen siendo el mecanismo más común para desmontar las tierras y abrir nuevas tierras al cultivo (Semarnat/ INE, 2006:7).

En la convención Marco Sobre el Cambio Climático, realizada en Tokio, Japón en junio de 2008, se coincidió en que combatir las emisiones de GEI derivadas de la degradación de los bosques era más difícil que reducir las emisiones de la deforestación. Se estima que la degradación de los bosques no se limita sólo a producir cambios en las reservas de carbono; es un proceso que genera cambios persistentes de largo plazo. En este sentido, se concluye que el conocimiento de las causas específicas de la degradación en un país y la comprensión de los procesos que la desencadenan, parece ser un punto de partida prometedor para estimar las emisiones y pérdidas de carbono (UNFCCC, 2008).

No obstante que las políticas y actividades que se están aplicando en México, se han centrado en el control de la deforestación y la degradación de los bosques (pago por los servicios ambientales, gestión sostenible de los bosques, silvicultura comunitaria, conservación y rehabilitación de los suelos, fortalecimiento de las instituciones ambientales y la búsqueda de nuevos mecanismos de financiación) y se realizan esfuerzos para analizar las tendencias históricas de la deforestación, así como la estimación y monitoreo de la degradación de la cubierta forestal, aún se

encuentra en ciernes la iniciativa encaminada a crear un sistema de vigilancia del cambio de uso de la tierra y los cambios de la cubierta terrestre en todo el país, así como la inclusión de datos sobre todos los reservorios de carbono en el inventario nacional forestal.

Los cálculos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGI) 1990-2002, reportan seis categorías de emisión definidas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (PICC): Energía [1], Procesos Industriales [2], Solventes [3], Agricultura [4] y Desechos [6]. Sin embargo, a la fecha de publicación del documento, sólo se tenían estimaciones preliminares de promedios anuales para el periodo de 1993 al 2002 de las emisiones de la categoría Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura (USCUSS) [5]. La contribución de las emisiones de los GEI de las diferentes categorías en términos de CO₂ equivalente en 2002, es la siguiente: energía representó 61%; le siguen las categorías de USCUSS 14%—cifra preliminar—; desechos 10%; procesos industriales 8% y agricultura 7%.

Para la estimación de las emisiones de la categoría de USCUSS, se estandarizó la clasificación de vegetación y uso del suelo a nivel histórico en México. Las estimaciones para esta categoría corresponden a promedios anuales de GEI para el periodo de 1993-2002. En términos de CO₂, la categoría de USCUSS aporta un total de emisiones de 99,760 Gg. El 64.63% o 64,484 Gg de las emisiones corresponde a la combustión y descomposición de biomasa aérea asociada a los procesos de conversión de bosques a otros usos; las emisiones derivadas de los suelos minerales y áreas agrícolas (30.41% o 30,344 Gg-Carbono orgánico en suelos— y 4.94% o 4,932 Gg de emisión en bosques manejados. La captura de carbono en tierras abandonadas (12,883 Gg) se descuenta del total de emisiones de la categoría, el balance de las emisiones, menos la captura de carbono, reporta que la categoría de Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura, aporta una emisión neta de GEI de 86 877 Gg. La generalización de los datos promedio de emisiones en la categoría no permite realizar análisis de tendencias y comparación con otras categorías de emisión, porque no se cuenta con datos para hacerlo y no se dispone de mediciones directas emitidas por fuentes fijas y de área en México (Semarnat/INE, 2006:33).

JUSTIFICACIÓN

El proyecto que se propone se ubica en el contexto de la Estrategia Nacional de Acción Climática para reducir la vulnerabilidad de los diversos sectores socioeconómicos y ambientales del país frente a condiciones extremas del clima, así como en los objetivos del área estratégica de investigación de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Universidad Autónoma del Estado de México y en las líneas de investigación del cuerpo académico Estudios Territoriales y Ambientales, del Centro de Investigación en Planeación Territorial de la Facultad de Planeación Urbana y Regional.

El desarrollo de la investigación se fundamenta en los siguientes aspectos principales:

- No obstante que la categoría de USCUS es la segunda fuente de emisión de gases de efecto invernadero en el país, se ha avanzado poco en el estudio de las emisiones de GEI que corresponden a la combustión y descomposición de biomasa aérea asociada a los procesos de conversión de bosques a otros usos y las emisiones derivadas de los suelos minerales y áreas agrícolas.
- La importancia de las emisiones de GEI producidas por el cambio de uso del suelo (10.49%), así como la contribución conjunta de las categorías de USCUS (14%) y agricultura (7%)¹, aunado a la carencia generalizada de mediciones directas emitidas por fuentes de área, requiere de estudios en escalas regionales y locales, que aporten información sobre los procesos de emisión y absorción de gases de efecto invernadero asociados a los cambios de uso del suelo en diversos ecosistemas terrestres, particularmente en los templados y tropicales, los cuales se consideran los más afectados (Challenger, 2004, Barton y Merino, 2004: 24).

¹ La categoría de agricultura incluye las emisiones provenientes de cultivos y manejo de suelos y pecuarias: fermentación entérica y manejo de estiércol, los principales gases son CH₄ y N₂O. Para el periodo 1990–2002, las emisiones promedio de CH₄ representan 84% de la categoría y las de N₂O el 16% restante. Asimismo, se aprecia una disminución en las emisiones de la categoría, de 47,427 a 46,146 Gg, derivada posiblemente de la importación de granos básicos como el arroz y del estancamiento del sector pecuario Semarnat/INE, 2006:33).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una primera aproximación a la diversidad de los ecosistemas terrestres del Estado de México, se expresa en conjuntos de tierras que integran las provincias fisiográficas del Sistema Volcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur, estas son las subprovincias de Mil Cumbres, los llanos y sierras de Querétaro en Hidalgo, lagos y volcanes de Anáhuac, la depresión del Balsas y las sierras y valles Guerrerenses (INEGI, 1987). Por su ubicación geográfica y composición litológica, en la entidad prevalecen formaciones y suelos de origen volcánico, así como climas templados y vegetación de bosque en su porción norte, en la porción más austral, las características se corresponden con formaciones y litologías calcáreas, climas cálidos y selva baja. En cada uno de estos ecosistemas, las interrelaciones, combinaciones y distribución espacial de los componentes del medio natural y social, expresarán la diversidad geográfica, los procesos ecológicos y sociales implicados en el uso, cambio del uso del suelo y la cobertura vegetal.

Los datos de uso del suelo y vegetación para el Estado de México indican que 46% de su superficie es agrícola, 14.7% está ocupada por pastizal, 18.2% por bosque; la selva y el matorral xerófilo ocupan cada uno 0.7%, otra vegetación, las áreas sin vegetación, los cuerpos de agua y las áreas urbanas ocupan 0.2%, 0.5%, 0.8% y 3.9% de la superficie total, respectivamente. La evidencia de la perturbación y deterioro de la vegetación original, se expresa en el 14% de la superficie ocupada por vegetación secundaria asociada al bosque y selva (INEGI, 2008).

En la entidad, la agricultura de temporal es la más extendida, se desarrolla en estrecha relación con la actividad pecuaria, la cual se presenta en áreas de bosque y pastizal inducido, éste permite inferir la existencia de actividades pecuarias o antiguas tierras agrícolas que han terminado por modificar totalmente la vegetación original. Los recursos forestales se encuentran distribuidos principalmente en núcleos agrarios de propiedad social (ejidos y comunidades agrarias), éstos acusan problemas severos de deterioro y perturbación atribuibles tanto a los habitantes de las comunidades como a la intervención de agentes externos (INEGI, 2003). De acuerdo con información de la Comisión Nacional Forestal, en el periodo 1970-2003 se registraron en la entidad 89

345 incendios forestales, entre 1991 y 2000 se produjo 53% de éstos, generalmente en este tipo de siniestros el área afectada es considerablemente mayor que la incendiada y con frecuencia es ocasionada por la falta de control de las quemas con fines agropecuarios (Conafor, 2005). El planteamiento general de la investigación sostiene que los cambios de uso del suelo en los ecosistemas terrestres templados y cálidos del Estado de México, causados por la expansión de las actividades agropecuarias, tienen efectos directos e indirectos sobre el cambio climático, los primeros se expresan en el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a las inapropiadas prácticas de manejo de las tierras (uso excesivo de fertilizantes, prácticas de roturación de la tierra, quemas agropecuarias periódicas, pastoreo excesivo y nulo control de la defecación del ganado, entre otras) y los segundos se expresan en la disminución, fragmentación y deterioro de las coberturas vegetales, así como en la degradación de los suelos, lo cual ocasiona la eliminación de sumideros de carbono atmosférico, fundamentales para regular los cambios del clima local y global.

Objetivo general

Estimar la emisión y absorción de gases de efecto invernadero, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) asociados al cambio de uso del suelo y a las prácticas de manejo de las tierras de uso agropecuario en ecosistemas terrestres seleccionados del Estado de México, con el objeto de evaluar los impactos locales y aportar estrategias de adaptación socio-productiva ante el cambio climático.

Objetivos específicos

1. Caracterizar los sistemas de uso de la tierra en ambientes templados y cálidos de acuerdo con variables físico-naturales y antropogénicas.
2. Caracterización de las propiedades y limitaciones de los suelos en los sistemas de uso de la tierra.

3. Evaluar los cambios de uso del suelo y su correspondencia con el incremento de la superficie de uso agropecuario en el periodo 1985-2005.
4. Caracterizar las prácticas de manejo de la tierra en sistemas de producción seleccionados, agrícolas, pecuarios y forestales.
5. Estimar la emisión de dióxido de carbono (CO_2) en dos ciclos agrícolas producidos por la combustión y descomposición de la cubierta vegetal provocada por las quemas periódicas para expandir la frontera agropecuaria.
6. Estimar las emisiones y absorciones de CO_2 en los depósitos de carbono en la biomasa y en los suelos.
7. Estimar emisiones de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) en eses fecales de ganado y en el suelo.
8. Elaborar un balance de las pérdidas y ganancias de GEI, como base para el diseño de estrategias que favorezcan la mejora de las prácticas agropecuarias y la adaptación al cambio climático.
9. Generar escenarios sobre la situación del cambio de uso de suelo, directamente relacionado con actividades agropecuarias, al 2020 y sus consecuencias en los impactos esperables bajo cambio climático.

METODOLOGÍA

Las unidades territoriales seleccionadas para el análisis del cambio de uso del suelo y su correspondencia con el incremento de la superficie de uso agropecuario, parten de considerar los sistemas de uso de la tierra como unidad de observación regional, y de parcelas seleccionadas como unidad de observación local. Los sistemas de uso de la tierra o formas de aprovechamiento de un área específica abarcan los atributos de la biosfera —suelo, geología, hidrología, poblaciones vegetales y animales—, así como los factores sociales que condicionan su explotación y producen alteraciones ambientales (FAO,1992). Incluye la propiedad de la tierra y los conflictos generados por su apropiación, comprende la identificación del uso actual, los usos adecuados y los conflictos entre usos del suelo. En el estudio de los sistemas de uso de la tierra,

es fundamental el conocimiento de las cubiertas y usos del suelo. Cubierta del suelo se refiere a la naturaleza o forma física de la superficie del terreno, que puede ser identificada visualmente en campo o a través de medios de percepción remota; el uso del suelo² expresa el aprovechamiento o los fines económicos de las cubiertas del suelo, algunas cubiertas llevan implícito un uso (cultivos/uso agrícola) aunque no siempre hay una relación directa bosque/uso silvícola, conservación o recreación (Ramírez, 2001: 39 y 40). Un estudio de cobertura y uso del suelo supone analizar y clasificar los diferentes tipos de cobertura y usos asociados que el hombre practica en una zona o región determinada; su importancia radica en que a escala global, regional y local destacan cambios en el uso del terreno, lo que está transformando la cobertura a un paso acelerado, los estudios sobre este tema son fundamentales y su principal aplicación es la evaluación del impacto ambiental de las actividades humanas, así como la ordenación y planificación territorial (López G. *et al.*, 2001: 56).

El uso de información cartográfica y demográfica ha sido muy útil en la caracterización de los procesos de cambio de uso del suelo (Bebí, 1995), una de las capacidades de esta información es que permiten delinear la estructura de los patrones espaciales de unidades de estudio en escalas regionales (Edwards, 2003). Las fuentes de datos incluyen la información proporcionada por diversos organismos que dependen de los gobiernos federal, estatal y municipal (INEGI, SAGARPA, IGECEM, INE, RAN, etcétera), datos censales, datos sobre uso de la tierra, producción agrícola, productividad, población, entre otras variables, así como imágenes satelitales, fotos aéreas, reportes y estudios específicos, cartografía temática: uso del suelo 1: 50,000 y 1: 250,000, vegetación 1: 1000000, frontera agrícola, 1983, climas, edafología, geología, corrientes superficiales y subterráneas 1: 50, 0000 y 1: 250, 000, los censos de población (1990, 2000 y conteo, 2005), censo agropecuario, 1994, censo ejidal,

² El uso del suelo es la asignación funcional y temporal de factores como agricultura, ganadería, industria, urbanización; asignados por el ser humano asociado a su distribución y su entorno. Un estudio de cobertura y uso del suelo supone analizar y clasificar los diferentes tipos de cobertura y usos asociados, que el hombre practica en una zona o región determinada (Queriat, 1986).

2003 y estadísticas del Registro Agrario Nacional y el Inventario Nacional Forestal. La información estadística y cartográfica se trabajará en una base de datos relacional cartográfica y alfanumérica en ambiente de Arc View y Arc Gis. Se utilizarán diversos métodos de análisis (modelos estadísticos), análisis multivariado, superposición de mapas, clasificación de atributos, cálculo de indicadores e índices, de acuerdo con las características de la información disponible.

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Las etapas de investigación son tres, en la primera se identificarán los sistemas de uso de la tierra en distintos ambientes y su relación con los núcleos agrarios y prácticas de manejo de las tierras. Se analizará la expresión espacial de los cambios de uso del suelo asociados a la expansión de la superficie agropecuaria; en la segunda etapa se aplicarán procedimientos específicos para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero *in situ* y en la tercera parte, se integrarán los resultados, para dar cuenta del balance de las emisiones y absorciones de GEI, su impacto local y contribución al cambio climático.

Parte I

Establecer los límites de los sistemas de uso de la tierra. Se procederá a su caracterización física y sociodemográfica, localización geográfica, clima, fisiografía, orografía, topografía, geología, edafología, hidrología, forma de drenaje y cobertura vegetal, distribución de los asentamientos y la población, educación, vivienda, población económicamente activa. Caracterizar las condiciones del suelo en relación con la litología, hidrología y clima, se utilizarán las cartas temáticas edafología, geología, corrientes superficiales y subterráneas 1: 50,000 y 1: 250,000. Asimismo, se establecerán sus características con base en el uso adecuado e inadecuado.

Productos cartográficos: carta de pendientes, carta de uso actual de la tierra y cubierta vegetal y carta de aptitud de las tierras. Adicionar a los sistemas de uso de la tierra, la distribución de los núcleos agrarios (ejidos y comunidades), formas de organización para el trabajo, tecnología utilizada y productividad. Caracterización de la propiedad de la tierra, derechos y restricciones para su aprovechamiento, sistemas agrícolas, sistemas pecuarios, sistemas forestales, sistemas mixtos y sistemas de recolección, y otros usos: zonas de protección, cubierta vegetal total, pastizal, áreas de reserva y áreas urbanas.

Productos cartográficos: carta de la distribución de los núcleos agrarios en relación con los sistemas y categorías de uso de la tierra, carta de organización social para el aprovechamiento de la tierra y carta de tenencia de la tierra y su relación con indicadores de marginación y pobreza.

Analizar el cambio de uso del suelo a través de material y técnicas de percepción remota en el periodo de 1985 a 2005,³ con la finalidad de identificar la cubierta terrestre/uso de la tierra, detectar cambios en la cubierta terrestre y estimar las áreas de tierra en situación de conversión o de abandono, áreas incendiadas (que es uno de los principales factores que causan conversiones en los trópicos), tierras que mantienen su uso original, alteraciones de la cubierta vegetal: deforestación, áreas erosionadas, áreas sin aprovechamiento, áreas deterioradas, áreas conflictivas y de usos inapropiados. Se atenderá en lo posible, las orientaciones sobre buenas prácticas para uso de la tierra, cambio y uso de la tierra y silvicultura (Penman, Jim *et al.*, IPCC, 2005: 153), para establecer las categorías esenciales y hacer referencia a las emisiones por fuentes, así como a las absorciones por sumideros susceptibles de evaluarse.

³ Los cambios de uso de la tierra producen un efecto lineal en la materia orgánica del suelo durante 20 años antes de alcanzar un nuevo equilibrio. No es realista proyectar el cambio de uso de la tierra más allá de diez años, ya que las tasas y los patrones de deforestación están sujetos a factores biofísicos, socioeconómicos y políticos (Penman, Jim *et al.*, IPCC, 2005: 153).

Productos cartográficos: cartografía evolutiva de los cambios de uso del suelo, índices e indicadores de los cambios espaciales, así como la determinación de categorías de uso de la tierra.

Categorías esenciales para cambio y uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS)

Tierras que no han cambiado su uso: tierras forestales, tierras agrícolas, praderas, humedales y asentamientos.

Tierras convertidas a otros usos: conversión en tierras forestales, conversión en tierras agrícolas, conversión en praderas, conversión en humedales, conversión en asentamientos y conversión en otras tierras, deforestación que tenga lugar.

Categorías esenciales para agricultura

Emisiones de CH₄ procedentes de la fermentación entérica del ganado doméstico. Emisiones de CH₄ procedente del manejo de estiércol. Emisiones de N₂O procedentes del manejo de estiércol.

Emisiones de CH₄ y N₂O procedentes de la quema de sabanas. Emisiones de CH₄ y N₂O de la quema de residuos agrícolas, evaluar por separado. Emisiones directas de N₂O procedentes de suelos agrícolas, emisiones indirectas de N₂O del nitrógeno utilizado en agricultura.⁴

⁴ En el sector de UTCUTS, las estimaciones relativas a las emisiones o a las absorciones de CO₂, N₂O y CH₄ se prepararán por separado, ya que los métodos, los factores de emisión y los parámetros relacionados cambian para cada gas. El análisis puede realizarse utilizando emisiones de gases equivalentes a CO₂, que se calculan sobre la base de los valores del potencial de calentamiento atmosférico (PCA) que figuran en las *Directrices para la preparación de las comunicaciones nacionales de las partes incluidas en el Anexo I de la Convención, Primera parte: Directrices de la Convención Marco para la presentación del Informe sobre los Inventarios Anuales*, y en el anexo del Protocolo de Kyoto.⁶ (Penman, Jim *et al.*, IPCC, 2005).

Dado que es posible modificar la lista de las categorías de fuente del IPCC para reflejar circunstancias particulares del país considerado, se analizará la correspondencia entre la clasificación nacional de los usos de la tierra y la clasificación por defecto del IPCC.

PARTE II

Las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio y uso de la tierra y silvicultura (OBP-UTCUTS), proporciona orientación para estimar los cambios, las reservas de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero, en virtud de los párrafos 3 y 4 del artículo 3 y de los artículos 6 y 12 del Protocolo de Kyoto (Penman, Jim *et al.*, IPCC, 2005).

La metodología está fundamentada en dos ideas vinculadas: i) se presupone que el flujo de CO₂ hacia la atmósfera o desde ella es igual a la variación de las reservas de carbono en la biomasa y el suelo existentes, y ii) es posible estimar la variación de las reservas de carbono estableciendo en primer lugar las tasas de cambio de uso de la tierra y la práctica utilizada para llevar a efecto ese cambio (por ejemplo, quema, corta, tala selectiva, etc.). En segundo lugar, se utilizan supuestos o datos simples sobre su efecto en las reservas de carbono y la respuesta biológica a un uso de la tierra dado. El método puede generalizarse y aplicarse a todos los depósitos de carbono (es decir, a la biomasa sobre el suelo y bajo el suelo, a la madera muerta, a los detritus y a los suelos), convenientemente subdivididos para reflejar las diferencias entre ecosistemas, zonas climáticas y prácticas de gestión.

La línea metodológica orienta sobre la estimación de la variación de las reservas de carbono, basándose en las tasas de pérdida y de ganancia de carbono por superficie de uso (En las aproximaciones de primer orden, los “datos de actividad” están expresados en términos de superficie de uso de la tierra o de cambio de uso de la tierra) y examina varias fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero distintos de CO₂ procedentes del uso de la tierra (quemadas de sabanas y de residuos agrícolas, emisiones directas e indirectas de N₂O provenientes de suelos agrícolas, y las

emisiones de CH₄ provenientes de la producción de arroz (N₂O y CH₄), procedentes de incendios forestales, N₂O procedente de bosques gestionados (fertilizados) del drenaje de suelos forestales, N₂O y CH₄ procedentes de humedales gestionados y emisiones de N₂O del suelo tras una conversión de uso de la tierra.

Para efectos de la presente investigación y ante la ausencia de factores de emisión específicos⁵ de GEI en áreas, en un primer nivel de análisis, se utilizarán datos de actividad a escala espacial gruesa, estimaciones de tasas de deforestación, estadísticas de producción agrícola, o mapas de la cubierta terrestre disponibles a nivel nacional. Se considerará la dependencia de los sistemas de uso de la tierra del clima y las prácticas de gestión, por lo que las estimaciones se realizarán en época seca y húmeda, con la finalidad de identificar la variabilidad de las emisiones⁶ en distintas categorías de uso de la tierra.

Para cada categoría de uso de la tierra, se evaluará cuáles de sus subcategorías son significativas; en términos de elección metodológica para la estimación de emisiones y absorciones de gases.⁷ Se realizarán las estimaciones de emisiones de gases en las siguientes subcategorías:⁸ biomasa viva, materia orgánica muerta, suelos (CO₂); incendios, mineralización de materia orgánica en el suelo; aportes de nitrógeno; cultivos de suelos orgánicos (N₂O), incendios y heces fecales de ganado (CH₄).⁹

⁵ Tomando en cuenta que las actividades de UTCUTS afectan a grandes superficies geográficas.—además de la compleja naturaleza de los procesos biológicos que en ellas tienen lugar—, no resulta práctico basar la preparación de inventarios nacionales únicamente en las mediciones directas de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero. Por consiguiente, los inventarios se basan en datos obtenidos mediante muestreo en mediciones de campo y estudios de la tierra.

⁶ Las unidades de las emisiones/absorciones de CO₂ y de las emisiones de gases distintos del CO₂ se notifican en giga gramos (Gg). Para convertir toneladas de C en Gg de CO₂, se multiplicará el valor inicial por 44/12 y por 10-3. Para convertir kg de N₂O-N en Gg de N₂O, se multiplicará el valor por 44/28 y por 10-6.

⁷ Se sugiere la posibilidad de escalar los valores experimentales de fuentes de emisión a grandes extensiones (IPCC, 2005: 3.65).

⁸ El concepto de categoría es una caracterización de las subcategorías. Una subcategoría es significativa cuando representa entre 25 y 30% de las emisiones/absorciones para el conjunto de la categoría.

⁹ Para tierras forestales que siguen siendo tierras forestales (ITFF), conlleva una estimación de la variación de las reservas de carbono en cinco depósitos de carbono (biomasa sobre el suelo, biomasa bajo el suelo, madera muerta, detritus y materia orgánica del suelo), y de las emisiones de gases distintos del CO₂ procedentes de esos depósitos.

En la identificación de la variación de las reservas de carbono en la biomasa viva, se tomará en cuenta el incremento de ésta y las pérdidas que incluyen las talas, la recolección de leña, y las pérdidas naturales. La cantidad de carbono almacenada en tierras agrícolas permanentes y emitida o absorbida de éstas dependerá del tipo de cultivo, de las prácticas de gestión y de las variables del suelo y del clima, mientras que la conversión en tierras agrícolas de tierras destinadas a otros usos puede afectar de diversas maneras a las reservas de carbono y a otros gases de efecto invernadero.¹⁰

MUESTREO DE EMISIONES EN CATEGORÍAS DE TIERRA SELECCIONADAS

Para la estimación de las emisiones de GEI sobre el terreno, se realizarán mediciones por categorías de superficie de tierras, representativos de las condiciones medioambientales y diferentes regímenes de gestión en ecosistemas templados y cálidos, así como en las estaciones seca y húmeda del año, con el fin identificar la variabilidad climática¹¹ y la evolución de las tierras. La información sobre las superficies de tierra, la acumulación de biomasa y el carbono del suelo u otros datos se utilizarán para estimar los cambios que se producen en el uso de la tierra o en el carbono almacenado.

¹⁰ La conversión en tierras agrícolas de tierras forestales, praderas y humedales suele producir una pérdida neta de carbono de la biomasa y de los suelos hacia la atmósfera. Sin embargo, las tierras agrícolas establecidas en áreas anteriormente de vegetación escasa o muy perturbadas (por ejemplo, dedicadas a la minería) pueden arrojar una ganancia neta tanto del carbono de la biomasa como del suelo. Cuando en una tierra agrícola perenne se vuelven a plantar cultivos idénticos o diferentes, las tierras seguirán siendo de cultivo; por consiguiente, la variación de las reservas de carbono debería estimarse utilizando métodos aplicables a las tierras agrícolas que lo siguen siendo.

¹¹ Habría que observar a lo largo del tiempo ubicaciones representativas de factores que pudieran influir en la variabilidad anual e interanual de las emisiones, algunos de esos factores son la profundidad y la variación del tipo de suelo y el drenaje. Es probable que las emisiones varíen de una región geográfica a otra, especialmente entre diferentes ecorregiones, zonas climáticas y basamentos geológicos. Los factores de emisión se determinan a partir del valor medio de las emisiones en ubicaciones representativas, para ello habrá que tener en cuenta la importancia de cada zona geográfica y de cada periodo estacional en relación con el país.

Se realizará un muestreo aleatorio¹² sistemático, basado en una estratificación de categorías de tierra.¹³ Para la realización del muestreo se utilizarán parcelas representativas como unidad de observación, agrupadas en pequeños conjuntos; la distancia entre las parcelas deberá ser amplia para evitar mayores correlaciones entre parcelas, teniendo en cuenta el tamaño (para el muestreo de los bosques). Se deberá disponer de los conglomerados de parcelas de manera sistemática utilizando una cuadrícula normal que representa al azar la superficie considerada. La razón de que el muestreo aleatorio sistemático sea, por lo general, superior al muestreo aleatorio simple radica en que las parcelas que sirven de muestra se reparten uniformemente en todas las partes de la superficie analizada. Para estimar las variaciones en las emisiones se utilizarán parcelas permanentes de muestreo y se considerarán algunas parcelas temporales que servirán de muestra testigo para determinar si las condiciones en dichas parcelas son distintas de las que se dan en las parcelas permanentes.

1. Se evaluarán las superficies o los cambios en las superficies relativas a las clases de uso de la tierra a través de un muestreo, que puede ser por medio de la estimación de las proporciones, o bien por estimación directa de la superficie. En el primer caso, será necesario conocer la superficie total de la región examinada¹⁴ y que las

¹² Al realizar un muestreo aleatorio de una población determinada, es posible obtener una estimación cuantitativa de las incertidumbres. Éstas se presentan como un intervalo de confianza teniendo en cuenta el rango en el que se considera que el valor real de una cantidad incierta representa una probabilidad determinada. En las *Directrices del IPCC* se recomienda utilizar un intervalo de confianza de 95%, ya que así existe 95% de probabilidades que se obtenga el valor real desconocido. Asimismo, puede expresarse en porcentaje de incertidumbre, que equivale a la mitad de la magnitud del intervalo de confianza dividido por el valor de la cantidad estimada.

¹³ Por ejemplo, un país puede dividirse en una región de tierras bajas (que presentan algunas de las características de las categorías del uso de la tierra consideradas) y en una región de tierras altas (con diferentes características de las categorías correspondientes). Si cada estrato es homogéneo puede conseguirse una estimación general precisa utilizando una muestra limitada de cada estrato.

¹⁴ Siempre que se sepa cuál es la superficie total, conviene estimar las superficies y los cambios en ellas por medio de la evaluación de las proporciones puesto que es el procedimiento que permite obtener la mayor exactitud.

muestras ofrezcan solamente las proporciones de los distintos tipos de uso de la tierra. En el segundo caso, no es necesario conocer la superficie total. Ambos enfoques se basan en la evaluación de un número determinado de unidades de muestreo situadas en el área de estudio. Las unidades de muestreo pueden seleccionarse utilizando el muestreo aleatorio simple o el muestreo sistemático. Cuando la superficie total se desconoce, puede aplicarse un procedimiento alternativo que implica la evaluación directa de las superficies con distintos tipos de uso de la tierra.

2. Se realizará un muestreo¹⁵ para estimar el carbono almacenado y las emisiones^{16, 17}. Las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero de los suelos pueden medirse en varios puntos de las parcelas de muestreo utilizando sistemas portátiles o transportables de muestreo de gases (cubetas y analizador de gases). La verificación de las variaciones del carbono en el suelo en tierras en las que se está experimentando una transición de uso puede realizarse comparando los depósitos de carbono registrados

¹⁵ El aumento del tamaño de las muestras permite obtener una mayor precisión, y una población heterogénea (como las poblaciones con mayor variación dentro de la población considerada) requiere muestras de mayores dimensiones para lograr cierta precisión.

¹⁶ Las variaciones notificadas en el carbono almacenado en la biomasa pueden verificarse mediante mediciones directas de los cambios de los depósitos, sobre el suelo y bajo el suelo (bosques maduros, sistemas agroforestales, praderas repobladas vegetalmente, etc.). También pueden verificarse las emisiones y absorciones procedentes de los suelos (materia orgánica). Un muestreo repetido del suelo en un área o región determinada puede ser un procedimiento pertinente para detectar posibles variaciones en el carbono del suelo en diferentes usos de la tierra (bosques, praderas, tierras agrícolas).

¹⁷ Generalmente, las emisiones y absorciones más importantes en relación con el sector de UTCUTS son de dióxido de carbono (CO₂). Sin embargo, el sector de UTCUTS también comprende gases de efecto invernadero distintos del CO₂ (principalmente emisiones) liberados por la fertilización de los bosques, las actividades de desbroce de tierras, la preparación del suelo para la forestación/reforestación, la gestión de praderas y tierras agrícolas, y otras prácticas. Entre estos gases de efecto invernadero distintos del CO₂ están el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (NMVOC). Las emisiones y absorciones de CO₂ pueden determinarse y verificarse directamente en función de los cambios experimentados en los depósitos de carbono en la biomasa o en los suelos. Respecto a los gases distintos del CO₂, se pueden medir sus flujos a fin de verificar las estimaciones de las emisiones anuales.

en las tierras en que ha habido transición con depósitos de carbono de tierras en las que prevalece el mismo uso de la tierra. En las parcelas se evaluarán las siguientes variables: biomasa¹⁸ (vegetación) y el contenido de carbono en el suelo. Estos elementos se medirán mediante un análisis de laboratorio de las muestras para obtener las reservas reales o las emisiones y las absorciones de gases de efecto invernadero a nivel de la parcela. Se verificará en una fracción (pequeña) de las parcelas, para poder evaluar así la magnitud de los errores de medición. Esta fracción puede ser del orden del 1 al 10%, dependiendo del tamaño real de la muestra y del coste de las mediciones de control.

ETAPAS GENERALES DE INVESTIGACIÓN

Con la finalidad de cumplir con los objetivos de la misma y el diseño de investigación propuesto, se establecen las siguientes etapas de trabajo.

Etapas I. Estrategias de trabajo

Socialización y discusión sobre las estrategias de trabajo

Meta II. Integración del equipo y organización de actividades

Descripción de la actividad. Establecer reuniones permanentes en función de las necesidades del proyecto, implementar la recopilación de información bibliográfica,

¹⁸ La cantidad de carbono en un árbol se obtiene, por lo general, calculando primero el volumen a partir de modelos basados en parámetros, como las especies de árboles, el diámetro y la altura del árbol, considerados como variables iniciales, y utilizando después otros modelos o factores de expansión estáticos para convertir el volumen en biomasa y la biomasa en carbono.

cartográfica, estadística etc., selección de datos y variables de información, captura de información.

Productos. Cronograma, integración de una base de datos de la información disponible en medios escritos y electrónicos, elaboración formal del proyecto de cada participante, considerando los objetivos, las actividades que desarrollará y los productos a obtener dentro del proyecto general.

Etapa II. Sistemas de uso de la tierra

Descripción de la etapa. Se delimitarán y analizarán los sistemas de uso de la tierra, se procederá a su caracterización física y socio-demográfica; se identificarán los cambios de uso del suelo asociados a la expansión de la frontera agropecuaria y su incidencia en los procesos de emisión y absorción de gases efecto invernadero en escalas regionales.

Descripción de las metas. Analizar la expresión espacial de los cambios de uso del suelo asociados a la expansión de la superficie agropecuaria.

Descripción de la actividad. Análisis de la información para caracterizar los sistemas de uso de la tierra. Caracterización de las propiedades y limitaciones de los suelos en los sistemas de uso de la tierra. Identificar los sistemas de uso de la tierra en distintos ambientes y su relación con los núcleos agrarios y prácticas de manejo de las tierras.

Sistematización de la información terrestre, cartografía temática y sintética sobre los cambios de uso del suelo.

Definir las categorías esenciales para cambio y uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS).

Productos. Cartografía temática: pendientes, uso actual de la tierra y cubierta vegetal, aptitud de las tierras, distribución de los núcleos agrarios en relación con los sistemas y categorías de uso de la tierra, organización social para el aprovechamiento de la tierra, tenencia de la tierra y su relación con indicadores de marginación y pobreza.

Cartografía sintética: evolución de los cambios de uso del suelo y su relación con el avance de la frontera agropecuaria, índices e indicadores de los cambios espaciales, determinación de categorías de uso de la tierra.

Evaluar los cambios de uso del suelo y su correspondencia con el incremento de la superficie de uso agropecuario en el periodo 1985-2005, recorridos de verificación de campo, caracterizar las prácticas de manejo en sistemas de producción seleccionados, agrícolas, pecuarios y forestales, recorridos de verificación campo, monitoreo de GEI.

Etapa III. Muestreo de emisiones de GEI

Descripción de la etapa. Estimar la emisión de dióxido de carbono (CO_2) en dos años agrícolas producidos por la combustión y descomposición de la cubierta vegetal provocada por las quemas periódicas para expandir la frontera agropecuaria.

Estimar las emisiones de CO_2 en los depósitos de carbono en la biomasa y en los suelos.

Estimar emisiones de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) en heces fecales de ganado y en el suelo.

Descripción de la meta. Estimar los cambios y las emisiones de gases de efecto invernadero producidos por el cambio de uso del suelo asociado a las actividades agropecuarias.

Descripción de la actividad. Para la estimación de las emisiones de GEI sobre el terreno, se realizarán mediciones por categorías de superficie de tierras, representativos de las condiciones medioambientales y diferentes regímenes de gestión en ecosistemas templados y cálidos, así como en las estaciones seca y húmeda del año, con el fin de identificar la variabilidad climática y la evolución de las tierras.

Productos de la etapa. Sistematización de los datos aportados por la medición de los gases de efecto invernadero en escala local. Realizar el balance de las pérdidas y ganancias de gases efecto invernadero.

Etapas IV. Resultados

Descripción de la etapa. Elaborar un balance de las pérdidas y ganancias de GEI, elaborar escenarios prospectivos, como base para el diseño de estrategias que favorezcan la mejora de las prácticas agropecuarias y la adaptación al cambio climático.

Descripción de la meta. Integración de los resultados de la etapa dos y tres como base para generar escenarios sobre la situación del cambio de uso de suelo, directamente relacionado con actividades agropecuarias al 2020 y sus consecuencias en los impactos esperables bajo cambio climático.

Descripción de la actividad. Reuniones del equipo de trabajo calendarizadas, análisis de las fortalezas y debilidades desde la perspectiva de la temática abordada, plan de acción que contenga las estrategias y propuestas para mejorar las prácticas agropecuarias y la adaptación al cambio climático.

Productos de la etapa. Informe final, que determine el marco conceptual y metodológico, así como el desarrollo y la aplicación de la metodología para: i) el análisis de los factores relacionados con las tendencias en el cambio de uso de suelo y la cuantificación de las emisiones de GEI por dichos cambios; ii) estimar la situación del cambio de uso de suelo, directamente relacionado con actividades agropecuarias, al 2020, y iii) determinar los impactos causados por el cambio de uso de suelo, relacionados con actividades agropecuarias.

DISCUSIÓN

Las diversas vertientes que se desprenden de esta línea de investigación, abordarán desde la perspectiva interdisciplinaria de las Ciencias Ambientales, una problemática que no ha sido suficientemente desarrollada en el ámbito internacional y nacional, identificarán los elementos del cambio de uso de suelo relacionados con las prácticas y las actividades agropecuarias y la emisión de gases de efecto invernadero. Los impactos tecnológico, social, económico y ecológico esperados se sintetizan en la sistematización de los procedimientos

de medición y recogida de datos sobre la emisión y absorción de los gases de efecto invernadero en escalas regionales y locales; contribuir al cumplimiento al Programa Especial de Cambio Climático y los compromisos contraídos ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), aporta bases científicas para el diseño de políticas públicas que permitan mejorar las prácticas de manejo de la tierra en beneficio del ambiente y de la población, estrategias de adaptación social y productiva ante el cambio climático y proyectar la situación futura, para el diseño de estrategias que permitan reducir los impactos locales asociados al cambio climático.

CONCLUSIÓN

La interconexión de los cambios de uso de suelo, las actividades agropecuarias y la emisión de gases de efecto invernadero, destaca su importancia como base para el diseño de políticas de desarrollo económico y rural, con una visión multidimensional, que incluya las necesidades de segmentos vulnerables de población y los efectos que produce la pobreza y la marginación en el uso y manejo de los RN, y su contribución al cambio climático, así como proponer acciones que coadyuven en la formulación de programas y proyectos que habiliten a la población para enfrentar la vulnerabilidad social, económica y ambiental y mitiguen el deterioro de los ecosistemas terrestres en el Estado de México. Proveer información para la toma de decisiones, abrir los campos de investigación relacionados con el impacto social y económico del cambio climático, crear colaboraciones y sinergias con otros grupos de investigación e instituciones y formar recursos humanos para la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Barton Bray, David y Merino Pérez, Leticia (2004), *La experiencia de las comunidades forestales en México*, INE-Semarnat, México, pp. 1-271.

- Bebí, A. (1995), *Applying Ecology*, Chapman & Hall, Londres, Reino Unido, 5-599.
- Conafor, Comisión Nacional Forestal (2005), *Estadístico anual de incendios forestales 1970-2003*, Coordinación General de Conservación y Restauración Forestal, Gerencia Nacional de Incendios Forestales, México.
- Challenger, Antony (2004), “Los ecosistemas templados de México”, *Seminario Desarrollo sustentable y ecosistemas templados de Durango*, 6 de agosto, Dirección de la Reserva de la Biosfera La Michilía, CONANP, Semarnat. Durango, México.
- Edwards, T. C. Jr., G. C. Moisen, T. S. Frescino y J. J. Lawer (2003). “Modelling Multiple Ecological Scales to Link Landscape Theory to Wildlife Conservation”, *Landscape Ecology and Resource Management. Linking Theory with Practice*, J. A. Bissonette and I. Storch (Eds). Island Press, Washington, EE.UU., pp. 153-172.
- INEGI (1987), *Síntesis geográfica del Estado de México*, México.
- _____(2003), *Resultados del Censo Ejidal, 2001*, Sistema de consulta versión 1.0, Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Ecología (2006), *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2002*, México.
- Instituto Nacional de Ecología/ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006), *Tercera comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*, INE, México, pp. 27-209
- Jenkinson, D.S. y Powlson, D.S. (1976), The effects of biocidal treatments on metabolism in soil I. Fumigation with chloroform, *Soil Biol. Biochem*, 8: 167-177.
- López Granados Erna Martha, Bocco Gerardo y Manuel Eduardo Mendoza Cantú (2001), “Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo en el caso de la ciudad de Morelia”, *Investigaciones Geográficas*, boletín del Instituto de Geografía, UNAM, núm. 45, pp. 56-76.
- Penman, Jim, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner (2005), *Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS)*, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), Programa del IPCC sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Organización Meteorológica Mundial (OMM), Suiza, pp. 1.5-1.11.
- Queriat, Pierre (1986), *Diagnóstico urbano*, UNAM, México.

- Ramírez Ramírez, Isabel (2001), “Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México. 1971-1994-2000”, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM, núm. 45, México, pp. 39-55.
- Rzedowski, Jerzy (1983), *La vegetación de México*, Limusa, México, pp. 7-397.
- S. Agnihotri, K. Kulshreshtha and S. N. Singh (1999), Mitigation strategy to contain methane emission from rice-fields, *Environmental Monitoring and Assessment*, 58: 95–104.
- Semarnat (2003), *Compendio de estadísticas ambientales 2002*, México.
- United Nations Framework Convention on Climate Change), UNFCCC (2006), *In-session workshop on climate change mitigation, Agriculture, Forestry and Rural Development*, SBSTA 24, 23, May 2006, Bonn, Hotel Maritim, Plenary I <http://unfccc.int/meetings/sb24/in-session/items/3647.php>
- United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC (2008), *Informe del taller sobre las cuestiones metodológicas relacionadas con la reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación de los bosques en los países en desarrollo, Convención Marco sobre el Cambio Climático*, Universidad de las Naciones Unidas en Tokio (Japón) del 25 al 27 de junio de 2008, FCCC/SBSTA/2008/11, pp. 1-18.

INTERNET

- Greenpeace, 2008 <http://www.greenpeace.org/espana/reports/gu-a-basica-sobre-cambio-clima>
 _____, 2008 <http://www.greenpeace.org/espana/campaigns/energ-a/causas/di-xido-de-carbono>).
- Universidad Autónoma del Estado de México <http://www.uaemex.mx/SIEA/>
- INEGI (2008), Consulta interactiva de datos Uso del suelo y vegetación (<http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/derivada/UsoSueloyVegetacion/bd/UsoSueloyVeg/UsoSueloVeg.asp?s=est&c=11906>, consulta 10/12/2008
- _____,(2008), Consulta interactiva de datos <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/derivada/UsoSueloyVegetacion/bd/UsoSueloyVeg/UsoSueloVeg.asp?s=est&c=11906>

CONTRIBUCIÓN DE LOS MÉTODOS PARA ESTIMAR EL CONTENIDO DE BIOMASA Y CARBONO EN BOSQUE TEMPLADO

Ma. Eugenia Valdez Pérez, ¹ María Estela Orozco Hernández,²

Carlos Jorge Aguilar Ortigoza, ³ Lorena Romero Salazar.³

¹ Centro Universitario Tenancingo, ² Facultad de Planeación Urbana y Regional,

³ Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado México

RESUMEN

El objetivo de este documento es presentar una revisión de los métodos para estimar la cantidad de biomasa y carbono en bosque templado. Se muestran los métodos numéricos aplicados para el cálculo de biomasa y carbono, las opciones espaciales para calcular los cambios de uso del suelo y a partir de esto estimar los contenidos de carbono por tipo de bosque se enuncian las propuestas para realizar los muestreos de campo; y se describen los modelos que existen en el mercado para valorar el contenido y emisión de carbono en los distintos reservorios, tanto a nivel cuantitativo como espacial. La conclusión es que es posible realizar estimaciones aproximadas de biomasa y carbono en bosques templados aplicando ecuaciones alométricas y factores de conversión para estimar el potencial de captura de carbono.

Palabras clave: biomasa, ecuaciones alométricas, captura de carbono.

CONTRIBUTION OF THE METHODS FOR ESTIMATING BIOMASS AND CARBON CONTENT IN TEMPERATE FOREST

ABSTRACT

The aim of this paper is to present a review of some methods that are used to estimate the amount of biomass and carbon in temperate forests. The numerical methods applied to calculate the biomass and carbon are shown as well as the spatial options for estimating changes in land use. From this estimation the carbon contents of forest type are listed and we establish proposals to conduct field sampling that describe the models on the market to assess the carbon content and the various reservoirs, both quantitative and spatial. The conclusion is that it is possible to make rough estimates of biomass and carbon in temperate forests using allometric equations and conversion factors to estimate the potential for carbon sequestration.

Keywords: biomass, allometric equations, carbon capture.

INTRODUCCIÓN

Los gases de efecto invernadero

México contribuye con casi 2% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (IPCC, 2006), los principales gases de efecto invernadero (GEI) son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). El primero es el resultado, en su mayoría, de la quema de combustible fósil; el segundo se genera por los depósitos de desechos sólidos, el tratamiento de aguas residuales, fugas de petróleo y gas natural y por las actividades agrícolas y; el tercero por la quema de combustibles fósiles y de residuos agrícolas. El gas que más se produce en nuestro país es el CO_2 , cuyos volúmenes de emisión, respecto a los GEI (millones de toneladas métricas) ascendieron a 351 (95.6%), 514 (96.3%) y 395 (95%) en 1994, 1996 y 1998, respectivamente (PNUMA *et al.*, 2006).

De acuerdo con los resultados del inventario de 1996, 31% se genera por el uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (USCUISS) y la agricultura, que incluye la captura de carbono en manejo forestal y en tierras abandonadas, emisiones directas de la tala forestal, emisiones retardadas de la limpieza de suelos y emisiones de los suelos (PNUMA, *et al.* 1 2006).

Entre los procesos que determinan el cambio de uso del suelo en México, se encuentra la deforestación; la degradación que implica una modificación en la vegetación natural, pero sin reemplazarla totalmente, y la fragmentación que se evidencia en el paisaje como pequeños relictos rodeados por superficies alteradas (Semarnat, 2006).

El cambio de uso del suelo es uno de los factores que mayor influencia tiene sobre la emisión de CO₂ a nivel mundial. En México, este fenómeno es particularmente importante, debido a que se encuentra entre los 20 países con mayores emisiones de los GEI (Ordóñez y Masera, 2001).

Los bosques de México representan un almacén de carbono aproximado de 8 GtC (mil millones de toneladas de carbono) (Masera *et al.*, 1997), cantidad equivalente a las emisiones mundiales actuales de CO₂. La capacidad de almacenamiento de estos bosques se está perdiendo rápidamente por los procesos de deforestación y degradación de los ecosistemas forestales (Ordóñez y Masera, 2001).

Una alternativa para reducir la cantidad de CO₂ en la atmósfera es absorber parte de este gas por la vegetación mediante el proceso de la fotosíntesis, y que las plantas funcionen como almacén de C en forma de biomasa vegetal y que posteriormente puedan convertirse parcialmente en materia orgánica (Avendaño *et al.*, 2009).

La captura de carbono atmosférico mediante prácticas de manejo del bosque está en función de la acumulación y almacenamiento del mismo en la biomasa vegetal. Cualquier actividad que tenga efecto positivo sobre la capacidad de un área dada para almacenar y capturar carbono, podría ser considerada potencialmente como una opción para reducir el CO₂ de la atmósfera (Pimienta *et al.*, 2007).

Las opciones básicas para conservar y almacenar carbono por el sector forestal son: a) conservación, que consiste en evitar las emisiones de C preservando las áreas

naturales protegidas, fomentando el manejo sostenible de bosques naturales y el uso renovable de la leña, y mediante la reducción de incendios; y b) reforestación, dedicada a almacenar y recuperar áreas degradadas mediante acciones como la protección de cuencas, la reforestación urbana, la restauración para fines de subsistencia (leña), el desarrollo de plantaciones comerciales para madera, pulpa para papel, hule, etc., así como de las plantaciones energéticas y de los sistemas agroforestales (Masera, 1995; citado en Rodríguez *et al.*, 2009).

El ciclo biogeoquímico del carbono

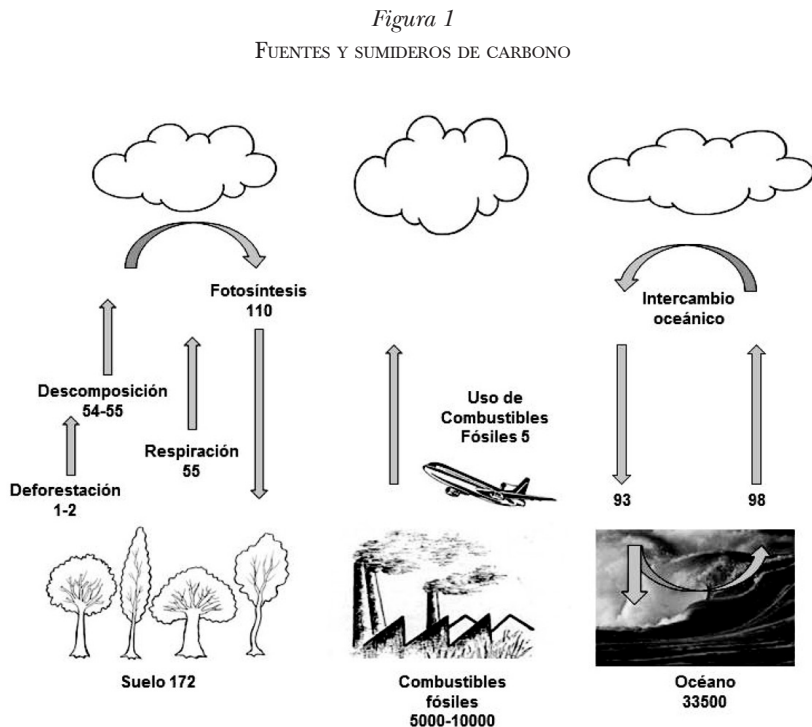
La vegetación asimila dióxido de carbono a través del proceso de la fotosíntesis, en general los árboles asimilan y emiten grandes cantidades de carbono durante toda su vida. Particularmente, los bosques capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y la superficie de la tierra (Schlesinger, 1997; Ordóñez *et al.*, 2001).

Cuando el CO₂ atmosférico se incorpora a los procesos metabólicos de las plantas, éste participa en la composición de materias primas como la glucosa, para que el árbol pueda desarrollarse. Al crecer el árbol va incrementando su follaje, ramas, flores, frutos, yemas de crecimiento, así como el grosor y altura del tronco. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, la cual al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable que, a su vez, aporta CO₂ al ambiente. Una vez que los árboles alcanzan su máximo crecimiento, pueden ser aprovechados para construcción de casas y muebles, los cuales tienen un tiempo de vida, después del cual se degradan aportando carbono al suelo y CO₂ a la atmósfera. Mientras el carbono se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol y hasta que es remitido (ya sea al suelo o a la atmósfera), se considera que se encuentra almacenado. En el momento de su liberación (ya sea por descomposición de la materia orgánica y/o la quema de biomasa) el carbono fluye para regresar a su ciclo (Ordóñez y Masera, 2001).

Sumideros y fuentes de emisión del carbono

En la figura 1 se muestra la interrelación entre la atmósfera, la superficie terrestre y el océano en relación con el ciclo del carbono. Las flechas representan los flujos de carbono en los diferentes medios, se trata de emisión si la flecha apunta en sentido ascendente o captura en dirección contraria.

Dentro del ciclo del carbono en la atmósfera, la vegetación juega un doble papel por un lado como fuente de emisión pero también como sumidero. Las perturbaciones producidas en el bosque, principalmente de origen antrópico, como roturación, sobreexplotación, incendios, plagas o enfermedades, le convierten en fuente de emisión.



Fuente: Riofrío, 2007 (en GtC).

Por el contrario, la reforestación o el abandono de tierras agrícolas le convierten en sumidero (Brown, 2002, citado en Ordóñez *et al.*, 2009). Los bosques en crecimiento son capaces de absorber una cantidad neta de CO₂, mientras que los bosques maduros, que crecen poco, retienen el carbono ya fijado, pero son incapaces de absorber más CO₂. Los bosques que experimentan una pérdida neta de biomasa, por la mortalidad debida al estado decadente de sus árboles, a la enfermedad o al fuego, son emisores de CO₂ (Kyrklund, 1990, citado en Mendizabal *et al.*, 2008).

A nivel nacional, la estimación de emisiones anuales de CO₂ en la categoría uso de suelo, cambios de uso de suelo y silvicultura (USCUSS) aporta 86 877 Gg;¹ éstas son el resultado del balance entre 64,484 Gg provenientes de la combustión y descomposición de biomasa aérea asociada a los procesos de conversión de bosques a otros usos; 30,344 Gg por emisiones derivadas de los suelos minerales y las áreas agrícolas; 4,932 Gg por emisión de bosques manejados y una captura de 12,883 Gg en tierras abandonadas, la cual se descuenta del total de emisiones de esta categoría (Semarnat, 2006).

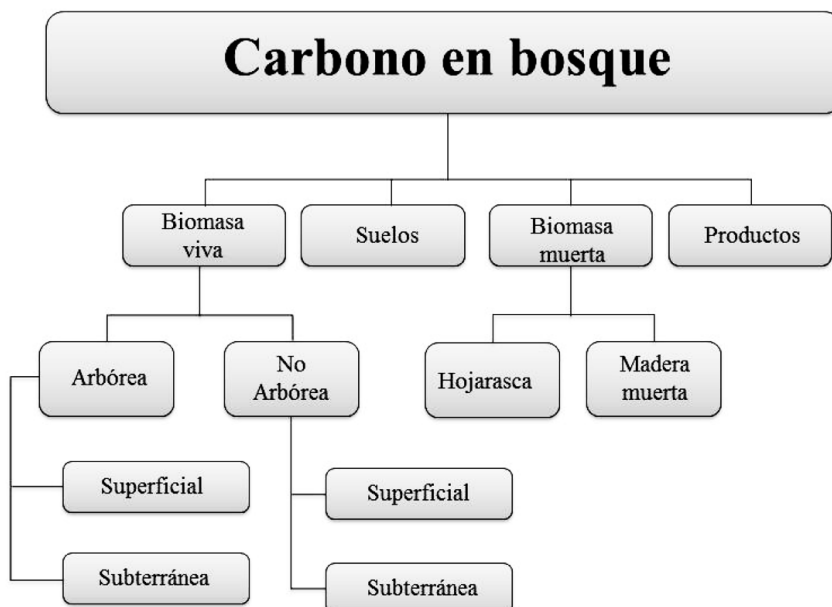
La figura 2 muestra los reservorios de carbono de un bosque. De acuerdo con la revisión de literatura, los reservorios que deben muestrearse para estimar la captura y emisión del carbono son: la biomasa, la hojarasca y la materia vegetal muerta, así como los suelos para tener un dato completo del contenido de carbono en un ecosistema (Masera *et al.*, 2000; Riofrío, 2007).

Se entiende como biomasa la suma total de materia orgánica viva de las plantas fotosintéticamente activas en una unidad de área dada, tanto arriba como abajo del nivel del suelo, compuesta por los árboles, la vegetación arbustiva y la vegetación herbácea (Riofrío, 2007). La producción y el aumento de la biomasa está influenciada por diversos factores tales como clima, especie, edad, calidad del sitio, fertilización, posición sobre la pendiente, elevación, exposición, densidad del rodal, sistema silvícola aplicado, región geográfica, variación genética, año de muestreo,

¹ Gg se refiere a los giga gramos (mil toneladas métricas) de gas.

contaminación atmosférica y cambios estacionales, entre otros (Maser *et al.*, 2000). Hojarasca y materia vegetal muerta se refieren a la vegetación que se encuentra en proceso de descomposición (Riofrío, 2007).

Figura 2
RESERVORIOS DE CARBONO EN BOSQUE



Fuente: Vallejo y Rodríguez, 2008.

METODOLOGÍAS

Métodos cuantitativos

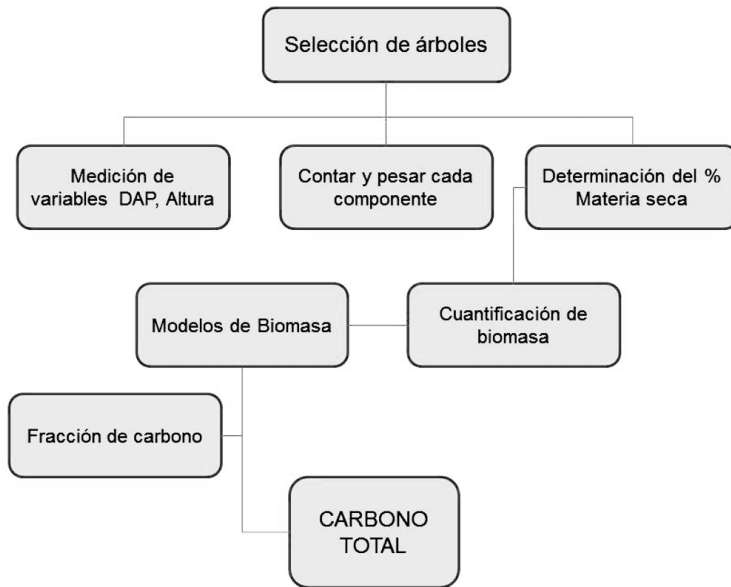
La dinámica del carbono en los ecosistemas forestales es muy compleja. Por lo anterior, para hacer una estimación de los cambios en el almacenamiento de carbono es necesario analizar los diferentes reservorios mencionados y

hacerlo mediante modelos de simulación; el uso de estos modelos permite realizar estimaciones de la dinámica del carbono de manera ágil y facilita la generación de escenarios alternativos a corto, mediano y largo plazo (Ordóñez *et al.*, 2001). Una manera confiable para medir el grado de conversión ambiental antropogénica es a través del estudio de la dinámica espacio-temporal de uso del suelo, ya que permite conocer las modificaciones en la vegetación debido al uso humano, así como la distribución e incremento (o decremento) de las tierras dedicadas a actividades antrópicas, ya sea productivas o como asentamientos humanos (Berry *et al.*, 1996; Priego *et al.*, 2004; Reyes *et al.*, 2006, citados en Castelán *et al.*, 2007).

La medición de la cantidad de biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema, requiere análisis destructivo directo, el cual consiste en el corte de árboles, seccionarlos y calcular el contenido de biomasa y carbono para cada sección, pesar y secar ramas y raíces y determinar su contenido, lo que redundaría en un mayor costo y tiempo. No siempre es posible tener los permisos para tirar los árboles. Por otro lado, lo más práctico son las estimaciones indirectas; para esto se debe contar con funciones que estimen la biomasa total con base en el tamaño y dimensiones de los árboles; es decir, funciones matemáticas basadas en relaciones alométricas, las cuales relacionan una variable dependiente con otra u otras variables independientes, que tienen como objeto explicar las relaciones existentes entre los atributos y dimensiones del árbol (altura, diámetro, área basal) y el peso seco de sus componentes (biomasa) (Huxley, 1932, citado en Etchevers *et al.*, 2002). Generalmente los modelos alométricos se generan por especie, sin embargo, es probable que varias especies que crecen en un mismo ecosistema presenten similitud del patrón morfológico de crecimiento y, por lo tanto, en la asignación de biomasa aérea (Etchevers *et al.*, 2002). Cuando se emplea el muestreo destructivo, se propone un procedimiento genérico para leñosas, en el que es necesario el derribo de árboles, la colecta de herbáceas y raíces. La figura 3 muestra un método para llevar a cabo un muestreo destructivo en leñosas.

Figura 3

PROCEDIMIENTO PARA CUANTIFICACIÓN DE CARBONO Y GENERACIÓN DE MODELOS EN LEÑOSAS



Fuente: Riofrío, 2007.

Métodos espaciales

Existen otros métodos para estimar los almacenes de carbono en diferentes ecosistemas, aun con la heterogeneidad de las áreas forestales en cuanto a topografía, clima, suelo y vegetación. Estas técnicas son los sensores remotos; los datos de los diferentes ecosistemas se incorporan a los modelos de simulación que cuantifican los procesos eco-fisiológicos (principalmente intercambio gaseoso) con base en las características propias de los ecosistemas y, a partir de ellos, se estima la biomasa presente. Sin embargo, para calibrar y verificar la eficiencia de estos métodos, es necesario utilizar las ecuaciones alométricas que proporcionan información más precisa de la biomasa existente. Utilizando cartografía, se requiere definir rodales forestales y clasificarlos de acuerdo con la densidad de la masa forestal, a su altura y categoría de biomasa. Posteriormente, se crea una matriz

que contenga la probabilidad de transición de un uso a otro y de un año de referencia a otro; después se combina la matriz de transición de usos del suelo con el contenido de carbono de cada tipo de vegetación y rodal para obtener las emisiones o captura de carbono asociadas. Las tasas de deforestación permiten calcular los flujos de CO_2 y otros gases de efecto invernadero entre los sistemas terrestres y la atmósfera y también se aplica para calcular las emisiones asociadas a la tala de los bosques y a la utilización de madera. Estas tasas se pueden obtener con mapas digitales existentes de zonas ecoflorísticas, cantidad de biomasa, plantaciones y estado de conservación; por medio de estimaciones estandarizadas de la cubierta vegetal, tasas de deforestación, reforestación y biomasa a nivel de país o con datos provenientes de un muestreo a nivel global (Masera *et al.*, 2000).

Métodos de muestreo

Masera *et al.* (2000) proponen algunos métodos para muestrear en campo cada uno de estos reservorios, lo cual dependerá de la disponibilidad de recursos y la precisión de los resultados esperados. La siguiente tabla describe el tamaño de las parcelas que deben muestrearse dependiendo del tipo de información que se desea obtener (cuadro 1):

a) Biomasa aérea

- Tamaño y forma de las parcelas permanentes

Cuadro 1

RADIO DE LAS PARCELAS PARA LOS INVENTARIOS DE BIOMASA Y DE CARBONO

<i>Tamaño de la parcela (m²)</i>	<i>Radio de la parcela (m)</i>	<i>Área por árbol (m²/árbol)</i>	<i>Aplicación</i>
100	5.64	0-15	Vegetación leñosa muy densa, con plantas de tallo de diámetro pequeño y distribución uniforme de troncos medios, sin troncos grandes
250	8.92	15-40	Densidad de vegetación leñosa moderada
500	12.62	40-70	Vegetación leñosa moderadamente dispersa
666.7	14.56	70-100	Vegetación leñosa dispersa
1,000	17.84	> 100	Vegetación leñosa muy dispersa o bosques maduros

Fuente: Masera *et al.*, 2000.

- *Punto dividido en cuatro.* Establecer una serie de líneas de muestreo paralelas separadas 100 metros. Marcar puntos de muestreo cada diez metros a lo largo de cada línea. En cada punto de muestreo, dividir el área inmediata en cuatro partes, usando la línea de muestreo más una segunda línea que cruce, de manera perpendicular, la línea de muestreo. Colectar datos de las especies y su diámetro utilizando una forma de recolección de datos. Para arbustos y árboles pequeños, con poca ramificación, medir su diámetro a treinta centímetros por arriba del suelo; para árboles más grandes medir su diámetro a 1.3 metros. Por último, medir la distancia de cada árbol o arbusto al punto de muestreo. Deben tomarse un mínimo de 100 medidas.
- *Tablas de biomasa.* Se construyen para las especies más importantes de la vegetación nativa de un lugar. Si no existen, pueden construirse a) utilizando el método destructivo; b) agrupando la vegetación por especie, con base en la clase morfológica; c) Aplicando alguna ecuación genérica para la estimación de biomasa.
- *Árbol promedio.* Se basa en la premisa de que si un árbol tiene una altura promedio, su biomasa también será promedio. Generalmente se selecciona uno o varios árboles con un área basal promedio y luego se realiza un muestreo destructivo.
- *Volumen de la madera.* Determinar indirectamente el fuste de los árboles considerando el volumen de la madera, convirtiéndolo a peso, multiplicando el volumen por la densidad.
- *Muestreo destructivo.* Este método consiste en hacer un muestreo de toda la vegetación que se encuentre en el área de estudio. Las muestras se deben localizar, cortar, clasificar, secar y finalmente pesar para obtener así el contenido de biomasa en aquellas muestras, este es el método más preciso, pero más costoso.
- *Introspección lineal y planar.* Estima el volumen de la vegetación en vez del peso y no requiere cortar muestras, excepto para verificar. El volumen de la vegetación por unidad de área y la biomasa son calculados considerando la geometría de la vegetación.

- *Peso estimado relativo.* De cuatro cuadrantes vecinos observados, el cuadrante con la biomasa más abundante es cortado y pesado. Los pesos de los otros cuadrantes son estimados como fracción del peso del cuadrante medido.
- *Comparativo de cosechas.* Este método compara distintas referencias estándar de peso conocido. El peso de cada nueva muestra es estimada en términos del registro de pesos de la referencia estándar. Se aplica para muestras homogéneas.
- *Foto clave.* Este método consiste en producir varias foto-clave de tipos de vegetación y biomasa para estimar las características de la vegetación disponible, generalmente se ordena agrupando la vegetación por grupos y a veces por cantidad de biomasa. Cada foto es acompañada por una hoja con información de biomasa y características del sitio. Este método proporciona una guía útil de biomasa si se requiere poca precisión.
- *Árbol estratificado.* Se aplica a rodales de diferente edad y consiste en estratificar por clases diamétricas las especies y utilizar la técnica del árbol medio para cada clase diamétrica.
- *Área de la copa.* Se selecciona una muestra de árboles para observar la biomasa y la proyección de la copa funcional. Posteriormente, se divide la biomasa de la muestra de árboles entre la proyección de la copa funcional para así obtener la biomasa por unidad de área de copa y finalmente se multiplica esta relación por el área total para estimar la biomasa total.
- *Proyección de área basal.* Se aplica para estimar la biomasa del rodal por la proporción del área basal del rodal y el área basal del árbol muestreado.

b) Biomasa en raíces

- *Barrenador de suelo.* Se utiliza para determinar la biomasa de las raíces en profundidades de 0 a 30 cm. El barrenador permite obtener un volumen de suelo a una profundidad conocida. Una vez obtenida la muestra se procede

a extraer de ella las raíces, esto último se hace lavando las raíces y se lleva al laboratorio.

- *Utilizando un monolito.* Sirve para determinar la distribución relativa de las raíces a una profundidad mayor de 30 cm. Este método consiste en construir una tabla con una serie de pernos o clavos, la cual será introducida en el suelo. Los clavos facilitarán la extracción de las raíces.

c) Biomasa en vegetación herbácea, suelo y hojarasca

- Establecer un punto de muestreo en la parte Norte de la parcela. Utilizar el cuadrante y muestrear sólo la vegetación que se encuentre dentro del mismo. Agrupar la vegetación herbácea y la vegetación leñosa a menos de 2cm de diámetro, ponerla en una bolsa, pesarla y registrar la medida. Seleccionar otra cantidad igual para determinar el contenido de humedad. Colectar un poco de hojarasca, colocarla en una bolsa, pesarla y registrar la medida. Mezclar bien la hojarasca del área de muestreo y colocarla en otra bolsa para determinar el contenido de humedad. Colectar una muestra de suelo para el análisis de contenido de carbono. Proceder con el mismo método en el segundo punto que deberá colocarse en el siguiente punto cardinal siguiendo el sentido de las manecillas del reloj.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Métodos para estimar biomasa

Para estimar la biomasa a partir de datos dendrométricos, existen dos métodos ampliamente contrastados (Ordóñez *et al.*, 2009):

Factores de expansión de biomasa (BEF). Son simplemente coeficientes que permiten convertir el volumen de madera (habitualmente expresado en m³) de un árbol o de una masa en su peso de materia seca (habitualmente expresado en toneladas).

Ecuaciones de estimación de biomasa. Son relaciones entre el peso seco de biomasa y alguna variable dendrométrica o que representa las condiciones de la estación donde dicho árbol vive (densidad, productividad, etc.). Este método presenta la doble ventaja de, por un lado, ofrecer información del carbono almacenado en las diferentes fracciones del árbol (con especial relevancia en la cuantificación del sistema radical por separado) y, por otro, que al realizar la estimación en un solo proceso de ajuste sólo hay un error, a diferencia del método de factores de expansión de biomasa, que requiere dos estimaciones y, por tanto, dos errores acumulativos (estimación de volumen y posteriormente estimación de la biomasa a partir del volumen).

Los métodos indirectos para cálculo de biomasa, de acuerdo con MacDicken (1997) y Snowdon *et al.* (2001), citados por Riofrío (2007), y que refuerzan los métodos enunciados por Ordóñez, se pueden resumir en:

- Aplicación de una ecuación de regresión específica a especies de árboles individuales de diámetro y/o otras medidas de los árboles.
- Aplicación de una ecuación de regresión genérica a diámetro y otras medias de árboles.
- Estimación de tablas de biomasa específicas para especies o genéricas basadas en diámetro y/o altura.
- Uso de tablas de rendimiento estándar para estimar el volumen de fuste y aplicando la gravedad específica se convierte a biomasa de fuste, posteriormente se aplica un factor de expansión para estimar biomasa total del árbol.
- Uso de la técnica del árbol promedio.

Se han desarrollado algunas ecuaciones alométricas genéricas para cálculo de biomasa en diferentes ecosistemas y para especies distintas, cada una de éstas se ha modificado de acuerdo con los resultados de campo y laboratorio para algunas especies, por lo que el número de parámetros aplicados en cada caso difieren para cada autor. El cuadro 2 lista sólo algunos de estos modelos:

Cuadro 2

ECUACIONES GENÉRICAS, UTILIZADAS PARA GENERAR MODELOS DE BIOMASA

$B = a + b \text{ (DAP)}$	$B = a + b \text{ (DAP)} + c \text{ (Ht)}$
$B = a + b \text{ (DAP)} \text{ (Ht)}$	$B = a + b \text{ (DAP)}^2$
$B = a + b \text{ (DAP)} + c \text{ (DAP)}^2$	$B = a + b(\sqrt{\text{DAP}})$
$B = a + b \text{ (DAP)} + c \text{ (DAP)}^2 \text{ (Ht)}$	$B = a + b \text{ (DAP)} + c \text{ (Ht)}^2$
$B = a + b \text{ (DAP)}^2 \text{ (Ht)}$	$B = a + b \ln \text{DAP}$
$B = a + b \log \text{DAP}$	$B = a + b \log \text{DAP} + c \log \text{Ht}$
$B = a_0 * \text{(DAP)}^2 \text{Ht}$	$B = a_0 + a_1 \text{ (DAP)}^2 \text{Ht}$
$B = a_0 + a_1 \text{ (DAP)}^2 + a_2 \text{Ht} + a_3 \text{DAP}^2 \text{Ht}$	$B = a_0 + a_1 \text{DAP} + a_2 \text{Ht} + a_3 \text{DAP}^2 \text{Ht}$
$B = a_0 + a_1 \text{ (DAP)}^2 \text{Ht} + a_2 \text{Ht} + a_3 \text{DAP} \text{Ht}^2$	$B = \text{(DAP)}^{2*} \text{Ht} / (a_0 + a_1 \text{DN})$
$B = a_0 + a_1 \text{DAP} + a_2 \text{DAP} \text{Ht} + a_3 \text{(DAP)}^2 \text{Ht}$	$B = a_0 * \text{DAP} a_1$
$B = a + b \text{DAP} + c \text{((DAP)}^2 + \text{Ht})$	$B = a + b \text{DAP} + c \text{ (DAP)}^2 + d \text{((DAP)}^2 \text{Ht})$
$B = a + b \text{DAP}^2 + c \text{ (DAP}^2 \text{Ht)}$	$B = a + b \text{DAP} + c \text{Ht}$
$B = a \text{DAP} b + \text{Ht} c$	

Donde B es la biomasa aérea total; a, b, c y d son los parámetros a estimar b (obtenidos de datos experimentales). DAP es el diámetro a la altura del pecho (1,3 m). Ht es la altura total.

Fuente: Riofrío, 2007; Pimienta *et al*; 2007; Rodríguez *et al*; 2009.

Se listan a continuación valores para la estimación de biomasa contenida en algunas especies de bosque templado, valores obtenidos al aplicar ecuaciones alométricas definidas como resultado de investigaciones en diferentes áreas geográficas, está en el cuadro 3, que contiene la ecuación aplicada, la especie forestal y el coeficiente de correlación, el cual mide la proporción de variabilidad total de la variable dependiente (biomasa) respecto a su media, lo que indica que entre más cercano a 1 esté dicho valor, la relación lineal es más fuerte.

Cuadro 3

COMPARACIÓN DE MODELOS PARA CÁLCULO DE BIOMASA

Modelo	Especie	R ²
$\text{LnBt} = (-2.14 + 2.23) * (\ln \text{DAP})$	<i>Alnus glabrata</i>	0.97
$\text{LnBt} = (-2.4134 + 2.329) * (\ln \text{DAP})$	<i>Alnus spp</i>	0.96

$B = (0.11765) * (DAP^{2.23})$	<i>Alnus spp</i>	0.97
$Bt = (0.6792 + 0.0446) * (Ht + 0.2084 (DAP^2 - 0.0026) * (DAP^2 * Ht))$	<i>Alnus acuminata</i>	0.99
$Bt = (-92.92 + 11.79) * (DAP - 0.049 * Ht^2)$	<i>Alnus acuminata</i>	0.94
$\ln Bt = (-1.5825 + 2.1171) * (\ln DAP)$	<i>Acacia mangium</i>	0.80
(a) $\ln Bt = (-2.18997 + 2.42623) * (\ln DAP)$	<i>Acacia mangium</i>	0.96
(b) $\ln Bt = (-2.36945 + 2.63028)(\ln DAP - 0.0052615) * \ln (DAP^2)$	<i>Acacia mangium</i>	0.96
(c) $\ln Bt = (-2.01325 + 2.53872) * (\ln DAP - 0.184968) * (\ln Ht)$	<i>Acacia mangium</i>	0.96
$\ln Bt = (\ln 0.0859 + 2.35371) * (\ln DAP)$	<i>Alnus glutinosa</i>	0.96
$Bt = (-63.64 + 0.673) * (DAP^2)$	<i>Acacia melanoxylum</i>	0.93
$B = (0.0357 * DAP^{2.6916})$	<i>Pinus patula</i>	0.98
$B = (0.0754) * (DAP^{2.513})$	<i>Abies religiosa</i>	0.98
$B = 0.0713 (DAP^{2.5104})$	<i>Abies religiosa</i>	0.99
$B = (0.209142) * (DAP^{2.123970})$	<i>Juniperus flaccida</i>	0.97
$B = (1.304540) * (DAP^{1.730990})$	<i>Pinus montezumae</i>	0.99
$B = (0.407073) * (DAP^{2.026167})$	<i>Pinus patula</i>	0.98
$B = (0.128495) * (DAP^{2.364444})$	<i>Pinus pseudostrobus</i>	0.99
$B = (0.032495) * (DAP^{2.766579})$	<i>Pinus teocote</i>	0.99
$B = (0.892617) * (DAP^{1.846073})$	<i>Quercus germana</i>	0.95
$B = (0.970526) * (DAP^{1.837327})$	<i>Quercus rysophylla</i>	0.96
$B = (0.766406) * (DAP^{1.938435})$	<i>Quercus xalapensis</i>	0.98
$B = (0.010702) * (DAP^{3.050818})$	<i>Quercus spp</i>	0.97
$B = (0.1033) * (DAP^{2.39})$	<i>Quercus spp</i>	0.99
$B = (0.132193) * (DAP^{2.495677})$	<i>Ternstroemia sylvatica</i>	0.99

Donde Bt: biomasa aérea total (kg/árbol); DAP: diámetro a la altura del pecho (130 cm); Ht: altura total (m); R²: coeficiente de determinación; B: biomasa.

Fuente: Riofrío, 2007, Acosta *et al.*, 2009, Díaz, 2007; Avendaño *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2009; Masera *et al.*, 2000; Aguirre *et al.*, 2009.

Masera *et al.* (2000) propone calcular el contenido de biomasa en raíces como un porcentaje de la biomasa aérea (cuadro 4). Comúnmente la biomasa de las raíces también es expresada en relación con la biomasa aérea, como el radio raíz-tallo.

Cuadro 4
RADIOS R/T PARA DETERMINAR BIOMASA EN RAÍCES

<i>Tipo de bosque</i>	<i>Rango de R/T</i>	<i>R/T promedio</i>
Bosque húmedo creciendo en suelos "spodosols"	0.7 - 2.3	1.5

Bosque húmedo de zonas bajas	0.04 – 0.33	0.12
Bosque húmedo montañoso	0.11 – 0.33	0.22
Bosques secos tropicales y estacionales	0.23 – 0.85	0.47

Fuente: Stanford y Cuevas, 1996; citado en Masera *et al.*, 2000.

Otros autores como Kurz y Beuquema (1996); citado por Riofrío (2007) calculan el contenido de biomasa en raíces y proponen sólo dos modelos, uno para madera suave: $BR = 0.231 (BA)$ y uno para madera dura $BR = e^{0.359} BA^{0.639}$. Tomando como base la biomasa aérea (BA) del árbol. El resultado que se obtiene es en $Mg\ ha^{-1}$ (mega gramo por hectárea).

De la revisión realizada se integraron los contenidos de biomasa total en kilogramos por árbol de especies de clima templado, cuadro 5.

Cuadro 5
BIOMASA PROMEDIO DE ESPECIES ARBÓREAS

<i>Especie</i>	<i>Biomasa total (kg /árbol)</i>
Acacia melanoxylum	286.85
Alnus acuminata	71.14
Alnus	48.41
Quercus	72.16
Rapanea	35.50
Clethra	15.24
Liquidambar	76.92
Inga	94.55
Pinus lambertiana	87.00
Pinus ponderosa	79.00
Pinus virginiana	160.00
Pinus montezumae	95.00
Pinus patula	142.00
Pinus patula	113.00

Fuente: Riofrío, 2007; Etchevers *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2007.

CONTENIDO DE CARBONO EN BOSQUES

Los bosques como reservorios de carbono desempeñan una función primordial para responder a los compromisos de mitigación de CO₂, por lo que predecir el potencial de captura de los bosques en México es fundamental, una vez teniendo la superficie arbolada con la que cuenta. El cuadro 6 muestra el potencial de captura de carbono por especie forestal, así como la captura neta en escenarios bajos, medio y alto.

Cuadro 6
POTENCIAL DE CAPTURA DE ESPECIES FORESTALES

<i>Uso de suelo y cobertura vegetal</i>	<i>Área</i>	<i>Densidad</i>	<i>Incremento</i>	<i>Captura neta por escenario</i>		
	<i>(1996)</i> <i>(10³ ha)</i>	<i>total de C</i> <i>inicial</i> <i>(MgC ha⁻¹)</i>	<i>promedio a</i> <i>largo plazo</i> <i>(MgC ha⁻¹)</i>	<i>Bajo</i> <i>(0.5 %)</i> <i>(MgC ha⁻¹)</i>	<i>Medio (1 %)</i> <i>(MgC ha⁻¹)</i>	<i>Alto (1.5 %)</i> <i>(MgC ha⁻¹)</i>
Bosque de encino y de montaña	14.9	503	16	83	134	174
Bosque de pino-encino	190.7	341	61	103	135	159
Bosque de pino	75.1	318	72	110	139	161
Bosque de pino abierto	36.2	236	104	122	135	146
Acahual arbóreo	115.6	315	77	104	124	140

Fuente: Masera *et al.*, 2000.

Fracción de carbono total

Pacheco *et al.* (2007) mencionan que el almacenamiento de carbono depende de la productividad primaria neta de cada sistema, ya que cada uno de éstos concentra en el tejido vegetal un promedio alrededor del 50%, es decir, una vez obtenida la cantidad de biomasa, se aplica este factor para determinar el contenido de carbono. Algunos autores difieren de este dato genérico y proponen valores específicos por especie, y la variación que se presenta para la misma especie puede explicarse por las condiciones en que se encuentra el bosque y la localización del mismo (cuadro 7).

Los factores que pueden estar marcando la diferencia son: temperatura, humedad, tipo de suelo, pendiente, insolación, entre otros.

Cuadro 7
FRACCIÓN DE CARBONO TOTAL POR ESPECIE

<i>Especie</i>	<i>Fracción de carbono total</i>
<i>Alnus acuminata</i>	47.82
<i>Alnus glabrata</i>	51.30
<i>Acacia melanoxylum</i>	47.97
<i>Spartium junceum</i>	48.04
<i>Bowlesia incana</i>	47.71
<i>Alnus spp</i>	50.00
<i>Abies religiosa</i>	46.48
<i>Quercus spp</i>	50.00
<i>Quercus spp</i>	54.00
<i>Quercus peduncularis</i>	47.26
<i>Pinus patula</i>	50.31
<i>Pinus spp</i>	56.00
<i>Pinus spp</i>	48.52

Fuente: Riofrío, 2007; Acosta *et al.*, 2009; Díaz *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2009; Silva y Nívar, 2009.

Algunos investigadores (De Jong, 1995; Nilsson y Schopfhauser, 1995; Nabuurs y Morthen, 1993; Ordóñez *et al.*, 2001; Gayoso *et al.*, 2002; Oleksyn *et al.*, 1999, citados en Ordóñez *et al.*, 2001 y Pacheco, 2007) han realizado muestreos destructivos en zonas templadas, tanto en el ámbito nacional como internacional para determinar carbono en diferentes reservorios como biomasa, suelo y productos, pero algunos otros sólo miden biomasa, lo que se refleja en las celdas vacías en el cuadro 8.

Cuadro 8
CAPTURA DE CARBONO EN DIFERENTES ESPECIES Y POR RESERVORIO

<i>Vegetación</i>	<i>Biomasa (tC/ha)</i>	<i>Suelo (tC/ha)</i>	<i>Productos (tC/ha)</i>	<i>Total (tC/ha)</i>	<i>Fuente</i>
Bosque de pino	120	156	-	276	De Jong <i>et al.</i> , 1995

Bosque de Pino-encino	135	151	-	286	De Jong <i>et al.</i> , 1995
Bosque templado primario	123	134	-	257	Nilsson y Schopfhauser, 1995
Bosque templado secundario	90	120	-	210	Nilsson y Schopfhauser, 1995
<i>Picea abies</i>	225	121	Contenido en biomasa	346	Nabuurs y Morthen, 1993
<i>Pinus radiata</i> en plantación	136	81	Contenido en biomasa	217	Nabuurs y Morthen, 1993
<i>Pinus caribea</i>	145	91	Contenido en biomasa	236	Nabuurs y Morthen, 1993
<i>Pinus pseudostrobus</i>	74	94	49	217	Ordóñez <i>et al.</i> , 2001
<i>Pinus greggi</i> (plantación de seis años)	65.8	-	-	-	Gayoso <i>et al.</i> , 2002
<i>Pinus radiata</i> (siete años)	30.7	-	-	-	Gayoso <i>et al.</i> , 2002
<i>Pinus ponderosa</i> (ocho años)	30.04	-	-	-	Gayoso <i>et al.</i> , 2002
<i>Pinus sylvestris</i> (12 años)	33.2	-	-	-	Oleksyn <i>et al.</i> , 1999
<i>Pinus contorta</i> (13 años)	9.4	-	-	-	Oleksyn <i>et al.</i> , 1999

Fuente: Ordóñez *et al.*, 2001, Pacheco, 2007.

En términos porcentuales el fuste del árbol concentra la mayor cantidad de biomasa aérea, representado entre 55 a 77 % del total, luego están las ramas, de 5 a 37 %; seguido por las hojas entre 1 a 15 % y finalmente la corteza del fuste entre 5 a 16 % respectivamente. La contribución porcentual de los diferentes componentes (fuste, corteza, ramas, hojas y raíces) en la biomasa total de un árbol varía considerablemente dependiendo de la especie, edad, sitio y tratamiento silvicultural (Pardé, 1980 y Pedrasa, 1989; citado en Riofrío, 2007).

Rodríguez *et al.* (2009) afirman que 75.3% del contenido total de carbono de los bosques se almacena en los árboles, 15% en el sistema radicular y 9% en la hojarasca.

En términos de factores de conversión, se han propuesto valores genéricos que para estudios de gran visión o regionales, pueden proporcionar un dato muy aproximado de los contenidos de carbono en diferentes reservorios. El cuadro 9 muestra el tipo de reservorio y el factor de conversión que se aplica para obtener el contenido de carbono a partir de la cantidad de biomasa.

Cuadro 9
FACTOR DE CONVERSIÓN BIOMASA-CONTENIDO DE CARBONO

<i>Biomasa</i>	<i>Factor de conversión</i>	<i>Autor</i>
Materia vegetal seca	0.50	Smit <i>et al.</i> (1993), MacDicken (1997), Husch (2001)
En latifoliadas	0.531	Koch (1989)
En coníferas	0.521	Koch (1989)
En latifoliadas	0.42	Schlegel <i>et al.</i> (2001)
En coníferas	0.45	Schlegel <i>et al.</i> (2001)
Bosques (biomasa seca)	0.42 y 0.48	FAO (2000)
Maleza	0.465	Acosta (2003)
Raíces (laderas con vegetación forestal y manejo agrícola)	0.455	Acosta (2003)
Bosques templados	0.45	Fragoso (2003) y Zamora (2003)

Fuente: Rodríguez *et al.* (2009).

CONTENIDO DE CARBONO EN SUELOS

El sistema suelo-vegetación juega un papel importante en el aumento o en la reducción de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, dependiendo de la velocidad de formación y descomposición del carbono orgánico en el suelo, por lo que éste es uno de los reservorios terrestres de carbono más grande; además es el medio para evaluar el flujo de GEI entre la biósfera y la atmósfera (Segura *et al.*, 2005).

El suelo es el almacén de carbono más importante en los ecosistemas terrestres, en general, y forestales en particular. La mayor concentración de este elemento se encuentra en las capas más superficiales del suelo (Acosta *et al.*, 2009).

Diversos estudios indican que el tipo de vegetación es un factor determinante en las evaluaciones de carbono orgánico de los suelos, es decir, el contenido cambia con el tipo de vegetación, el tipo de material parental, los factores topográficos del área, así como el tipo de árbol y su edad (Segura *et al.*, 2005).

Al analizar el contenido de carbono orgánico en el suelo con el grado de influencia humana, se demuestra que, en la medida en que se incrementan las actividades humanas en los suelos, los valores de carbono orgánico tienden a disminuir (Segura *et al.*, 2005). Para calcular el porcentaje de carbono en el suelo, se propone utilizar como base el contenido de la materia orgánica de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ CO} = (\% \text{ MO}) * (0.58)$$

Con los resultados en laboratorio del porcentaje de carbono orgánico del suelo y la densidad aparente (t m^{-3}), se estima el contenido de carbono en el suelo a la profundidad evaluada (0-20 cm), para tal efecto se propone la siguiente fórmula (Riofrío, 2007):

$$\text{Carbono en el suelo (t C ha}^{-1}\text{)} = \text{CC} * \text{DA} * \text{P} * 100$$

Donde: P = Profundidad de muestreo (m), CC= Contenido de Carbono (%), Da= Densidad aparente en t m^{-3} . Se multiplica por 100 para convertir a toneladas ha^{-1}

Varios investigadores (Groshgal 1991; Wardle 1992; Robertson 1994; Feigl y Sparling 1994; Meléndez 1997, citados por Ramos 2003 y por Riofrío 2007) indican que la dinámica del carbono en el suelo puede dividirse en tres fracciones: la fracción activa o carbono microbiano, el cual representa entre 1-2% del carbono orgánico total, la fracción de carbono orgánico lento y el carbono orgánico pasivo.

En los sistemas con vegetación forestal, el C acumulado en la primera capa del suelo (0 a 20 cm) se concentra la mayor parte del C del suelo, aportando casi 40%, la siguiente capa aporta alrededor de 25% debido a que la mayor actividad microbiana se concentra en las capas superficiales en suelos forestales (Acosta *et al.*, 2009).

La incorporación del C al suelo en ecosistemas naturales se da por dos vías principales: por el mantillo (capa superficial de materia vegetal) y por la biomasa radicular. La velocidad de descomposición de este material depende de las poblaciones microbianas del suelo y de las características del material vegetal (Oliva y García, 1998, citados en Rodríguez *et al.*, 2009).

El carbono orgánico en los suelos naturales representa un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización). En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del carbono que ingresa al mismo es lábil y sólo una pequeña fracción (1%) del que ingresa se acumula en la fracción húmica estable (Robert, 2005; citado en Riofrío, 2007).

MÉTODOS PARA ESTIMAR LA EMISIÓN Y/O CAPTURA DE CARBONO

Existen en el mercado algunos modelos que calculan las emisiones o captura de carbono en ecosistemas, pero en el caso de México aún no se ha generado la información que requieren estos sistemas para obtener el balance; sin embargo, se han empleado para estimar la emisión o captura a nivel nacional y no regional o local. Algunos de estos modelos son descritos por Masera *et al.* (2000). Estos modelos, en general, se aplican para estimar los flujos de carbono en ecosistemas específicos y reflejan sus resultados de manera numérica, es decir, únicamente dan el dato de captura de carbono, cantidad de biomasa, densidad de carbono, entre otros (cuadro 10).

Cuadro 10

COMPARACIÓN DE MODELOS QUE SE UTILIZAN PARA ESTIMAR LOS FLUJOS
DE CARBONO EN ECOSISTEMAS TERRESTRES

<i>Modelo</i>	<i>Aplicación</i>	<i>Base conceptual</i>	<i>Variables</i>
CO ₂ Fix	Contenido de carbono	Ciclo del carbono	Tablas de crecimiento, incremento del volumen maderable
GORCAM	Flujos netos de carbono asociados con el uso del suelo y cambios de uso del suelo, en los escenarios: área forestal, plantación forestal, bosque con distribución de edades	Ciclo del carbono	Cambios en el carbono almacenado en la vegetación, en el humus y el suelo. Reducción de emisión por sustitución de combustibles fósiles, almacenamiento en los productos, reciclaje o quema de madera de desecho (200 parámetros de entrada). Salida: diagramas con el secuestro de carbono a lo largo del tiempo

Brown y Lugo (1982)	Contenido de carbono		Densidad de carbono de los bosques más abundantes, variables climáticas
Brown, Gillespie y Lugo (1989)	Bosques tropicales		Inventarios nacionales
Carbine	Estimar la acción del carbono en el bosque, suelo, productos de madera y en la sustitución de combustibles fósiles		Biomasa, tablas de rendimiento por especie (crecimiento y estructura), cobertura de suelo, textura del suelo. Se limitan a la representación por especie y rodales de edad
CAMFOR	Flujos de carbono	Ciclo del carbono	En los árboles, productos de madera, restos, componentes del suelo, por cientos de años
MAIA	Existencias de carbono en proyectos forestales MDL	Metodologías de la Junta Directiva del MDL	Biomasa aérea, Biomasa subterránea, hojarasca, madera muerta y carbono orgánico en el suelo; utilizando hasta cinco factores de clasificación (tipo de suelo, especies, sistema de manejo, edad)
TARAM	Estimar reducciones de emisiones de GEI en proyectos forestales de MDL	Metodologías de la Junta Directiva del MDL	Datos de crecimiento de una plantación; captura de carbono que se obtendría anualmente una vez implementado el proyecto

Fuente: Masera *et al.* (2000), Forestry Commission (2011), Australian Greenhouse Office (2011).

La tabla anterior muestra una comparación de los diferentes software que se aplican para estimar flujos de carbono en ecosistemas terrestres; algunos de ellos como el propuesto por Brown, Gillespie y Lugo se aplican exclusivamente para bosques tropicales; otros como el MAIA y el TARAM atienden los requisitos establecidos en los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), otros requieren de datos de entrada como la sustitución de combustibles fósiles, que en el caso de México aún no se han realizado estudios tan detallados que proporcionen el dato de cuánto es lo que se ahorra por la sustitución de estos combustibles. El GORCAM requiere de 200 parámetros de entrada para calcular el cambio en el almacenamiento de carbono almacenado en la vegetación y arroja como resultado un diagrama con la captura de carbono a lo largo del tiempo. Como se aprecia, en México aún estamos lejos de aplicar alguno de estos modelos para estimar los flujos de carbono, debido a la falta de información detallada que algunos de éstos solicitan como datos de entrada. Es importante mencionar que

lo que dan como resultado es un dato numérico, pero no una distribución sobre el territorio.

Una aproximación más cercana a las características de los modelos muestra que el Co_2 Fix es un modelo para cuantificar las existencias y flujos de carbono en bosques; se fundamenta en el ciclo del carbono e integra el crecimiento anual y las tasas de pérdida de las principales combinaciones de la biomasa, incluyendo además la relación de la dinámica de la descomposición de la materia orgánica del suelo (basado en tablas de crecimiento e incremento de volumen maderable, como datos para el modelo). La distribución relativa de follaje, ramas y raíces, y su relación con el incremento en el volumen del tronco (es decir, cada uno de los componentes arbóreos) son integrados en conjunto con un tiempo de vida esperado. La diferencia entre la asimilación y la descomposición durante el desarrollo forestal determina la cantidad neta de carbono fijada durante el desarrollo de rodales y de la suma total de carbono, el cual está permanentemente almacenado dentro de los ecosistemas.

El modelo CARBINE (*Reino Unido*) consta de cuatro submodelos que estiman la acción de carbono en el bosque, en el suelo y en los productos de madera y además, el impacto en el equilibrio del gas de invernadero de la sustitución directa o indirecta del combustible atribuible a un sistema silvícola. El submodelo de carbono en bosque se divide en compartimentos más detallados que incluyen a vástagos, ramas, follaje, raíces de árbol, entre otros (Forestry Commission, 2011). CAMFOR (*Australia*) calcula los flujos de carbono asociado a un conjunto de árboles, incluyendo los productos de madera de la cosecha de éstos. Calcula el carbón en los árboles, los restos, los componentes del suelo y el carbón intercambiado por la atmósfera, por cientos de años (Australian Greenhouse Office, 2011). GORCAM se trabaja en una hoja de cálculo de Excel y fue desarrollado para calcular los flujos netos de carbono en la atmósfera que estén asociados con el uso del suelo, el cambio en el uso del suelo y los proyectos bioenergéticos y forestales. Los aspectos que considera el modelo son: los cambios en el carbono almacenado en la vegetación, en el humus y en el suelo; la reducción de emisiones de C debido a la sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles; el almacén de C en los productos de madera; la reducción de las emisiones de carbono cuando los productos de carbono reemplazan a materiales para

los que utilizan grandes cantidades de energía en su fabricación como el acero y el concreto; el reciclaje o la quema de la madera de desecho; los combustibles fósiles auxiliares utilizados para la producción de biocombustibles y productos de madera. Se aplica para valorar el balance de carbono futuro en los siguientes escenarios: un área forestal; un sistema de plantación forestal (bosques normales); un bosque con una distribución de edades.

Brown y Lugo (1982) consideran la densidad de carbono de los bosques más abundantes y otro tipo de vegetación, y relaciona esta variable con las variables climáticas.

Fearnside y Malheiros (1996). Modelo regional específico para predecir cambios en los almacenes de C en Amazonia, basado en el modelo de cambio LU/LC (usando la matriz de probabilidades MARKOV).

MAIA (*Costa Rica*), creado por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) es un programa diseñado para el monitoreo de las existencias de carbono en proyectos forestales de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), se realiza en cinco reservorios: biomasa aérea, biomasa subterránea, hojarasca, madera muerta y carbono orgánico en el suelo; para ello se aplican cinco factores de clasificación, por ejemplo, tipo de suelo, especie, sistema de manejo, edad, por parcela.

TARAM (*Tool for Afforestation and Reforestation Approved Methodologies*), creado por el CATIE, es un programa diseñado en Excel que se aplica para estimar las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero en proyectos forestales del MDL; esta herramienta permite introducir información básica de un proyecto en fase de diseño y obtener información de la captura de carbono que se obtendría anualmente una vez implementado el proyecto.

WRI'S LUCS (*Faeth et al., 1994*) estima los flujos futuros de C como resultado del cambio inducido por las presiones socioeconómicas. Flujos a través del tiempo entre cada clase no se consideran. Existen además otros modelos que se utilizan para estimar los cambios de usos del suelo a nivel espacial, que se basan en los sistemas de información geográfica; que aplican entre otras técnicas, regresiones logísticas; matrices de probabilidad de transición, o cadenas de Markov y que reflejan sus resultados a través de mapas. El modelo *CO₂ Land*, es un software para calcular las

existencias de carbono a nivel de paisaje, utilizando como base rodales construidos en Co₂Fix. En éste se combina información de uso del suelo que el usuario ha integrado en sistemas de información geográfica en matrices de transición.

Ludecke (1990) utiliza una aproximación basada en la regresión logística de Sistemas de Información Geográfica para predecir la vulnerabilidad de áreas específicas forestales en una región de Honduras, de acuerdo a la proximidad de aquellas a los caminos y otro tipo de infraestructura (cuadro 11).

Cuadro 11

COMPARACIÓN DE MODELOS UTILIZADOS PARA ESTIMAR LOS CAMBIOS DE USOS DEL SUELO

<i>Modelo</i>	<i>Aplicación</i>	<i>Base conceptual</i>	<i>Variables</i>
Ludecke (1990)	Cambio de uso de suelo	Regresión logística	Proximidad a caminos e infraestructura
Turner (1987)	Cambio de uso de suelo	Matriz de probabilidad de transición	Influencia de áreas vecinas
LUCS del Instituto de Recursos Mundiales (1994)	Estimar almacenes y flujos de carbono en áreas con proyecto forestal		Cambios de uso del suelo como resultado de presiones socioeconómicas
Fearnside y Malheiros (1996)	Predicción de patrones futuros de cambios de uso del suelo	Cadenas de Markov	Densidades promedio de los sistemas de uso del suelo
Fearnside y Malheiros-G (1996)	Cambios en los almacenes de carbono	Matriz de probabilidades de transición	Cambio de uso del suelo
WRI's LUCS (Faeth <i>et al.</i> , 1994)	Flujos futuros de carbono		Cambios de uso del suelo, como resultado de presiones socioeconómicas
CO ₂ Land	Existencias de carbono a nivel de paisaje	Matriz de probabilidades de transición	Rodales derivados de Co ₂ Fix

Fuente: Masera *et al.* (2000).

Turner (1987) usa un modelo de simulación espacial, donde la probabilidad de transición de áreas de 1 ha estaban influenciadas por la composición de las áreas vecinas. Esto último para simular los cambios en el paisaje en Georgia.

LUCS del Instituto de Recursos Mundiales (1994) está específicamente diseñado para estimar los almacenes y flujos futuros de carbono en las áreas en las cuales se implemente un determinado proyecto como resultado de la dinámica en el cambio de uso de suelos que es producto a su vez de las presiones socioeconómicas. El patrón de uso de suelo está definido por los siguientes factores: 1) La población y sus necesidades agrícolas y de leña (la población crece asintóticamente hacia un máximo; la demanda de leña es el producto de la población por la cantidad que se utiliza por persona). 2) La producción agrícola y sus tendencias de cambio. (La producción agrícola se define por la cantidad de tierra necesaria para alimentar a una persona; la productividad en los sistemas agroforestales y roza-tumba-quema se define en relación con la productividad de la agricultura permanente). 3) El manejo forestal.

Fearnside y Malheiros (1996). El modelo puede ser empleado en caso de requerir una predicción de los patrones futuros en los usos del suelo. Los autores desarrollaron un modelo específico para una región con el objetivo de predecir los cambios en el almacén de carbono en Amazonia, utilizando una matriz markoviana de probabilidades. Los flujos están basados en los cambios en el uso del suelo y en la multiplicación de estos últimos por las densidades promedio de los sistemas de uso del suelo. La limitación principal de los modelos que se basan en patrones es que éstos no toman en cuenta nuevas circunstancias o nuevas causas de cambio en la vegetación.

Otro grupo de programas relacionados con las mediciones de carbono son los simuladores de crecimiento:

EUCASIM, *Chile* corresponde a un modelo agregado de rodal y opera mediante relaciones funcionales obtenidas a través de ajustes de datos provenientes de inventarios de ensayo y parcelas permanentes en diferentes localidades de Chile; se estructura en tres módulos: el primero para información del incremento y determinación de volumen; el segundo, para los productos resultantes, diferenciados y cuantificados; finalmente el tercero, para analizar el sistema silvícola. Está diseñado para las especies *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*, en rango de plantaciones de 3 a 20 años (UACH, 2011).

Radiata Plus, Chile consta de tres módulos, el más importante es el del crecimiento, el cual solicita información de tres series de datos, el estado inicial del rodal con edad, número de individuos por hectárea, área basal y altura dominante, posibles intervenciones anteriores o futuras y finalmente la edad a la cual desea hacer la proyección (UACH, 2011).

Minga, Costa Rica, creado por CATIE, estima el crecimiento y productividad de especies forestales tropicales que no cuentan con modelos empíricos de crecimiento, mediante la selección de modelos predefinidos de crecimiento en altura, desarrollo diamétrico y volumen. Cuenta con una base de datos dinámica de crecimiento de varias especies de países tropicales y valores básicos como densidad, tasas de crecimiento, factores de expansión de biomasa, modelos de conicidad, entre otros (UACH, 2011).

La limitación principal de los modelos que se basan en patrones, es que no toman en cuenta nuevas circunstancias o nuevas causas de cambio en la vegetación (Masera, 2000). Varios de estos modelos usan sólo un método (regresión logística, cadenas de Markov), lo cual puede limitar la precisión de los resultados y sólo permiten estimar los contenidos de carbono, pero no en su conjunto de los gases efecto invernadero.

CONCLUSIÓN

A pesar de que México cuenta con un almacén de carbono muy importante, el cual equivale a las emisiones mundiales de CO₂, las políticas y estrategias para mantener y manejar adecuadamente los bosques avanzan lentamente, de tal manera que permitan dar respuesta a los compromisos de mitigación para el año 2020.

Uno de los factores importantes en la emisión de CO₂ es el uso del suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura, pero en nuestro país se siguen abriendo espacios para la agricultura y la ganadería, lo que en el corto plazo indica un cambio evidente de uso del suelo o en su defecto de una alteración significativa de la vegetación natural primaria.

Una de las alternativas que se han planteado para aumentar la capacidad de almacenamiento y captura de carbono en bosques es el manejo forestal adecuado, la conservación y la reforestación, por lo que las instituciones nacionales son las responsables de canalizar estos esfuerzos.

Para que los bosques realicen adecuadamente el proceso de fotosíntesis y realmente respondan al flujo neto anual de carbono, necesita estar en buenas condiciones de sanidad y su curva de crecimiento debe incrementarse, porque una vez que el árbol termina de crecer, ya no tiene la capacidad de seguir capturando CO_2 .

Para estar en condiciones de contar con datos precisos del potencial de captura de carbono en los bosques, es necesario contar con datos en los diferentes reservorios en los que se encuentra este elemento, lamentablemente existen aún pocas investigaciones que se realizan mediciones detalladas en todos estos almacenes. Existen resultados de investigación que dan valores precisos de cierta especie, pero para obtener este tipo de resultados es necesario tirar algunos árboles y arbustos para medir y pesar cada uno de sus componentes. Muy pocas investigaciones tienen posibilidad de aplicar este tipo de procedimientos directos.

Sin embargo, los resultados que hasta ahora se tienen permiten tener una visión nacional y regional de los contenidos de biomasa y carbono.

Se han probado varios métodos para determinar con una precisión aceptable la biomasa en bosques templados y su coeficiente de correlación es significativo, al aplicar cualquiera de estos modelos se podrían obtener resultados satisfactorios, sin tener que realizar muestreo destructivo, eligiendo siempre la ecuación cuyo coeficiente de correlación esté más cercano al uno.

No basta sólo con obtener la cantidad de biomasa contenida en un ecosistema, sino que además es necesario asociar este valor a las características de cada sitio como tipo de suelo, temperatura, humedad, insolación, pendiente, entre otros, para acotar de mejor manera los resultados y tener la posibilidad de explicarlos.

Los métodos presentados resumen los que requieren métodos de muestreo en campo y los que se pueden realizar en gabinete aplicando valores estándar para ciertas especies arbóreas y para diferentes reservorios y datos obtenidos a través de sensores remotos, cartografía digital e inventarios forestales.

Esta revisión muestra diferentes opciones para estimar el contenido de biomasa y carbono en algunos de los reservorios del bosque templado, aplicando únicamente fórmulas matemáticas o información generada por dependencias federales.

Con la tabla en la cual se presenta el potencial de captura de carbono para diferentes especies de bosque templado, es posible estimar cuánto se puede captar de carbono en función de la superficie de bosque con que actualmente se cuenta, por ejemplo, en algún estado o una región. Es posible también calcular a partir de la cantidad de biomasa, el porcentaje de carbono contenido en cada componente, por ejemplo las ramas, las raíces y las hojas.

Los factores de conversión utilizados por algunos investigadores, se encuentran muy cerca de la propuesta para bosques de la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), que si se aplican con detalle por especie, se obtendrían valores bastante aproximados.

En cuanto al contenido de carbono en suelos, será necesario hacer muestreos de suelo en los primeros 20 centímetros, para tener una idea aproximada del contenido de carbono y si no es posible obtener en el laboratorio este contenido, aplicando la fórmula de la materia orgánica.

Los software comerciales que están a disposición para calcular la emisión y captura de carbono, requieren de una cantidad detallada de datos para poder arrojar los valores buscados, por lo que, en el caso de nuestro país, aún es deficiente la cantidad y los factores con los que se cuenta para poder aplicar estos modelos, algunos de los cuales se han pensado para zonas tropicales como el amazonas. En el caso de México los bosques tropicales son los menos estudiados.

Para estimar la emisión o captura de carbono a futuro, es posible aplicar alguno de los software de simulación de crecimiento de algunas especies, para definir, a partir de la altura y edad de los árboles, cuánto podrían estar emitiendo o en su caso capturando a lo largo de los años.

La revisión presentada integra algunos métodos, ecuaciones y programas informáticos que se han generado a partir de muestreos destructivos, los resultados de estos trabajos pueden ser aplicados para crear modelos genéricos que permitan estimar contenidos y emisiones de carbono en diferentes ambientes sin la necesidad de

tirar árboles y llevarlos al laboratorio, lo que implica una inversión tanto en tiempo como en dinero. Es cierto que falta mucho por hacer, pero para reportes regionales esta información podría ser suficiente, sin embargo para estudios locales y de mayor detalle sería obligado el trabajo de campo, los muestreos destructivos y la medición de los reservorios que aún no se han medido en estos trabajos.

La combinación de métodos (espaciales y estocásticos) permitirá obtener resultados más precisos en cuanto a los flujos, pero sobretodo reflejarían los resultados sobre el territorio. En esta revisión no se identifican aproximaciones integradas del proceso de emisión-captura de carbono y otros gases en condiciones de cambio de uso del suelo en el tiempo y en el espacio, por lo que es necesario modelar este proceso a partir de la complementariedad de procedimientos espaciales y estadísticos en escalas gruesas y proyectar el balance de pérdidas y ganancias de GEI bajo distintos escenarios de cambio de uso del suelo y su contribución al cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M., Carrillo, F., Díaz, M. (2009), "Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. Et Cham, *TERRA Latinoamericana*, vol. 27, núm. 2, Universidad Autónoma de Chapingo, 105-114 pp.
- Aguirre, C., Valdez, J., Ángeles, G., Santos, H., Haapanen, R., Aguirre, A. (2009), "Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de Pino patula en Hidalgo, México", *Agrociencia*, vol. 43, núm. 2, Colegio de Posgraduados, 209-220 pp.
- Australian Greenhouse Office, (2011), *National Carbon Accounting System. Carbon Accounting Model for Forests (CAMFor)*, disponible en <http://www.ieabioenergy-task38.org/software-tools/camfor.pdf>, consultado en julio de 2011.
- Avendaño, D., Acosta, M., Carrillo, F., Etchevers, J. (2009), "Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*", *Fitotecnica Mexicana*, vol. 32, núm. 3, 233-238 pp.
- Castelán, R., Ruiz, J., Linares, G., Pérez, R., Tamariz, V. (2007), "Dinámica de cambio de uso espacio temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México", *Investigaciones Geográficas*, núm. 64, 75-89 pp.

- Díaz, R., Acosta, M., Carrillo, F., Buendía, E., Flores, E., Etchevers, J. (2007), "Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. Et Cham", *Madera y Bosque*, año/vol. 13, núm. 001, Instituto de Ecología, A.C. 25-34 pp.
- Etchevers, J., Vargas, J., Acosta, M., Velázquez, A. (2002), "Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México", *Agrociencia*, año/vol. 36, núm. 006. 725-736 pp.
- Forestry Commission (2011), *The CARBINE carbon accounting model*. En línea disponible en <http://www.forestresearch.gov.uk/fr/INFD-633DXB>, consultado en septiembre de 2011.
- Intergovernmental Panel Climate Change (IPCC), (2006), *Guide lines for National Green House Inventories*. En línea, disponible en <http://www.grida.no/climate/ipcc>, consultado en septiembre de 2010.
- Masera O., M.J. Ordóñez y R. Dirzo (1997), "Carbon emissions from mexican forests: current situation and long term scenarios", *Climatic Change*, 265-295 pp.
- Masera, O., De Jong, B., Ricalde, I. (2000), consolidación de la oficina Mexicana de gases de efecto invernadero, Sector Forestal, reporte final, Instituto Nacional de Ecología, 197 pp.
- Mendizabal, H.L., Márquez, J., Alba, J., Cruz, H., Ramírez, E. (2008), "Cambio climático y comunidades forestales", *Foresta Veracruzana*, vol. 10, núm. 2. 49-56 pp.
- Ordóñez, B., J. de Jong, O. Masera (2001), "Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus Pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán", *Madera y Bosque*, año/vol. 7, núm. 002, 27-47 pp.
- Ordóñez, J.A. y O. Masera (2001), "Captura de carbono ante el cambio climático", *Madera y Bosques*, año/vol. 7, núm. 001, 3-12 pp.
- Ordóñez, C., Bravo, F., Notivol, E. (2009), *Cuantificación y representación geográfica del carbono acumulado en las masas forestales de la Comunidad Autónoma de Aragón a partir de datos del IFN*, 5º Congreso Forestal Español, Ávila, España.
- Pacheco, F.C., A. Aldrete, A. Gómez, A. Fierros, V. Cetina, H. Vaquera (2007), "Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus Greggii Engelm*", *Revista Fitotecnica Mexicana*, año/vol. 30, núm. 003, Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. Chapingo, México, 251-254 pp.

- Pimienta, D., Domínguez, G., Aguirrez, O., Hernández, F., Jiménez, J. (2007), "Estimación de biomasa y contenido de carbono en *Pinus Cooperi Blanco*, en Pueblo Nuevo, Durango", *Madera y Bosque*, año/vol. 13, núm. 001. 35-46 pp.
- Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2006), *Iniciativa latinoamericana y caribeña para el desarrollo sostenible. Indicadores de seguimiento: México 2005*, Semarnat, México.
- Riofrío, G. (2007), *Cuantificación del carbono almacenado en sistemas agroforestales en la estación experimental Santa Catalina, INIAP, Ecuador*, tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. Disponible en: <http://www.es.scribd.com/doc/35448943/Cuantificacion-de-Carbono-en-sistemas-agroforestales> Consulta: mayo de 2011.
- Rodríguez, R., Jiménez, J., Aguirrez, O., Treviño, E., Razo, R. (2009), Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biósfera El Cielo, Tamaulipas, México, *Ra Ximhai*, año/vol. 5, núm. 3. 317-327 pp.
- Schlesinger, W.H. (1997), *Biogeochemistry: an Analysis of Global Change*, Academic Press, San Diego, CA. USA, 588 pp.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006), *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2002*, INE, México, 258 pp.
- Segura, C. M., Sánchez, P., Ortiz, C., Gutiérrez, C. (2005), "Carbono orgánico de los suelos de México", *TERRA Latinoamericana*, vol. 23, núm. 1, Universidad Autónoma de Chapingo, 21-28 pp.
- Silva, F.M. y Návar, J.J. (2009), "Estimación de factores de expansión de carbono en comunidades forestales templadas del norte de Durango", México, *Revista Chapingo*, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, vol. 15, núm. 2, 155-163 pp.
- Universidad Austral de Chile, (2011), *Simuladores de crecimiento*. Disponible en http://www.uach.cl/procarbono/cuantificacion_del_carbono.html#sub_2. Consulta, julio de 2011.
- Vallejo, A., Rodríguez, P. (2008), *Curso internacional "Diseño de actividades REDD para la mitigación del cambio climático*, Catie, Costa Rica.

LOS BOSQUES MONTANOS DE NIEBLA EN MÉXICO: HETEROGENEIDAD AMBIENTAL Y ALMACENES DE CARBONO

G. Álvarez Arteaga¹,

Krasilnikov, P. ², García-Calderón, N. E.^{3*}

*¹Laboratorio de Edafología Nicolás Aguilera,
Dpto. Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional Autónoma de México*

²Institute of Biology, Karelian Research Center RAS, Russia

*³UMDI-DERN Facultad de Ciencias, Campus Juriquilla,
Universidad Nacional Autónoma de México*

RESUMEN

Con objeto de identificar aquellos factores bióticos y abióticos relacionados con la capacidad de los bosques montanos de niebla para capturar carbono en sus diferentes componentes, se procedió a realizar una investigación documental a partir de diferentes bases de datos científicas. Los resultados indicaron que los principales factores considerados para tal efecto son su composición florística y estructural, elevada precipitación y humedad atmosférica, cambios de temperatura y luminosidad, así como condiciones edáficas restrictivas. Al comparar los diferentes estudios nacionales e internacionales se pudo constatar la elevada capacidad de estos

ecosistemas forestales para acumular carbono en su parte aérea y terrestre, pero también su alta fragilidad ante cambios de uso o manejo, por lo que su creciente deterioro y desaparición puede contribuir de manera importante en la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Palabras clave: bosques montanos, almacenes de carbono, biomasa, suelo.

CLOUD MOUNTAIN FORESTS OF MÉXICO: ENVIRONMENTAL HETEROGENEITY AND CARBON STORAGE

ABSTRACT

In order to identify those biotic and abiotic factors related to the capacity of cloud mountain forests to accumulate carbon, we proceeded to make a documentary research from different scientific databases. Results indicated that the main factors considered for this purpose are its floristic composition and structure, high rainfall and atmospheric humidity, temperature changes and light and soil restrictions. When comparing the different national and international studies it was found the high capacity of these ecosystems to store carbon in biomass and soil, but also its fragility to land changes and handling. So, increasing deterioration and disappearance can contribute in the emission of greenhouse gases into the atmosphere.

Keywords: cloud mountain forests, carbon storage, biomass, soil.

INTRODUCCIÓN

La acelerada destrucción de que son objeto los ecosistemas forestales, particularmente en zonas tropicales y subtropicales, determina que su participación dentro del ciclo global del carbono cobre relevancia por la emisión de importantes cantidades de carbono (C) a la atmósfera —mismas que contribuyen a acelerar el cambio climático global—, pero también por la pérdida de sostenibilidad a través del manejo inadecuado que se ha hecho de

ellos en muchos casos. Por otra parte, resulta cada vez más necesario plantear estrategias viables tendientes a mitigar los efectos del cambio climático, por ejemplo, aquellas que permitan reincorporar a los ecosistemas terrestres al menos una parte del C atmosférico excedente. Para dar sustento a tales planteamientos, es imprescindible conocer la dinámica del C en los ecosistemas forestales y un primer paso es contar con la información básica sobre los contenidos de carbono en los diferentes almacenes del ecosistema, así como los mecanismos que determinan su permanencia o expulsión del mismo.

Partiendo de esta temática, el presente trabajo se ha enfocado en realizar una revisión del estado actual que guarda el estudio holístico de los BMN en México y el mundo, considerando aspectos básicos tales como su distribución geográfica, composición florística y estructural, los factores ambientales que determinan su amplia heterogeneidad espacial y finalmente, los servicios ambientales que prestan por la captura de agua y carbono.

RESULTADOS

Caracterización general de los bosques montanos de niebla

El bosque montano de niebla (BMN), *cloud forest*, *montane cloud forest* (en la literatura de habla inglesa) o bosque mesófilo de montaña (Rzedowski, 1978) engloba de manera convencional a una serie de comunidades vegetales muy heterogéneas, caracterizadas por prosperar en zonas montañosas, en una posición altitudinal donde la condensación orográfica del aire saturado por humedad conforma un estrato nuboso denso presente de manera frecuente o semipermanente. Dado que su ubicación es propia de las grandes cordilleras continentales así como de macizos montañosos aislados dentro de las zonas tropicales e intertropicales, el intervalo altitudinal en el que se pueden desarrollar es muy amplio (700 a 2700 msnm).

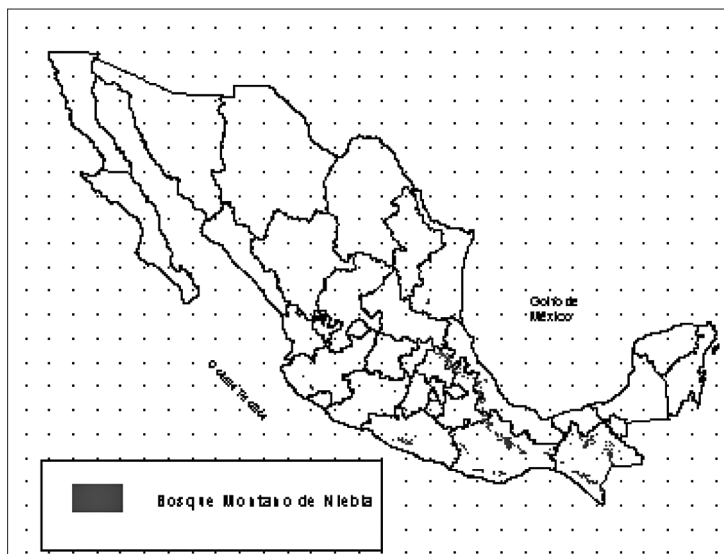
Los bosques de niebla encabezan la lista de los ecosistemas más afectados a nivel mundial y se considera que los remanentes de estos sistemas están confinados en pequeñas áreas sumamente fragmentadas. A finales de los años setenta se creía

que la extensión original de estos bosques se aproximaba a los 50 millones de hectáreas (Bockor, 1979). Cifras más recientes los sitúan en alrededor de 38 millones de hectáreas, lo cual es aproximadamente el 0.26% de la superficie terrestre (Bubb *et al.*, 2004). Estos sistemas no se distribuyen de manera homogénea entre las diferentes regiones tropicales y subtropicales: del área global donde potencialmente se podrían establecer, 25.3% corresponde a América, 15% a África y 59.7% a Asia. Dentro de los bosques tropicales, los bosques de niebla únicamente comprenden 2.5% de la superficie total. En México, para el año de 2002, la Comisión Nacional Forestal estimó que la cobertura de estos sistemas alcanzaba una superficie total de 1 700 000 ha (Conafor, 2011) de las cuales aproximadamente el 50% correspondía a vegetación primaria, sin embargo, esta cifra, similar a la estimada por Rzedowski (1996), podría ser bastante optimista para la cobertura actual, considerando la elevada tasa de deforestación a que están sujetos estos ecosistemas.

Dentro del territorio mexicano, el BMN se distribuye tanto en la vertiente del Golfo de México, como en la del Pacífico y en el Eje Volcánico Mexicano (figura 1). En la Sierra Madre Oriental parte del suroeste de Tamaulipas y corre a lo largo de las laderas de barlovento hasta el centro de Veracruz (incluyendo reductos aislados en los estados de San Luis Potosí, Hidalgo y Puebla) y de ahí hasta las sierras del norte y noroeste de Oaxaca y Chiapas. En la vertiente del Pacífico su distribución es más esporádica tanto a lo largo de la Sierra Madre del Sur, como en la Sierra Madre Occidental, hasta Sinaloa y Durango (Rzedowski, 1996).

Una característica común a los BMN es su amplia heterogeneidad en cuanto a condiciones del medio físico y biótico se refiere. Algunos estudios señalan que el amplio intervalo altitudinal dentro del que se sitúan estos ecosistemas, por sí mismo no es un componente ecológico de peso en relación con la dinámica del C y otros nutrientes, pero es un factor que propicia los cambios climáticos y edáficos al integrar los efectos directos e indirectos de los gradientes de temperatura y precipitación. Un consenso generalizado establece que el almacenamiento de C y su flujo a través de estos intervalos de altitud probablemente están controlados por una compleja interacción de condiciones climáticas, bióticas (flora y fauna) y edáficas, las cuales se detallan a continuación.

Figura 1
UBICACIÓN DE LOS BOSQUES MONTANOS DE NIEBLA EN MÉXICO



Fuente: Elaboración propia.

Composición florística

Por el intervalo de altitud en el que se establecen, los bosques de niebla mantienen una fuerte interacción con ecosistemas tropicales y templados, siendo su composición florística resultado de la mezcla de especies de unos y otros, aunque claramente muestran una mayor afinidad tropical por la gran diversidad de hierbas, arbustos, lianas, palmas y particularmente epífitas que en ellos se desarrollan, además de contar con un gran número de especies arbóreas tropicales que integran el dosel y subdosel de estos bosques en ciertas regiones. De hecho, es una práctica común clasificarlos como ecosistemas tropicales acuñando el término en habla inglesa de “tropical mountain cloud forests” (Hamilton *et al.*, 1995), pero en el caso de México existen controversias para considerarlos dentro de este límite por ser los más septentrionales de su tipo (Challenger, 1998).

En el BMN en México, existen alrededor de 2 500 especies de plantas vasculares agrupadas en 650 géneros y 144 familias que lo habitan de manera exclusiva o preferente (Rzedowski, 1991), lo que representa alrededor de 10% de la riqueza florística calculada para todo el país, siendo por tanto este tipo de vegetación más diverso por unidad de superficie que cualquier otro en el territorio nacional.

La afinidad florística de estos bosques con los de otras partes del mundo (p.e. los del este de los Estados Unidos, el sudeste asiático, centro, Sudamérica y el Caribe) ha sido documentada por diversas investigaciones (Miranda y Sharp, 1950; Rzedowski y Palacios-Chávez, 1977; Luna-Vega *et al.*, 1988), por lo cual se ha propuesto que su conformación parte de la integración de componentes florísticos de diferente procedencia (Rzedowski 1978, Luna-Vega *et al.*, 1989) siendo estos: 1) Origen neártico, particularmente representados por los árboles del dosel y que constituyen aproximadamente 4% del total de géneros (Miranda y Sharp, 1950), 2) Neotropical, representado por los demás árboles del dosel, casi todas las epífitas y la mayoría de los árboles, arbustos y herbáceas del sotobosque (Rzedowski, 1991; Gentry, 1982) que en conjunto comprenden 46% del total de géneros (aproximadamente 295) (Rzedowski, 1996), 3) Alrededor de 4% de los géneros refleja antiguas conexiones con los bosques asiáticos, por ejemplo, *Bocconia*, *Clethra*, *Gaultheria*, *Hedyosmum*, *Nectandra*, *Phoebe*, *Styrax* y *Turpinia* (Luna-Vega *et al.*, 1988). 4) Finalmente y como reflejo de la evolución *in situ* de la vegetación, 2% de ella (14 géneros) corresponden a especies endémicas (Rzedowski, 1996).

Entre las angiospermas, las familias de plantas mejor representadas en el BMN son las Orchidaceae (83 géneros), Asteraceae (34), Rubiaceae (29), Fabaceae (21), Gesneriaceae (17), Melastomataceae (13), Solanaceae (13), Scrophulariaceae (13), Euphorbiaceae (12) y Ericaceae (11), otras familias de importante distribución son Araceae, Begoniaceae, Bromeliaceae, Lauraceae, Myrsinaceae, Myrtaceae, Piperaceae y Urticaceae. Para las gimnospermas, las familias dominantes se dividen entre árboles del dosel (Pinaceae y Podocarpaceae) y las cícadas del estrato arbustivo. La diversidad de pteridofitas es superior que en otras zonas ecológicas y la familia más importante de helechos es la Polypodiaceae que cuenta con 47 géneros siendo un gran número de ellos endémicos para México (Rzedowski, 1991, 1996).

Estructura del BMN

Los estudios realizados en diferentes partes del mundo sobre la conformación estructural de los BMN dan cuenta de sistemas con vegetación sumamente densa y de menor estatura respecto a otros sistemas forestales de montaña. En ellos, predominan árboles típicamente achaparrados y retorcidos cuyos troncos se ramifican desde muy abajo y están dotados de hojas pequeñas endurecidas (Stadtmueller, 1987), este patrón es más evidente en áreas donde la humedad atmosférica es persistentemente elevada y diversas especies de epífitas pueden alcanzar densidades superiores a las de las selvas húmedas, en tanto que los helechos arborescentes y las cícadas ocupan un nicho ecológico similar al que tienen las palmas de la selva húmeda (Lieberman *et al.*, 1996). Conforme aumenta la latitud se observa una tendencia hacia el predominio de elementos boreales, esto es particularmente cierto para los bosques de niebla mexicanos en cuyo dosel superior suelen predominar árboles caducifolios de clima templado debido a que las temperaturas bajas y la menor radiación solar no limitan su crecimiento (Challenger, 1998).

En los BMN mexicanos, la estructura de la vegetación está conformada en su estrato superior por árboles como *Quercus* spp., *Liquidambar microphylla*, *Magnolia* spp., *Cornus* spp., *Clethra pringlei*, *Dendropanax* spp., *Pinus* spp., *Fagus mexicana*, *Nectandra* spp., *Persea* spp., etc. (Long y Heath, 1991). La mayor parte de estas especies son más afines a climas templados, tienen troncos rectos, por lo general miden entre 15 y 35 m de altura y su diámetro promedio es de 30 a 50 cm, aunque algunas pueden sobrepasar los 2 m de DAP (Williams-Linera, 1991).

Bajo el dosel superior queda conformado un segundo estrato arbóreo, de mayor afinidad tropical con alturas de 12 a 18 m con especies como: *Oreopanax* spp., *Styrax* spp., *Clethra* spp., *Alnus acuminate*, *Crataegus pubescens*, *Podocarpus reichei*, *Persea* spp., *Inga* spp., *Ternstroemia* spp., así como especies juveniles del estrato superior y helechos arborescentes (p.e. *Cyathea* spp., *Sphaeropteris* spp. y *Alsophila salvinii*) (Cuevas-Guzmán, 1988). Por debajo de este segmento, ocasionalmente se forma un estrato arbustivo, —escasamente representado en bosques primarios— con una altura entre 8 y 12 m compuesto por especies como: *Chamaedorea* spp., *Heliconia* spp., *Rapanea* spp., además de un gran número de arbustos y árboles pequeños de las familias

Melastomataceae y Malvaceae junto con individuos juveniles de los estratos superiores (Long y Heath, 1991; Cuevas-Guzmán, 1988; Rzedowski, 1996).

En algunos de estos sistemas que ostentan cierto grado de perturbación, es posible encontrar un estrato herbáceo al cual pertenecen especies como *Begonia* spp., *Chamaedorea* spp., *Phytolacca rugosa*, *Hyptis* spp., *Salvia* spp., *Euphorbia* spp., *Peperomia* spp., entre otras. Debido a la intensa sombra y elevada humedad que prevalecen en el sotobosque, abundan las pteridofitas cuyos géneros más representativos son *Asplenium*, *Polypodium*, *Adiantum*, *Polystichum*, *Pteridium* y *Pteris* entre otros. Para aquellos bosques situados en elevaciones bajas a medias y donde las temperaturas son más elevadas, destaca la presencia de individuos de la familia Cycadaceae. Una característica que identifica ampliamente a estos sistemas es la abundancia de epífitas, muchas de las cuales se integran con los musgos para formar gruesas capas sobre troncos, ramas y hojas de árboles y arbustos, con líquenes y helechos (Williams-Linera, 1991). Entre las epífitas superiores destacan las orquídeas y bromeliáceas y varias especies del género *Peperomia*.

Alta precipitación y humedad atmosférica

Con un régimen de lluvia muy intenso y carácter poco estacional en la mayoría de los casos, los BMN se sitúan de acuerdo a Holdridge (1967) dentro de las zonas de vida con mayor humedad, este carácter está acentuado por la espesa niebla que invade a estos bosques propiciando una saturación en el ambiente que se incrementa hasta determinados rangos altitudinales. Estos cambios influyen de manera importante sobre los procesos fisiológicos en las plantas (Bruijnzeel *et al.*, 1993; Kapelle, 1996) y en los patrones de distribución de algunas especies (Werner, 1995; Vázquez-García, 1995).

Cambios de temperatura y luminosidad

Las variaciones de temperatura e incidencia solar no sólo están dadas por la posición

geográfica (latitud), sino por factores propios del ecosistema como su posición altitudinal, grado de exposición y cobertura de dosel. Whitmore (1984) ha reportado que para estos ecosistemas montanos, la temperatura puede cambiar en un tasa de 0.5 a 1°C por cada 100 m dependiendo de la época del año, hora del día y contenido de vapor de agua en la atmósfera. Adicionalmente, la incidencia de nubosidad en determinadas zonas a lo largo del gradiente altitudinal reduce considerablemente los niveles de radiación.

Producción de compuestos polifenólicos

La producción de este tipo de compuestos por parte de las plantas ha sido reportada consistentemente como un mecanismo para absorber y contrarrestar el efecto de la luz UV en las partes más altas de estos sistemas (Bruijnzeel y Veneklaas, 1998). Cuando las hojas frescas caen al mantillo presentan altas concentraciones de polifenoles, teniendo entre otros efectos, una reducción de la productividad primaria de estos bosques en comparación con otros de altitudes similares (Bruijnzeel y Proctor, 1995, Hafkenseheid, 2000). Otro impacto de los polifenoles es la disminución de las tasas de descomposición y la reducción del impacto de la toxicidad del aluminio y bajas concentraciones de nitrógeno en el suelo (Hafkenseheid, 2000).

Condiciones edáficas

Quizá uno de los recursos menos comprendidos en estos ecosistemas es el suelo. La elevada precipitación a lo largo de todo el año predispone que la mayoría de los suelos en que se sitúa este tipo de vegetación prevalezcan condiciones hidromórficas, acidez extrema y baja fertilidad (Bruijnzeel y Veneklaas, 1998; Roman y Scatena, 2008), en tal sentido, el fuerte lavado y desbasificación de que son objeto muchos de estos suelos, ocasiona que el flujo principal de nutrientes vaya del compartimiento de las plantas al de los residuos vegetales y por medio de la fauna del suelo se integra a la materia orgánica del suelo (MOS), siendo ésta la encargada principal de proveer de

nutrientes a las plantas. A diferencia de zonas templadas donde la edafogénesis permite la formación de arcillas con alta capacidad de retención de nutrientes en forma iónica, en muchos de los bosques húmedos e hiperhúmedos, estos minerales secundarios no existen o se presentan en formas con baja carga eléctrica en su superficie, lo que explica en gran parte su escasa disponibilidad para retener nutrientes. En consecuencia, en la mayoría de las regiones húmedas e hiperhúmedas con suelos fuertemente lixiviados y desbasificados, los nutrientes no se encuentran principalmente asociados a las arcillas minerales, sino a la materia orgánica del suelo (Montagnini y Jordan, 2002). Otros estudios indican que la disponibilidad de nutrientes también puede verse afectada por las altas concentraciones de aluminio, hierro y manganeso (Bruinjeel y Proctor, 1995).

Los servicios ambientales en los BMN

Aun considerando su escasa cobertura dentro del territorio mexicano (Rzedowski, 1978), el estudio de los BMN no sólo es importante por su alta biodiversidad en flora y fauna —como se ha resaltado previamente—, sino también desde un punto de vista antropocéntrico, por los múltiples productos y servicios ambientales que generan a nivel local y regional y también por su papel dentro del contexto del ciclo global del carbono, ya sea como emisores o receptores de este componente.

Servicios hidrológicos

Por su ubicación en las laderas montañosas, expuestas a las precipitaciones muy elevadas (entre 1 500 y 6 000 mm anuales), uno de los servicios ambientales más importantes que presta el BMN es la captación de agua de lluvia y de la humedad ambiental (nubes y neblina), aún durante la época más seca del año, con lo cual proveen de un volumen de agua muy importante a la red hidrológica local y regional. Bajo condiciones de alta humedad, la cantidad de agua que es directamente interceptada por la vegetación puede ser de 15 a 60 % del agua de lluvia (Bruinjeel *et al.*, 1993).

Considerando que el suelo es un reservorio muy importante de semillas y nutrientes, hábitat de innumerables especies vegetales y animales, y valorando el hecho de que la mayoría de los BMN se ubican en laderas de fuerte pendiente, la erosión del suelo puede llegar a representar un problema sumamente grave cuando es despojado de la cobertura vegetal, ya que la recuperación del sistema mediante procesos sucesionales tiende a ser extremadamente lenta. La deforestación del BMN también puede traer serias repercusiones sobre las actividades y asentamientos humanos a causa de la sedimentación de los ríos y disminución de su caudal en temporada de secas, el asolvamiento de presas y las posibilidades de inundación en temporada de lluvias (Challenger, 1998).

Captura de carbono

Desde la perspectiva del cambio climático global, la acelerada destrucción de los bosques montanos pone en el centro de debate la necesidad de entender la magnitud con que participan estos ecosistemas en la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera y determinar su papel como potenciales sumideros de carbono que contribuyan a mitigar este fenómeno de consecuencias globales. Para lograr estas metas, uno de los objetivos planteados por el Grupo Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001), es la intensificación del estudio del ciclo de carbono, tanto en su parte estática (almacenes) como dinámica (flujos).

El estudio sobre la cuantificación de C en sus diferentes almacenes aéreos y subterráneos para los ecosistemas terrestres reviste cierta complejidad: si bien las estimaciones del contenido de C en la biomasa arbórea se han perfeccionado debido al surgimiento de herramientas metodológicas que emplean modelos alométricos o instrumentos de percepción remota (Brown y Lugo, 1992; Chave *et al.*, 2004), también es cierto que dada la heterogeneidad florística, estructural y climática de estos sistemas forestales, resulta poco efectivo realizar extrapolaciones de información generada a partir de estudios puntuales, basta resaltar el hecho de que en una hectárea de BMN es posible encontrar un número muy elevado de especies leñosas, muchas de ellas con un patrón de crecimiento que se modifica de acuerdo con las condiciones bioclimáticas y edáficas imperantes (Tanner, 1980).

En estos ecosistemas, el segmento de raíces pueden representar entre 10 y 40% de la biomasa total y es quizá, el almacén más complejo de evaluar debido a la alta variabilidad con que se desarrolla el sistema radicular de las plantas, aunado al elevado costo e inversión de tiempo requerido para cuantificarlas; lo anterior ha ocasionado que pocos estudios realicen esta tarea de manera eficiente, recurriendo en muchos casos al uso de datos teóricos basados en información de la literatura para tipos de vegetación similar (Cairns *et al.*, 1997; Mac Dickens, 1997).

El suelo representa el principal almacén de C en la mayoría de los ecosistemas terrestres y en los bosques nublados no es la excepción. En estos sistemas, las condiciones de alta humedad durante la mayor parte del año no favorecen la descomposición de la MOS por lo que tiende a acumularse de manera relativamente rápida. Debido a ello, aun cuando un BMN llega a su madurez tras haber alcanzado el equilibrio entre el crecimiento de biomasa nueva y la muerte de biomasa vieja, la acumulación de C debería seguir siendo considerable. Diversos estudios a nivel internacional corroboran esta aseveración, así por ejemplo Edwards y Grubb (1977) obtienen valores de 783 Mg C ha⁻¹ para los BMN de Nueva Guinea. Delaney *et al.* (1997) en Venezuela estimaron almacenes totales de 488 Mg C ha⁻¹. La recopilación de dichos estudios se puede apreciar en el cuadro 1. Un punto interesante a considerar en todas estas investigaciones es la heterogeneidad en cuanto a métodos de cuantificación y almacenes evaluados, por ello las comparaciones deben efectuarse con cautela.

En México, la información para estos ecosistemas es escasa, pero los estudios al respecto coinciden en su elevada capacidad de almacenamiento (cuadro 2). En el estado de Chiapas, por ejemplo, de Jong (1999) ubicó en 468 Mg C ha⁻¹ el almacén total de C para algunos bosques de encino y BMN Chiapas; para bosques montanos tropicales primarios de Veracruz, Hughes *et al.* (1999) determinaron un almacén total de 402 Mg C ha⁻¹, por otra parte, Acosta *et al.* (2003) cuantificaron 336 Mg C ha⁻¹ para bosques de liquidambar en la Región Mazateca de Oaxaca, cifra similar a la registrada por los autores de este trabajo (384 Mg C ha⁻¹) dentro de la región chinanteca en Oaxaca (Alvarez *et al.*, en prensa). Gracias a la consolidación de diferentes grupos de investigación especializados en el estudio del ciclo del carbono, es previsible que se incrementen en número y calidad la información sobre los inventarios de carbono en los ecosistemas de México.

Cuadro 1
DIFERENTES ESTIMACIONES DE BIOMASA Y CARBONO EDÁFICO EN BOSQUES MONTANOS TROPICALES Y SUBTROPICALES DEL MUNDO

País	Zona de vida ^(a)	T ^b	Precipitación	Altitud	Condición	Biomasa aérea	Raíces	Necro-masa	Mantillo	Herbáceas	Biomasa total ^c	Suelo	Prof ^g	C total (biomasa + suelo)	Fuente
Nueva Guinea	T-Lower montane rain forest	13.0	4000	2400-2500	Virgen	155	19.5	5.5	3.9		184 ^d	599	100	783	Edwards y Grubb 1977
		13.5	3750		Virgen							214	100		
		13.8	3650		Virgen							364	100		
		14.4	4400		Virgen							252	100		
	T-Montane rain forest	10.8	2941		Maduro							93	13		Jenny 1950
	T- Lower montane wet forest	17.5	2900		Maduro							193	100		
Jamaica	T-Montane wet forest	12.0	1500		Virgen	174	36.5				210				Brun 1976
		15.0	3000		Maduro	140	32.5				172	80	40	252	
	S-Lower montane wet forest	15.0	3000		Maduro							250	45		Tanner 1977, 1980
		15.0	3000		Maduro							90	40		
Venezuela	T-Lower montane moist forest	15.0	1400	2310	Maduro	173	38.0	21.2	3.1		235	253	100	488	Delaney 1997
		10.5	2136	2640	Maduro	157	34.5	17.2	2.7		211	257	100	468	

Nueva Guinea	T-Lower montane rain forest	2300	1560	Virgen	147	4.8 ^e	3.4	155	95	100	250	Kitayama y Aiba 2002
		2300	1860	Virgen	119	4.5 ^e	4.4	128	90	100	218	
	T-Upper montane rain forest	2300	2590	Virgen	154	4.8 ^e	2.7	161	150	100	311	
		2300	2700	Virgen	61	4.8 ^e	3.7	70	92	100	162	
Puerto Rico	T-Lower montane rain forest	3725		Maduro	112	34.5		146				Frangi y Lugo 1985
Puerto Rico	T-Lower montane rain forest	3920		Maduro	99	33.0		132				Ovington y Olson 1970
Venezuela	T-Lower montane rain forest	1500		Maduro	174	28.0		202				Grimm y Fassbender 1981
Ecuador	T-Lower montane rain forest	2220	1950	Maduro				124	10			Wilcke <i>et al.</i> , 2002
México	S-Lower montane wet forest	2000		Maduro	189	36.0		225	243		468	De Jong, 1999, ^f
México	Bosque de encino ^h			Maduro	142		3.2	145	116		261	Ordóñez <i>et al.</i> , 2008 ^f

Cuadro 2
ESTIMACIÓN DE LOS ALMACENES DE CARBONO EN DIFERENTES ECOSISTEMAS FORESTALES DE MÉXICO

<i>Localidad</i>	<i>Vegetación</i>	<i>Altitud</i> (m)	<i>Condición</i> (r)	<i>B. arbórea</i>	<i>Raíces</i>	<i>Necromasa</i>	<i>Mantillo</i>	<i>Herbarb</i>	<i>Sudo</i>	<i>Prof</i> cm	<i>C.Total</i> Mg ha ⁻¹	<i>Fuente</i>
Bosques tropicales												
Chamela Jalisco	Bosque tropical perenifolio	ND	BP	159.4	12.9	21.6	6.4		113.8	100	314.1	Jaramillo <i>et al.</i> , 2003
	Bosque tropical caducifolio	ND	BP	31.6		15.7	5.6	2.5	76.2	100	131.6	
Los Tuxtlas Veracruz	Bosque tropical sec, 50 años	100 - 300	BS	130.2		2.7	3.1		205.0	100.0	341.0	Hughes <i>et al.</i> , 1999
	Bosque tropical primario	100 - 300	BP	185.2		7.1	2.8		207.0	100.0	402.1	
ND	Bosque tropical perenifolio		ND	162.0					70.0	ND	232.0	Masera, 1997
ND	Bosque tropical caducifolio		ND	61.0					60.0	ND	121.0	
Huautla, Morelos	Selva baja caducifolia, 40 años	ND	BS	33.2	11.7			2.25 ⁽²⁾	62.4	95	109.1	Gómez Díaz, 2008
	Bosque de encino 40 años	ND	BS	137.3	17.8		5.8	4.6	65.6	95	230.8	

Bosque mesófilo de montaña									
Altos de Chiapas	Bosques de encino y BMM	1500 - 2900	BP	189.0	36.0	242.8	100	467.8	De Jong 1999
El Cielo, Tamaulipas	Bosque mesófilo de montaña	800 - 1500	BP	56.7					Rodríguez Luna <i>et al.</i> , 2006.
Región Mazateca	Bosque de liquidambar		BP	93.2	3.3	5.9	0.5	133.1	100 335.9 Acosta <i>et al.</i> , 2001
Sierra Norte Oaxaca	Bosque de aile		BS	36.9	1.8	8.4	1.0	123.2	100 271.3
	Bosque montano bajo	1500	BP	151.5	28.8	34.4	0.4	222.5	100 440.2
Región Chinantla	Bosque montano bajo	1950	BP	116.1	22.1	16.43	0.3	200.8	100 358.7
Sierra Norte Oaxaca	Bosque montano alto	2050	BP	110.8	21.1	18.15	0.2	220.2	100 372.9 Álvarez <i>et al.</i> , 2009
	Bosque montano alto	2400	BP	105.9	20.1	18.99	0.3	183.0	100 330.5
	Bosque montano alto	2500	BP	207.3	39.4	12.66	0.7	158.0	100 420.2
Bosques templados									
	B. Pino-encino	1500 - 2900	ND	135.4	30.9	174.4	100	340.7	De Jong, 1999
	B. Pino	1500 - 2900	ND	120.0	25.7	172.6	100	318.3	
Altos de Chiapas	B. degradado y fragmentado	1500 - 2900	ND	29.1	8.9	184.2	100	222.2	
	Tierras cultivadas	1500 - 2900	ND	6.0	0.6	153.3	100	159.9	

ND	Bosque de pino	ND	70.0			109.0	ND	179.0	Masera, 1997
ND	Bosque de encino	ND	53.0			100.0	ND	153.0	
	Bosque de pino	BP	100.5	26.0	3.0	93.1	30	222.9	
R. Purépecha	Bosque de pino- encino	BP	91.5	23.7	3.8	0.3			Ordoñez <i>et al.</i> , 2008
Michoacán	Bosque de encino	BP	112.8	28.6	3.2	0.6	116.0	30	
	Bosque de abeto	BP	134.5	34.8	4.1	0.4	93.0	30	266.8
R. Cuicateca	Bosque de encino	BS	30.0	14.1	7.6	0.0	35.1	100	186.8
R. Mixe	Acahual 10 años	BS	13.4	7.8	7.3	4.3	114.0	100	246.8
Sierra Norte Oaxaca									Acosta <i>et al.</i> , 2001

ND: No determinado; (1) BP: bosque primario; BS: bosque secundario; (2) El dato corresponde al C almacenado en hojarasca y hierbas-arbustos.

CONCLUSIÓN

Los bosques montanos de niebla representan a uno de los ecosistemas terrestres más amenazados por las actividades humanas. Los elevados índices de deforestación permiten inferir que de continuar con esta tendencia, en cuestión de décadas, su cobertura quedará limitada a relictos aislados, con lo cual perderán en gran medida su funcionalidad ecosistémica y contribuirán con la emisión de importantes volúmenes de gases de efecto invernadero a la atmósfera. De acuerdo con la investigación realizada, ha sido posible establecer la magnitud con que estos sistemas contribuyen en la captura y almacenamiento de carbono en sus diferentes reservorios; no obstante, también resulta claro que es necesario disponer de mayor información que permita esclarecer de manera concreta los mecanismos que determinan la acumulación y permanencia del carbono dentro de los distintos almacenes, tanto en biomasa como en suelo; para realizar dicha tarea, es necesario incorporar nuevas metodologías que consideren la compleja heterogeneidad ambiental de estos sistemas.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta M. (2003), *Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícola de laderas en México*, tesis doctoral, Colegio de Posgraduados, México, 89 pp.
- Álvarez A.G., P.V. Krasilnikov, N.E. García Calderón y F. García-Oliva, *Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla, dentro de la Sierra Norte de Oaxaca, México* (en prensa).
- Bubb P., I. May, L. Miles, J. Sayer (2004), *The cloud forest agenda report*, UNEP World Conservation Monitoring Centre, United Kingdom.
- Brown S. y A.E. Lugo (1982), "The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global cycle", *Biotropica*, 14:161-187.
- Bruijnzeel L.A., M.J. Waterloo, J. Proctor, A.T. Kuiters y B. Kotterink (1993), "Hydrological observations in montane rain forests on Gunung Silam, Sabah Malaysia, with special reference to the 'Massenerhebung' effect", *Journal of Ecology*, 81: 145-167.

- Bruijnzeel L.A. y J. Proctor (1995), "Hydrology and Biogeochemistry of tropical montane cloud forests: What do we really know?" en L.S. Hamilton, J.O. Juvik y F.N. Scatena (eds.), *Tropical montane cloud forests. Ecological Studies*, 110, Springer-Verlag, Nueva York, pp. 38-78.
- Bruijnzeel L.A. y E. J. Veneklaas (1998), "Climatic conditions and tropical montane forest productivity: The fog has not lifted yet", *Ecology*, 79: 3-9
- Bruijnzeel L.A. (2002), "Hydrology of tropical montane cloud forests: a reassessment. In: J.S. Gladwell (Ed.), *Proceedings of the Second International Colloquium on Hydrology of the Humids Tropics*, CATHALAC, Panama.
- Cairns M.A., S. Brown, E.H. Helmer, G.A. Baumgardner (1997), "Root biomass allocation in the world's Upland forests", *Oecología*, 111: 1-11
- Challenger A. (1998), *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro*, CONABIO, Instituto de Biología, UNAM. Agrupación Sierra Madre A.C., México, p. 846.
- Chave J., R. Condit, S. Aguilar, A. Hernández, S. Lao y R. Pérez (2004), "Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates", *Phil. Trans Royal Society of London*, 359: 409-420
- Conafor (2011), Inventario nacional forestal. http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=8. Consultado en septiembre de 2011.
- Cuevas-Guzmán R. (1988), *El bosque mesófilo de montaña en la Sierra de Manantlán, Jalisco. México. Notas sobre la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán 11*, Laboratorio natural Las Joyas, Universidad de Guadalajara.
- Delaney M., S. Brown, A.E. Lugo, A. Torres-Lezama and N. Bello Quintero (1997), "The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of Venezuela", *Biotropica*, 30: 2-11.
- Gentry A.H. (1982), "Neotropical floristic diversity: Phytogeographical connections between Central and South America, Pleistocene climatic fluctuations or an accident of the Andean orogeny?", *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 69: 557-593.
- Hafkenscheid R.L.L.J. (2000), *Hydrology and biogeochemistry of montane rain forests of contrasting stature in the Blue Mountains of Jamaica*, Ph D thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam.

- Hamilton L.S., J.O. Juvik y F.N. Scatena (eds.) (1995), "Tropical montane cloud forests", *Serie. Ecological Studies*, num. 110, Springer-Verlag, Nueva York.
- Holdridge L.R. (1967), *Life zone ecology*, Tropical Science Center, San José, Costa Rica.
- IPCC (2001), *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Panel Intergubernamental panel for Climatic Change*, Summary for policymakers, Cambridge University Press, United Kingdom, 20 pp.
- Hughes R.F., J.B. Kauffman, V.J. Jaramillo (1999), "Biomass, carbon and nutrient dynamics of secondary forests in a humid region of México", *Ecology*, 80: 1892-1907.
- Kapelle M. (1996), *Los bosques de roble (Quercus) de la Cordillera de Talamanca, Costa Rica: Biodiversidad, ecología, conservación y desarrollo*, Instituto Nacional de Biodiversidad, Costa Rica y Universidad de Amsterdam. Wageningen.
- Lieberman D., M. Lieberman, R. Peralta y G.S. Hartshorn (1996), "Tropical forest structure and composition on a large-scale altitudinal gradient in Costa Rica, *Journal of Ecology*" 84: 137-152.
- Long A. and M. Heath (1991), *Flora of the El Triunfo Biosphere Reserve, Chiapas, México: A preliminary floristic inventory and the plants communities of polygon 1*, Anales del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica, 62: 133-172.
- Luna-Vega I., L. Almeida-Leñero y J. Llorente-Bousquets (1989), *Florística y aspectos fitogeográficos del bosque mesófilo de montaña de las cañadas de Ocuilán. Estados de Morelos y México*, Anales del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica, 59: 63-87.
- MacDickens K.G. (1997), *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*, Winrock International Institute for Agricultural Development, pp. 87.
- Miranda F., A.J. Sharp (1950), "Characteristics of the vegetation in certain temperate regions of eastern México", *Ecology*, 31: 313-333.
- Montagnini F. y C.F. Jordan (2002), "Reciclaje de nutrientes", en *Ecología y conservación de bosques neotropicales* (M.R. Guariguata y G. H. Kattan eds.), Libro Universitario Regional, Cartago, Costa Rica.
- Roman L.A., F.N. Scatena (2008), "Tropical montane cloud forest soils: an overview", in Juvik, J. *et al.*, *Synthesis Volume of the 2nd International Symposium on Tropical montane cloud forests*.

- Rzedowski J. (1991), "Análisis preliminar de la flora vascular del bosque mesófilo de montaña en México", *Macpalcóchitl*, 24: 14-15.
- _____ (1996), Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña en México, *Acta Botánica Mexicana*, 35: 25-44.
- Rzedowski J. y R. Palacios Chávez (1977), "El bosque de Engelhardtia (*Oreomunnea*) mexicana en la región de la Chinantla (Oaxaca, México), una reliquia del Cenozoico, *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 36: 93-127.
- Stadtmüller T. (1987), *Los bosques nublados en el trópico húmedo, una revisión bibliográfica*, Universidad de las Naciones Unidas, Ginebra, Suiza.
- Tanner E.V.J. (1980), "Studies of the biomass and productivity in a series of montane rain forests in Jamaica", *Journal of Ecology*, 58: 573-588.
- Vázquez – García J.A. (1995), "Cloud forest archipiélagos: preservation of fragmented montane ecosystems in tropical America. Tropical montane cloud forests", in: Hamilton L.S., J.O. Juvik y F.N. Scatena (eds.), *Ecological Studies*, 110: 315-332. Springer-Verlag, Nueva York.
- Werner W.L. (1995), "Biogeography and ecology of the upper montane rain forest of Sri Lanka", (Ceylon), in Hamilton L.S., J.O. Juvik and F.N. Scatena (eds.), "Tropical montane cloud forests, *Ecological Studies*, pp. 224-230. Springer-Verlag, Nueva York.
- Williams-Linera G. (1991), "Nota sobre la estructura del estrato arbóreo del bosque mesófilo de montaña en los alrededores del campamento "El Triunfo", Chiapas", *Acta Botánica Mexicana*, 13: 1-7.
- Whitmore T.C. (1984), *Tropical rain forests of the Far East*, 2a. ed., Clarendon Press, Oxford.

ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Gabriela Gutiérrez Martínez¹, Alejandro Valdés Carrera²

María Estela Orozco Hernández²,

*¹Facultad de Química, ²Facultad de Planeación Urbana y Regional,
Universidad Autónoma del Estado de México*

RESUMEN

En este trabajo se expone la agenda de estrategias que en concordancia con lo dispuesto por las instancias internacionales y nacionales, plantea el gobierno del Estado de México en materia de mitigación y adaptación ante el cambio climático. Para ello se realizó la revisión de las fuentes de información institucional, en las que se anticipan una serie de líneas de atención y recomendaciones generales, cuyos alcances y resultados aún están por evaluarse.

Palabras clave: agenda, estrategias y cambio climático.

MITIGATION AND ADAPTATION STRATEGIES TO CLIMATE CHANGE

ABSTRACT

This paper exposes the agenda of strategies in accordance with the provisions of

international and national bodies, raises the state government of Mexico on mitigation and adaptation to climate change. This review was conducted of institutional information sources, which anticipated a number of hotlines and general recommendations, the scope and results are yet to be evaluated.

Keywords: agenda, strategies and climate change

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas, el cambio climático se entiende como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, el cual se caracteriza por la alteración en la composición de la atmósfera mundial que se suma a la variabilidad natural del clima, observada durante periodos de tiempo comparables (CMNUCC, 1992). Entre los científicos existe un amplio consenso en que la causa principal del cambio climático es la emisión de gases de efecto invernadero producidos por la actividad humana (GEI). Las emisiones de bióxido de carbono, metano, óxido nitroso y otros gases y su incremento en la atmósfera, son los factores responsables del aumento de las temperaturas en el momento actual y en las próximas décadas, según estimaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se alcanzarán temperaturas de 1.4 a 5.8C° en todo el planeta. No obstante se prevé que los efectos del cambio climático aumentarán de manera crítica. El ser humano tiene la capacidad de actuar y resolver o en su defecto disminuir los efectos que al final provocarán y demandarán un cambio en el estilo de vida de la sociedad en general y de los individuos en particular.

Considerando las evidencias acumuladas y las implicaciones regionales y mundiales, la comunidad internacional aprobó en 1992, durante la “Cumbre de la Tierra” efectuada en Río de Janeiro, Brasil, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), con la finalidad de establecer acuerdos, responsabilidades y compromisos comunes para la mitigación y adaptación a este fenómeno. La Convención entró en vigor en 1994. Uno de los resultados más importantes fue la negociación y aprobación del Protocolo de Kioto (Japón, 1997) en

el cual un conjunto de 39 países desarrollados se comprometieron, para el periodo 2008– 2012, a reducir sus emisiones por lo menos 5.2% respecto a los niveles de 1990 (GEM, 2009).

Entre los compromisos generales adquiridos por los países participantes se encuentra la realización, actualización y publicación periódica de los inventarios de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), la ejecución de programas nacionales y regionales de mitigación y adaptación, así como la conservación de sumideros de carbono, todo ello mediante la instrumentación de diversas estrategias, como son: el mejoramiento de los procesos de producción, el uso eficiente de la energía y la conservación de los recursos naturales. En el ámbito nacional el gobierno federal ha generado la Estrategia Nacional de Cambio Climático 2007, en la cual precisa las posibilidades y rangos de reducción de emisiones de GEI, y propone los estudios necesarios para definir metas más precisas de mitigación y avanzar en la construcción de capacidades de adaptación.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es exponer la agenda de estrategias que plantea el gobierno del Estado de México en materia de mitigación y adaptación ante el cambio climático. Para ello se realizó la revisión de las fuentes de información institucional, en las que se anticipan una serie de recomendaciones, cuyos alcances y resultados aún están por evaluarse.

ESTRATEGIA NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático global es un tema de preocupación creciente entre los actores gubernamentales encargados de conducir la política nacional, esta amenaza no sólo se circunscribe al sector ambiental, es un problema que afectará el desarrollo de todos los sectores socioeconómicos del país (INE, 2010). Los esfuerzos nacionales en la lucha contra el cambio climático están orientados por las acciones de mitigación y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, así como por la conservación de las cubiertas

de bosques primarios, la forestación y la reforestación que favorezcan el incremento de la captura de carbono. Pese a estas acciones, la estabilización de las concentraciones atmosféricas de GEI está lejos de alcanzarse, lo que plantea escenarios críticos de cambio climático para los próximos decenios y la necesidad de diseñar y llevar a la práctica las acciones de adaptación social y productiva en concordancia con las estrategias de mitigación. La respuesta de los sistemas humanos ante el cambio climático puede ser de dos tipos: 1) Reactiva o de respuesta automática ante los impactos, y 2) Preventiva o de respuesta planificada, en la que se identifican y estudian los impactos y sus riesgos y se traduce el conocimiento para la formulación de políticas.

La construcción de las capacidades de adaptación equivale a desarrollar las habilidades de los distintos actores para ajustarse al cambio climático, a la variabilidad y a los extremos climáticos, a fin de moderar los daños potenciales. En la medida que se desarrollen capacidades de adaptación se puede reducir la vulnerabilidad del país y mejorar la sustentabilidad del desarrollo. Las principales líneas de acción que se proponen a nivel nacional para la adaptación ante el cambio climático (CICC, 2007), son las siguientes:

- Revisar la estructura institucional enfocada a la gestión del riesgo frente a amenazas hidrometeorológicas, para potenciar las capacidades instaladas.
- Posicionar la actual capacidad de respuesta ante los impactos de la variabilidad climática, como plataforma para el desarrollo de capacidades de adaptación frente a los efectos del cambio climático.
- Identificar oportunidades para la convergencia de esfuerzos intersectoriales (trasversal).
- Diseñar e implementar un Programa de Modelación del Clima como parte de un Sistema Nacional de Información Climática.
- Potenciar el Ordenamiento Ecológico y Territorial como instrumento preventivo frente a los impactos previsibles del cambio climático.
- Revisar las políticas y prioridades de asignación del gasto público para enfatizar la prevención.

- Promover acciones de reducción de la vulnerabilidad, disminución del riesgo y generación de estrategias de adaptación en los planes de desarrollo regional, estatal y municipal.
- Promover el uso de seguros como instrumentos de disminución de la vulnerabilidad en diferentes sectores.
- Diseñar una estrategia de comunicación y educación que difunda los resultados de las investigaciones, involucre a la sociedad y consolide su participación en el diseño de acciones preventivas y correctivas.
- Promover la formación de recursos humanos en meteorología operativa y pronósticos.

Estas acciones se pueden emprender en el marco de una respuesta preventiva de adaptación ante el cambio climático, evitarán costos de reparaciones y ajustes posteriores y tendrán otros importantes co-beneficios. Por ejemplo, la conservación y la restauración de los ecosistemas y el establecimiento de corredores biológicos permitirían atender simultáneamente problemas ambientales planteados en las agendas de combate a la desertificación, protección de la biodiversidad y desarrollo social, el desarrollo de sistemas de tratamiento y reutilización del agua en zonas urbanas disminuiría la vulnerabilidad de la población ante la escasez del vital líquido y permitiría frenar la sobreexplotación de acuíferos. Por otro lado, las líneas prioritarias de investigación y generación de conocimiento para la adaptación ante el cambio climático que marca el gobierno federal, son las siguientes:

a) Gestión de riesgos hidrometeorológicos y manejo de recursos hídricos

Usos de la información climática para la toma de decisiones; elaboración de pronósticos climáticos estacionales y desarrollo de escenarios regionales; caracterización de la vulnerabilidad por tipo de amenaza y sector social; evaluación de efectos del cambio climático en las distintas fases del ciclo hidrológico y diseño de arquitectura bioclimática.

b) Biodiversidad y servicios ambientales

Sistematización de información sobre afectaciones en los ecosistemas y sus componentes; análisis de la capacidad de respuesta de especies clave en el funcionamiento de los ecosistemas; evaluación de los efectos del cambio climático sobre especies con alguna categoría de riesgo; desarrollo y aplicación de modelos de crecimiento forestal bajo distintos escenarios climáticos; funcionamiento de corredores biológicos y delimitación de nuevas rutas para su establecimiento; restauración ecológica en diferentes sistemas; distribución potencial de áreas de refugio de los sistemas más vulnerables; valoración económica de los servicios ambientales relacionados con la prevención de inundaciones y la mitigación de impactos en la zona costera y en las grandes urbes.

c) Agricultura y ganadería

Afectaciones por zona agroclimática bajo distintos escenarios de cambio climático; comportamiento de agentes patógenos respecto a cambios en el clima; posibilidades de reconversión productiva adecuada a cada escenario de cambio climático; evaluación de las demandas de riego frente a distintos escenarios climáticos y evaluación de opciones de adaptación al cambio climático en el sector ganadero.

d) Zona costera

Cartografía de riesgos y vulnerabilidad costero-marina frente al ascenso del NMM; modelación de distribución y abundancia de especies marinas y costeras en función de los diferentes escenarios climáticos; modelación de afectaciones a las pesquerías; valoración económica de medidas preventivas y de impactos derivados de eventos extremos y rehabilitación posdesastre de ecosistemas costeros.

e) Asentamientos humanos

Diseño de ciudades sustentables bajo diferentes escenarios de cambio climático; identificación de reservas territoriales para el crecimiento urbano; evaluación del potencial de desarrollo de localidades pequeñas bajo criterios de sustentabilidad, autosuficiencia, cogeneración, cooperación en redes y otras opciones que aumenten la capacidad adaptativa de distintos grupos sociales y movilidad urbana sustentable.

f) Generación y uso de energía

Afectaciones a la infraestructura del sector energético; potencial de distintos escenarios climáticos para el aprovechamiento de energías renovables; impactos de cambios en el clima sobre la generación hidroeléctrica; impactos en la demanda energética por incremento en extracción y transporte de recursos hídricos; impactos en la demanda de energía eléctrica en casas habitación y edificios en relación con el inicio temprano y final tardío de la época de calor.

g) Salud humana

Evaluación de los efectos de cambios en el clima sobre la salud de distintos grupos sociales; fortalecimiento de los planes de actuación en salud pública a partir de sistemas de alerta temprana y fortalecimiento de los programas de vigilancia y control de enfermedades de transmisión vectorial.

La lectura de la agenda nacional resalta la importancia que tiene la respuesta conjunta y coordinada de las autoridades, la sociedad civil y los sectores productivos en la implementación de las acciones de mitigación, en tanto que las acciones e iniciativas de adaptación deben ser definidas e implementadas bajo una óptica multiescala (nacional, estatal, regional, subregional y local), puesto que los impactos y las vulnerabilidades son específicos de cada lugar. En esta perspectiva la adaptación

al cambio climático se constituye una actividad estrechamente conectada con las políticas de mitigación, debido a que el grado de cambio proyectado en las distintas variables climáticas está en función de los niveles de concentración de GEI que se alcancen en la atmósfera, niveles que a su vez estarán determinados por las políticas de reducción de las emisiones y las políticas de mitigación. De tal forma que no es lo mismo planificar una estrategia de adaptación para un entorno global, que para uno local.

El diseño de un marco de actuación adecuado para el conjunto de las iniciativas relativas a la adaptación al cambio climático, supone una mayor coordinación y eficacia de las actividades que se lleven a cabo, por lo que se requiere de estrategias a medio o largo plazo de forma sostenida, según las necesidades y características de cada sector o sistema. Es muy importante enfocar las políticas y medidas de adaptación con un horizonte temporal y considerarlas como un proceso iterativo y continuo. Estas tareas caben en la necesidad de comenzar a considerar las acciones para hacer frente al calentamiento atmosférico, así como adoptar medidas para hacer frente a este fenómeno y sus impactos sobre las actividades humanas.

Es fundamental no olvidar que el impacto del cambio climático se resiente con mayor intensidad a nivel local, en consecuencia, las respuestas en torno a la adaptación a la variación resultante en el clima han sido y serán locales. Las familias pobres que dependen de los recursos naturales se verán obligadas a asumir una carga desproporcionada de impactos adversos. En especial, los grupos pobres y marginados, en este escenario, las instituciones locales (formales e informales) desempeñan un papel fundamental en la creación de capacidad de recuperación y en la reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático. Aunque las familias y las comunidades se han adaptado a las variaciones en el clima de diferentes maneras a lo largo del tiempo, su capacidad de adaptación depende de manera importante de las maneras en las que las instituciones regulan y estructuran sus interacciones, tanto entre ellas mismas como con agentes externos. Las prácticas de adaptación dependen generalmente de convenios institucionales específicos, la adaptación nunca se puede dar en un entorno de vacío institucional. Las instituciones locales configuran maneras de responder al impacto de los riesgos climáticos sobre la población y sus formas de

obtención de ingresos (Agrawal, Arun *et al.*, 2009), estructurando los riesgos para mitigar los impactos y la vulnerabilidad que genera el clima y creando el marco de incentivos dentro del que se desenvuelven los resultados de las medidas individuales y colectivas.

Sin embargo, habría que considerar que una de las restricciones para implementar medidas de adaptación ante el cambio climático, es su costo, por lo que es necesario asegurar que aporten beneficios en el corto plazo y a bajo costo, o que incluso generen ahorros económicos.

EL ESTADO DE MÉXICO: MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN

La política del gobierno mexiquense en materia ambiental, está enfocada en la suma de esfuerzos entre gobiernos, sociedad y organismos públicos y privados para realizar acciones que permitan mitigar las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) en el marco de políticas, estrategias y acciones integrales, sinérgicas y globales. Asimismo, las políticas económicas, urbanas y de transporte deben considerar el componente ambiental, pues los recursos naturales con que se satisfacen cada una de ellas están llegando a un punto crítico de existencia: las fuentes de energía no renovable se están agotando; la superficie forestal y la apta para la agricultura a cada momento disminuye y cada vez se requiere de más terreno para construir zonas urbanas y vías de comunicación, lo cual ejerce gran presión sobre los recursos naturales, principalmente bosques y suelos, sumideros que han visto reducida su capacidad para capturar carbono (GEM, 2008:11).

La actuación local es tarea de los gobiernos estatales en coordinación con los gobiernos municipales, la sociedad civil, instituciones educativas, organizaciones no gubernamentales y el sector privado; el objetivo es llevar a cabo acciones que prevean, reduzcan y mitiguen las causas y las consecuencias de los cambios extremos del clima. Sobre la base de los escenarios de cambio climático determinados por los organismos internacionales, las instituciones gubernamentales y no gubernamentales del Estado de México han diseñado una serie de acciones de mitigación y adaptación que

pretenden aminorar el impacto de las actividades de la población y su contribución al calentamiento global.

Las grandes líneas de atención están enmarcadas en la iniciativa amplia del desarrollo territorial: la planificación del uso del suelo y los recursos hídricos, la protección de los bosques, las estrategias de reducción de riesgos de desastres y el uso y desarrollo de fuentes de energía renovable (solar, hidroeléctrica, eólica, biomasa), en particular, las estrategias de mitigación están en la promoción del ordenamiento forestal y la recuperación de las zonas forestales degradadas y vulnerables, así como establecer canales de información sobre riesgos de enfermedades ocasionadas por las variaciones climáticas y la disminución de la emisión de GEI a través de las acciones de reforestación y la conservación de los bosques y las selvas por su importante papel en la captura y almacenamiento de carbono atmosférico.

El gobierno estatal desde 1995 con la estimación del primer Inventario de GEI y actualmente el Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y Vulnerabilidad del Estado de México ante el Cambio Climático Global (GEM, 2008), ha elaborado una serie de instrumentos que tienen como objetivo la mitigación y la adaptación al cambio climático, las cuales han sido el soporte de una base diagnóstica en la aportación de una serie de datos, producto de las principales fuentes de emisión de gases efecto invernadero por sector. De los cuales, es notorio observar que es el sector comercio y transporte el que más emite contaminantes a la atmósfera con un total de 58.46%, siguiendo los procesos industriales con 20.30% de las emisiones, las actividades agrícolas y ganaderas aportan 7.10%, los desechos 14.14%, residuos sólidos 7.90%, y el total de las descargas de aguas residuales 6.24 por ciento.

Ante esta vulnerabilidad y como parte de los compromisos nacionales e internacionales, se tuvo a bien complementar dicho documento con una serie de estrategias de mitigación y adaptación por sector energético y recursos, por tanto se observa que el inventario de GEI es también llamado Iniciativa del Estado de México Ante el Cambio Climático. El documento es rico en información y escenarios futuros, sin embargo, resaltan las acciones de mitigación y en materia de adaptación sólo enuncia actividades por realizar a manera de recomendaciones, las cuales son de naturaleza muy general y sin directrices de cómo instrumentarlas.

Dentro de las medidas de mitigación expuestas por sector de emisión destacan las acciones que contribuyen a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), si bien estas acciones se impulsaron como parte de una estrategia de control de contaminantes locales, al mismo tiempo ayudan a mitigar las emisiones causantes del calentamiento global. Por lo que una estrategia estatal de cambio climático, debe reforzar medidas de mitigación de GEI ya instrumentadas, evaluar su eficiencia y fomentar medidas nuevas donde sea pertinente. Siendo el sector energético la principal fuente de emisiones de GEI, tal iniciativa tiene su objeto en las siguientes estrategias: reforzar los instrumentos de *eficiencia energética* en industria, comercios, servicios y hogares, impulsar el uso de combustibles alternos y la reconversión energética, implementar mecanismos de cogeneración con uso de tecnologías limpias y eficientes e impulsar un sistema de transporte eficiente, promoviendo su fortalecimiento en las siguientes áreas: infraestructura y planificación territorial, cambio modal, eficiencia energética, calidad ambiental y gestión de la demanda. Por otro lado, los *procesos industriales* ocupan el segundo lugar en cuanto emisiones, por lo que tales estrategias recaen en las buenas prácticas de manufactura, la investigación de nuevos desarrollos de procesos y materiales limpios y alternativos encaminados también a la innovación y optimización en el uso de recursos como agua y materias primas, así como apoyar la iniciativa GEI México que se lleva a cabo en el seno de la Semarnat, en colaboración con el Centro de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sustentable (Céspedes).

La captura de carbono, a través de la conservación y restauración de zonas forestales, es una acción importante que se encuentra dentro de las estrategias nacionales y estatales, ya que los ecosistemas forestales son la principal fuente de fijación e impiden que grandes cantidades de CO₂ sean liberadas a la atmósfera, por lo que dentro de los programas Desarrollo Forestal Sustentable, Programa de Combate de Incendios, Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio, así como el potencial de las 84 Áreas Naturales Protegidas en el Estado contemplan las líneas de acción que impulsan proyectos de pago por servicios ambientales de captura de carbono y fortalecer programas de conservación y restauración de ecosistemas forestales.

El Inventario Estatal de Emisiones de GEI señala al sector agropecuario como un emisor importante de metano (CH_4), particularmente debido al manejo de excretas y la fermentación entérica, además se sabe que el uso de fertilizantes provoca emisiones de óxido nitroso (N_2O). Entre las medidas de mitigación aplicables a este sector se encuentran: mejorar las prácticas de manejo de producción agrícola, impulsar la reconversión productiva en agricultura hacia cultivos perennes y diversificados, para aumentar la biomasa y la captura de carbono, evaluar el potencial de sistemas agrosilvopastoriles, el uso eficiente de fertilizantes, desarrollo tecnológico e investigación de tipos y dosis óptimas de fertilizantes para los distintos cultivos, desarrollar mecanismos para quemas controladas de biomasa, labranza de conservación, para transformar cultivos en sumideros de carbono e implementar acciones para el manejo adecuado de excretas.

Finalmente, una forma efectiva de mitigar las emisiones provenientes de los desechos y aguas residuales es a través de la captura de biogás en rellenos sanitarios y plantas tratadoras de agua, así como la adecuación de los sitios no controlados y tiraderos a cielo abierto de disposición de desechos urbanos y el manejo integral sustentable de la basura.

Por otro lado, las medidas de adaptación ante la vulnerabilidad de los recursos al cambio climático en el Estado destacan:

a) Manejo de agua: almacenar agua eficientemente; construcción de avenidas de agua y sistemas de drenaje eficientes.

b) Agricultura: cambios en la fecha de siembra, cambios en la variedad de semilla; aplicación de fertilizantes en caso de lavado de nutrientes por alto nivel de precipitación y rotación de cultivos.

c) Ecosistemas forestales: conservación y mantenimiento de las plantaciones forestales; creación de bancos de germoplasma para la conservación de especies vegetales que tiendan a desaparecer; impulsar estudios para el manejo y aprovechamiento de especies vegetales con potencial económico distribuidas en zonas áridas e impulsar estudios científicos para mejorar genéticamente las especies maderables resistentes a variaciones climáticas.

d) Asentamientos humanos: establecer una política de disminución o reorientación de flujos migratorios; diseñar una estrategia para redistribuir la población a zonas menos vulnerables; controlar los asentamientos humanos en zonas no aptas para la urbanización; construcción de obras de drenaje y sistemas de bombeo en zonas identificadas con alto riesgo de inundación; ahorro de energía eléctrica en oficinas de gobierno mediante la instalación de lámparas fluorescentes (ahorradoras) y aislamiento térmico en casas y oficinas actuales y rediseño arquitectónico con nuevos materiales en nuevas construcciones.

e) Salud humana: vigilancia de las enfermedades infecciosas; reforzar programas de saneamiento y protección civil; estricto control de la calidad de agua potable e introducción de tecnologías de protección tales como mejoras en la vivienda, aire acondicionado, depuración del agua y evacuación.

OTRAS ACCIONES DEL SECTOR PÚBLICO

El gobierno del Estado de México ha impulsado una serie de políticas ambientales y programas para prevenir y controlar las emisiones contaminantes provenientes tanto de fuentes fijas como móviles y con ello reducir los niveles de contaminación atmosférica. Si bien es cierto que tales programas están enfocados a la reducción de contaminantes como el ozono, las partículas y sus precursores, algunas medidas están vinculadas con la captura de carbono, en tanto que otras están relacionadas de manera indirecta con la eficiencia energética que conlleva a la reducción de emisiones y ahorro de energía (GEM, 2009).

Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010 (Proaire)

Proaire tiene la premisa de proteger la salud de los habitantes de esta región de los efectos nocivos causados por la contaminación atmosférica generada por las distintas

fuentes presentes en la metrópoli. Este programa cuenta con 89 medidas estratégicas, las cuales están enfocadas a los vehículos y transporte (38 medidas), industria (siete medidas), servicios (seis medidas), conservación de recursos naturales (15 medidas), protección a la salud (ocho medidas), educación ambiental (cuatro medidas) y fortalecimiento institucional (ocho medidas).

Entre sus objetivos están: (1) eliminar las concentraciones de ozono superiores a 0.22 ppm; (2) aumentar el número de días con concentraciones de ozono y partículas PM₁₀ dentro del límite establecido por la norma de calidad del aire ambiente correspondiente; y (3) reducir el promedio anual de las concentraciones de PM₁₀. Asimismo, dentro de los cobeneficios del Proaire está la reducción de GEI mediante la conservación y aumento de la cobertura forestal y la promoción del uso eficiente y de las fuentes renovables de energía, lo que se traduce en la disminución de consumo de combustibles fósiles.

De acuerdo con el estudio *Control conjunto de la contaminación atmosférica urbana y de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Zona Metropolitana del Valle de México* realizado por el Instituto Nacional de Ecología, se estima que el Proaire tiene un potencial significativo de reducción de 2.2 millones de toneladas de CO₂ proyectadas al 2010. La reducción de 50% proviene de las medidas de mejoras tecnológicas en los vehículos y de la renovación de la flota vehicular, el resto, del mejoramiento de la infraestructura del transporte masivo.

Aire Limpio: Programa para el Valle de Toluca 2007-2011

Los objetivos del aire limpio: consisten en revertir la tendencia ascendente del número de días en que se rebasa la norma de partículas PM₁₀, controlar los niveles de concentración de ozono y mantener dentro de norma los niveles de bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno y monóxido de carbono. Este programa cuenta con un paquete de 27 medidas de las cuales algunas están relacionadas directamente con la disminución de emisiones gases de efecto invernadero y la protección de sumideros. Entre tales medidas se encuentra:

- La prevención y combate de incendios forestales.
- El control de la tala ilegal en áreas de protección ecológica.
- El desarrollo de campañas de reforestación.
- La recuperación de suelos.

Asimismo, cuenta con estrategias para la reducción y control de emisiones en vehículos automotores, transporte público y de carga, así como de una producción más limpia en el sector industrial.

Programa de Verificación Vehicular

El Programa de Verificación Vehicular tiene como objetivo establecer el calendario y los lineamientos bajo los cuales todos los vehículos automotores matriculados en el Estado de México deben ser verificados cada semestre en sus emisiones contaminantes provenientes del escape.

En los últimos años se han realizado diversos ajustes a este programa, por una parte haciéndolo cada vez más estricto en su operación y, por otra, incluyendo criterios que promueven la renovación de la flota vehicular. Así por ejemplo, en 2006 se redujeron entre 40 y 50 % los límites máximos permitidos de emisiones contaminantes de vehículos en circulación, mediante la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-041-SEMARNAT-2006. Asimismo, a partir del 2007 se incentiva la eficiencia energética y el uso de nuevas tecnologías de control de emisiones vehiculares. El incentivo consiste en otorgar el holograma “doble cero” en la verificación vehicular a los autos nuevos de uso particular, a gasolina e híbridos (gasolina-eléctricos) con alta eficiencia en rendimiento de combustible y baja emisión de contaminantes. Este holograma los exenta de la restricción vehicular un día a la semana (programa Hoy No Circula) así como del proceso de verificación, refrendando dicho holograma por cuatro o seis años consecutivos.

En el segundo semestre de 2008 entraron en vigor medidas de adecuación a los Programas de Verificación Vehicular, de Contingencias Ambientales Atmosféricas

y al Hoy No Circula de la Zona Metropolitana de Valle de México, mismas que se estima ayudarán a reducir 1 millón 189 mil 620 toneladas de CO₂.

Programa Especial de Transporte Masivo del Estado de México

Este programa establece las directrices para desarrollar una infraestructura de transporte de alta capacidad, seguro, eficiente y competitivo, contribuyendo en la reducción de tiempos de traslado, de congestionamientos viales y de emisiones contaminantes, así como en el ahorro de energía. Se estima que en esta etapa serán sustituidos 18 mil 202 vehículos, lo que representa una reducción de emisiones del orden de 43 450.6 t/a de contaminantes, de las cuales, 93.6% corresponden a monóxido de carbono. Cabe señalar que el beneficio ambiental esperado una vez que estén funcionando las tres etapas del sistema será de 61 173 t/a de contaminantes que se dejarán de emitir.

Fomento al uso de combustibles alternos en vehículos automotores

Tomando en cuenta que el *Plan de desarrollo del Estado de México 2005-2011* establece acciones contra la contaminación atmosférica, el Ejecutivo Estatal consideró conservar los subsidios que se otorgan a los particulares, concesionarios y permisionarios que participen en la conversión de sus unidades que utilizan gasolina como combustible a gas natural comprimido o a gas LP.

Programa de Desarrollo Forestal Sustentable 2005-2025

Constituye el plan rector que permite la planeación y programación de los proyectos encaminados al desarrollo integral del sector forestal (Probosque, 2006). A pesar de los esfuerzos realizados por el gobierno del Estado en materia de reforestación, se estima que aún existen 225 mil hectáreas perturbadas. Al respecto, el ejecutivo del

Estado pretende, por una parte, restaurar una mayor superficie de áreas degradadas por medio de una mejor calidad en la producción de planta, en las plantaciones y en el mantenimiento de las reforestaciones; por la otra, propone convertir áreas degradadas e improductivas en plantaciones forestales con especies maderables, no maderables, endémicas y de cobertura.

La meta planteada en el periodo 2005-2011 consiste en la reforestación de 90 mil hectáreas, 15 mil por año. Aunado a ello, y con la finalidad de promover esquemas a través de los cuales se otorguen incentivos para la reforestación de modo que se asegure la sobrevivencia de las plantaciones, el gobierno del Estado puso en marcha el Programa de Reforestación y Restauración Integral de Microcuencas, el cual brinda apoyo de mil pesos por hectárea como complemento a las labores de protección y conservación de plantaciones en las cuales se garantice una sobrevivencia mínima de 70%. Este programa arrancó en 2006 con un presupuesto de 7.5 millones de pesos, de los cuales 6 millones se asignaron al establecimiento y protección de 5 mil 860 hectáreas de reforestación y de plantaciones forestales comerciales; los restantes 1.5 millones se asignaron a gastos de operación y supervisión del programa. En 2007 hubo 329 participantes beneficiados con 5.4 millones de pesos respecto a mantenimiento de las plantaciones efectuadas en 2006, y 582 participantes beneficiados con 7 millones de pesos en la categoría de nuevas reforestaciones.

Programa para el Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos

A partir de las estrategias del Programa de Desarrollo Forestal del Estado de México 2005-2025 se crea el Programa para el Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos, el cual tiene como objetivos: (1) conservar las áreas de bosque que permiten la recarga hídrica para garantizar el suministro de agua; (2) lograr que los productores forestales mantengan, conserven o aumenten la cobertura forestal natural o inducida; y (3) apoyar la conservación de bosques en áreas naturales protegidas y plantaciones forestales con fines de protección o de restauración.

Para la instrumentación de este programa el gobierno del Estado de México autorizó, dentro del ejercicio fiscal 2007, un presupuesto de 30 millones de pesos como capital inicial para la atención de 6 mil hectáreas de superficie boscosa dentro del territorio estatal. Asimismo, el programa establece un pago anual por hectárea de \$1 500.00 a los dueños o poseedores de bosques, por el servicio ambiental hidrológico que cumplan con los criterios establecidos en las Reglas de Operación.

Programa Estatal de Prevención, Control y Combate de Incendios Forestales

Tiene por objetivos: (1) reducir el número de incendios y el índice de afectación a través de acciones de prevención, detección, control y combate; y (2) proteger y conservar los recursos forestales de la entidad, con acciones que permitan contribuir al desarrollo y fomento forestal, evitando su degradación o pérdida por incendio. En este contexto y teniendo como estrategia principal incrementar las medidas preventivas, la autoridad estatal realiza distintas acciones en coordinación con instancias federales, municipales, organizaciones de la sociedad civil, así como con productores, núcleos agrarios y grupos voluntarios, teniendo como misión, atender de manera oportuna y eficiente los incendios forestales que se presenten en el territorio estatal.

La superficie a proteger contra incendios forestales es de 895 mil hectáreas: 558 mil de bosques, 88 mil de selvas, 17 mil de vegetación de zonas áridas, 6 mil de vegetación hidrófila y halófila y 226 mil de áreas perturbadas. Para ello se implementan las estrategias siguientes:

- Rehabilitación de la infraestructura de detección para aumentar la eficiencia en el control y extinción de siniestros, lo que permite disminuir el índice de afectación por incendio.
- Incremento del número de brigadas y combatientes con apoyo de los ayuntamientos, organizaciones de la sociedad civil y de grupos voluntarios debidamente capacitados.

- Realización de campañas permanentes de concientización sobre la importancia de evitar los incendios forestales.
- Aplicación de sanciones a los infractores de acuerdo con los códigos penales estatal y federal, a fin de disminuir los incendios provocados por el hombre.
- Incremento y mantenimiento a las brechas cortafuego en municipios de alta incidencia.

Con apoyo en la información estadística estatal, durante el periodo 2003-2007 se presentaron en el año un promedio de mil 342 incendios, afectando 5 mil 436 hectáreas, por lo que el índice de afectación resultante fue de 4.1 hectáreas por incendio.

El Sistema Estatal de Áreas Naturales Protegidas del Estado de México (SEANPEM) es el conjunto de áreas naturales protegidas (ANP) en sus diversas categorías para la conservación y aprovechamiento racional de los recursos naturales de flora y fauna de la entidad. En suma se tienen 84 ANP, las cuales cubren una superficie de 978 mil 437 hectáreas.

Derivado de los acuerdos establecidos con los dueños y poseedores de los recursos naturales, ubicados en las ANP de la entidad, tales como vivir con calidad y dignidad, trabajar, producir y comercializar alterando lo menos posible el ecosistema, el gobierno del Estado de México ha promovido 30 proyectos productivos, aprobados mediante los programas de Desarrollo Forestal, Alianza Contigo y Desarrollo Regional Sustentable, los cuales se agrupan en tres categorías: fomento a la producción forestal, fomento agropecuario y turismo alternativo. A través de éstos se permite el desarrollo sustentable de los recursos naturales, contando con una amplia participación social, así como de un buen grado de organización en el manejo de sus recursos forestales a través de la intervención de las poblaciones locales, todo ello, según cinco líneas estratégicas:

- Elaboración de estudios que impulsen el ordenamiento forestal.
- Promoción de obras de desarrollo social.
- Fortalecimiento del desarrollo económico a través de la implementación de proyectos productivos.

- Complementación de la infraestructura regional.
- Implementación de acciones de turismo alternativo.

Por otra parte, para cumplir con la normatividad referente a la elaboración de los programas de conservación y manejo de ANP, cuyo objetivo es conservar y restaurar dichas áreas, así como aprovechar de manera sustentable los recursos humanos, biológicos y físicos, durante 2007 se concluyeron los programas de los siguientes parques estatales:

- Santuario del Agua Presa Corral de Piedra.
- Parque Estatal Santuario del Agua y Forestal Subcuenca Tributaria Río San Lorenzo.
- Parque Estatal Santuario del Agua y Forestal Presa Villa Victoria.
- Santuario del Agua y Forestal Manantiales Cascada Diamantes.

El Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de México (POETEM) es una herramienta de planeación ambiental que tiene como objetivo inducir el uso de suelo y las actividades productivas para lograr la protección del medio ambiente, la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. El POETEM fue publicado en 1999 y en 2006 se publicó su actualización. Esta última consistió en la redefinición de las 602 unidades ambientales, incluyendo sus lineamientos y estrategias. Actualmente se cuenta con 713 unidades de las cuales se puede identificar su política de protección, conservación, restauración o aprovechamiento, su fragilidad ambiental, el uso de suelo predominante y los criterios aplicables. Asimismo, se establecieron como zonas de atención prioritaria:

- Cuenca del río Lerma. Subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco. Sistema Cutzamala.
- Presas de Zumpango, Guadalupe, Vicente Guerrero, José Antonio Alzate y las lagunas de Chignahuapan, entre otras. Las 84 áreas naturales protegidas de la entidad.

- Las zonas forestales y las cabeceras de cuenca (Lerma, Pánuco y Balsas) considerando su importancia en la captación e infiltración del agua hacia los mantos acuíferos.

De esta forma, se concluyeron los ordenamientos ecológicos siguientes:

- Ordenamiento Ecológico Municipal de Villa de Allende.
- Ordenamiento Ecológico de la Región de la Biosfera Mariposa Monarca.
- Ordenamiento Ecológico del Volcán Popocatepetl y su Zona de Influencia.

Asimismo, el gobierno del Estado ha promovido la elaboración de los ordenamientos en los municipios de Almoloya de Juárez, Chalco, Tlamanalco, Tequixquiac, Tonatico, Tecámac, Timilpan, Tenancingo, Ocuilan, Villa Guerrero, Villa Victoria, Villa del Carbón, Xonacatlán, Zacualpan y Zinacantepec. El valor estratégico de los ordenamientos radica en los servicios ambientales que brinda tales como: la captación y aportación de agua, la biodiversidad y el potencial paisajístico y recreativo.

Ahorro de energía

El ahorro de energía es un asunto liminar inscrito en la agenda nacional, por tanto, la actual administración del gobierno estatal ha promovido su aplicación, convirtiéndose en una obligación para todos los sectores de la sociedad, ya que el derroche de energía representa un problema que lesiona la economía del país y provoca el uso negativo de la quema de combustibles fósiles. Con base en esto, se orienta a los 125 ayuntamientos para que hagan un uso más eficiente de la energía eléctrica en los servicios públicos, establezcan programas orientados a la modernización de sus servicios locales y contribuyan en forma decidida a reducir el consumo energético. Se espera que a partir de estas campañas, se cuente con servicios públicos de mejor calidad para los ciudadanos y menor gasto para las haciendas municipales. En este sentido el gobierno del Estado de México, a través de la Dirección General

de Electrificación, asesora a todos los ayuntamientos de la entidad en materia de modernización y ampliación de los sistemas de alumbrado público, pretendiendo mantener un ahorro cercano a 40 por ciento.

Proyectos MDL (Mecanismo para un Desarrollo Limpio)

El mecanismo para un desarrollo limpio (MDL) se encuentra definido en el artículo 12 del Protocolo de Kioto. Su propósito es ayudar a las partes no incluidas en el Anexo I del Protocolo a lograr un desarrollo sustentable y contribuir al objetivo último de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, así como ayudar a las partes incluidas en el anexo I, a cumplir con sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. La Junta Ejecutiva del MDL de las Naciones Unidas regula los procedimientos por medio de los cuales un proyecto puede participar en el MDL y generar Reducciones Certificadas de Emisiones. Estas reducciones o bonos de carbono encuentran compradores en un mercado que se basa en los mecanismos de flexibilidad planteados en el Protocolo de Kioto y a las disposiciones legales que para lograr reducciones han implementado los países (anexo I) que ratificaron dicho protocolo. En virtud de estos ingresos provenientes de la venta de bonos o del interés de adquirir los derechos de estas reducciones, se hace atractiva o posible la realización del proyecto.

Las acciones del gobierno del Estado de México se complementan con aquéllas consideradas dentro de los proyectos MDL en distintos municipios de la entidad. Entre los proyectos que cuenta con “cartas de aprobación” y que se ubican dentro del Estado de México están:

- Manejo de residuos en granjas porcícolas. Proyecto de recuperación de metano en sistemas de manejo de desechos en granjas de cerdos.
- Proyectos de metano en rellenos sanitarios. Proyecto de gas de relleno sanitario para energía en Ecatepec, Ecometano, Tecnología de Biogás, S.A. de C.V., Tecnología de Biogás Ltd. y EcoSecurities Ltd.

- Proyectos de metano en rellenos sanitarios. Proyecto de gas metano para energía en Tultitlán, Tecnología Biogás, S.A. de C.V., Tecnologías Biogás Ltd. y EcoSecurities PLC. Proyectos de cogeneración y eficiencia energética. Proyecto de cogeneración a partir de biogás generado de biodigestores de aguas residuales y gas natural. La Costeña, S.A. de C.V.
- Proyectos de cogeneración y eficiencia energética. Reducción del contenido promedio de clinker en el cemento en plantas de CEMEX, CEMEX, S.A. de C.V.

Participación de la organizaciones no gubernamentales (ONG`s), sector privado y académico

Las acciones de los grupos ambientalistas tienen como objetivo desarrollar las capacidades en todos los sectores sociales: la difusión de información, sensibilización y concientización, capacitación de actores y educación ambiental, actividades con una alta vocación cívica que han sido incorporadas a las agendas ecológicas. Por la relevancia del tema de cambio climático global, se ha dado una intensa participación de agrupaciones civiles en acciones e iniciativas que en otro momento estarían conducidas exclusivamente por el gobierno. Esta lógica ha permitido que en la mayoría de países donde los gobiernos asignan una prioridad nacional, el involucramiento de organismos no gubernamentales en sus programas se traduzca en el complemento ideal para la política nacional.

Asimismo, la importancia que adquiere esta participación de la sociedad civil no sólo se limita al terreno político. El desarrollo de mecanismos y líneas de investigación sobre los efectos del cambio climático en el entorno humano han sido el objetivo de trabajo de numerosas organizaciones sociales (SMA, 2011). En el Estado de México se hallan registrados 97 grupos ambientalistas ante la Secretaría del Medio Ambiente. Cada organización fomenta educación ambiental y promueve el desarrollo sustentable bajo diferentes líneas de atención. En las actividades en torno al cambio climático, destacan los grupos ambientalistas conformados por la sociedad civil, lo que remarca la temática ante los problemas que afectan al entorno (cuadro 1).

Cuadro 1

LÍNEAS DE ATENCIÓN DE LAS ORGANIZACIONES NO GUBERNAMENTALES

Educación ambiental y jornadas ambientales	Grupo Ambientalista Sierra de Guadalupe A.C., Pro Dignificación de El Oro, A.C., Asociación de Comerciantes Unificados, A.C., Movimiento Ambiental Ciudadano, A.C., Grupo Ambientalista Vivir, Consejo Mexicano para el Desarrollo Sustentable, A.C. (Comedes), Fundación Ambiental Lerma Verde, A.C. Acacia Fundación Ambiental, A.C. Somos Mundo, A.C. Grupo Ambientalista Azteca, A.C. Organización Mundial Ambientalista Educativa, A.C. (OMAE). Grupo Ambientalista Pequeños Castores Rescatadores. Alianza contra el Cambio Climático, A.C. Proyecto Agroecológico Sembradores de Vida, Escuela Secundaria Técnica No. 14 "Emiliano Zapata Salazar". Misión Rescate Tequiquiac, A.C. Grupo Ecológico Tetlachpanaloyan. Grupo Tlatoani, A.C. Comité de Acción para el Saneamiento del Ambiente, A.C. Fundación Interamericana de Cultura Ecológica, A.C. Bioma, A.C. Centro de Educación Ambiental. Fundación Amigos en Movimiento. Sumar por México, A.C. Fundación Activarte, A.C. INTEGRART A.C. Grupo Ecologista Acción, Legión Ecológica Quetzalcóatl, A.C. Comando Ecológico, A.C. Proyecto Ave, Ambiente, Vida y Entorno, Fundación Caballero Águila, A.C. Geo Juvenil Estado de México. Fundación Abrazando al Mundo, A.C.
Ecoturismo	Juventud Verde, Malinalco con Ideas Reales de Ayuda, A. C. Xul-Ha, Al Final del Agua. Cuerpo de Conservación Valle de Bravo.
Residuos sólidos	Asociación Independiente de Comerciantes (Ainco), Grupo Ecologista Descubridora 2001, Grupo Ecologista Ambiental Nacional A.C. Quetzalli Centro de Educación, Formación y Desarrollo, A.C. Ecologistas de Tejupilco, Asociación de Ecologistas Amigos del Árbol, A.C. Amigos de la Biodiversidad, A.C. Grupo Ambientalista Tamarhu, A.C. (Tierra Fértil. Grupo Ambientalista Acatlán, A.C. Granito de Arena, A.C. Grupo Ambientalista Mexiquense, A.C. GAMEX, Fundación Ecológica México Nuevo, A.C. FoshiRáJoy.
Conservación de los cuerpos de agua	Grupo Ecologista Exploradores Tommy y sus Amigos, A.C, Fundación Comunidades del Alto Lerma, Un Día sin Agua, A.C. Sociedad Ecológica de la Región de los Lagos del Valle de México, A.C. Patronato Pro Valle de Bravo, A.C. Bioclean, S.C.
Conservación de las Áreas Naturales Protegidas	Grupo Falcons Free, A.C. Albergues Ecológicos Peña de Lobos, A.C. Amigos del Parque los Remedios, A.C. Fundación Xochitla, A.C. Fundación Nacional para la Conservación del Hábitat Boscoso de la Mariposa Monarca, A.C. Juntos por la Naturaleza. Red Acción Ambiente, A.C. Fondo Pro Cuenca Valle de Bravo, A. C.
Agricultura orgánica	Unión Nacional de Organizaciones Regionales Campesinas Autónomas del Estado de México, A.C. Asociación de Parques Ecológicos de Valle de Bravo, A.C. Ateneo del Anáhuac, A.C. Grupo Ecologista Los Intocables, A.C. Rescate de una Alimentación Orgánica (RAO).
Ecotecnias	Grupo Ecologista Voluntario Huitzilapan, A.C. Bicitekas , A.C. Grupo para Promover la Educación y el Desarrollo Sustentable, A.C. GRUPEDSAC. Desarrollo Integral con Tecnología Adecuada Casa Xochicalli, A.C. Tierra Nuestra, A.C. Grupo Ambientalista, ECO-SER.

Conservación ecológica y recursos biológicos	Centro Regional para la Conservación Biológica “Lauro Arteaga”. Sociedad Interactiva de Capacitación y Educación para el Desarrollo Sustentable (Sicedes), Centro Ecológico Cultural y Universal Chilam Balam, A.C.
Regulación industrial	Asociación de Industria Limpia del Estado de México, A.C. Consejo de Industriales Ambientalistas del Estado de México, A. C.
Desarrollo sustentable	Licenciatura en Desarrollo Sustentable, Universidad Intercultural del Estado de México. Fundación Tláloc, A.C. Academia Mexiquense de Derecho Ambiental, Recursos y Desarrollo Sustentable. Sociedad Técnica de Gestión Ambiental del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de México, A.C.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México. Relación de Grupos Ambientalistas Registrados ante la SMAGEM, 2011.

La atención puede desarrollarse en cuatro ámbitos distintos: el riesgo climático en sí mismo y la voluntad política de hacer frente al mismo, la participación internacional en la lucha contra el cambio climático, la innovación necesaria para un cambio de los métodos de producción y utilización de la energía, y la adaptación de los países a los efectos inevitables del cambio climático.

Estos elementos podrían concretarse a través de las siguientes acciones:

- Garantizar la aplicación inmediata y efectiva de las políticas acordadas con el fin de alcanzar el objetivo de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en 8 % respecto al nivel de 1990, fijado en el protocolo de Kioto. Las medidas en cuestión son fundamentalmente las enunciadas en el Programa de Desarrollo Forestal Sustentable del Estado de México 2005-2025 y el Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y Vulnerabilidad del Estado de México ante el Cambio Climático Global.
- Fortalecer los esfuerzos de las instituciones que realizan investigaciones sobre el fenómeno del cambio climático.
- Vigilar que se cumplan las políticas y estándares de emisiones contaminantes a la atmósfera.
- Coadyuvar en los esfuerzos de los tres poderes de gobierno.

- Fomentar la sensibilización de los ciudadanos mediante una campaña de sensibilización de alcance comunitario.
- Intensificar y orientar la investigación, por una parte para mejorar los conocimientos sobre el cambio climático y sobre sus repercusiones a escala mundial y local, y, por otra, para desarrollar estrategias de mitigación del cambio climático que presenten una buena relación coste-eficacia (en particular, en los ámbitos de la energía, los transportes, la agricultura y la industria), así como estrategias de adaptación al cambio climático.
- Buscar alternativas de tecnologías respetuosas, de eficiencia energética, energías renovables, transporte, fijación y almacenamiento del carbono.

RECOMENDACIONES

El cambio climático y las estrategias a adoptar no sólo son responsabilidad de los gobiernos, sino de la sociedad en general. Por ello, todos podemos contribuir con acciones que incidirán en mejorar las condiciones de vida presentes y futuras. Algunas recomendaciones que pueden ser implementadas a nivel local son:

Disminuir la emisión de dióxido de carbono reduciendo el uso de energía. Por ejemplo, apagando los aparatos eléctricos que no se ocupan, como focos y computadoras.

1. Apoyar proyectos para la creación de sistemas de energía alternativa que no emitan gases de efecto invernadero a la atmósfera. Por ejemplo, promoviendo el uso de energía solar en calentadores o lámparas
2. Evitar construir sobre sistemas vulnerables a inundaciones o desarrollar planes de construcción, de forma que podamos defendernos de eventos climáticos. En Holanda un tercio de las casas están diseñadas para flotar y así evitar que sean inundadas durante eventos extremos.
3. Hacer uso de material de bajo consumo de energía, como es el caso de los focos ahorradores.

4. Practicar el reciclaje de materiales, reutilizando el papel, vidrio y plástico.
5. La conservación y restauración de ecosistemas que brindan servicio de protección ante eventos climáticos es una de las estrategias de mitigación encaminadas a la reducción de la vulnerabilidad y que además contribuye a la captura de carbono. Según el PNUMA (2009), cerca del 20% del carbono liberado a la atmósfera proviene de ecosistemas deforestados (quema y clareo). Por ello conservar estos ecosistemas podría reducir significativamente los gases de efecto invernadero en la tierra. Los bosques, los humedales y las selvas son los principales sistemas que funcionan como sumidero de carbono además de proveer bienes materiales y servicios de protección. Las estrategias propuestas son mantener el carbono atrapado en estos sistemas por medio de la conservación para bosques, selvas y humedales.

REFERENCIAS

- Agrawal, Arun, Minnna Kononen, Nicolas Perrin (2009), *"The Role of Local Institutions in Adaptation to Climate Change"*, Social Development papers. Social Dimensions of Climate Change, junio, vol. 118, 23 pp.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (2007), *Estrategia nacional de cambio climático. Síntesis ejecutiva*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Tlalpan, México.
- Cámara Nacional de la Industria de Transformación en Mexico (Canacintra) y Cámara de Industrias de Costa Rica (CICR) (2009), *Estrategia industrial ante el cambio climático, septiembre*, 32 pp.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2011), artículo 1, definiciones, 1992. En http://cambio_climatico.ine.gob.mx/comprendercc/queeselcc/queeselcc.html. Consultado el 8 de septiembre de 2011.
- Gobierno del Estado de México (2006), *Programa de Desarrollo Forestal Sustentable del Estado de México 2005-2025*, Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Protectora de bosques, abril, 99 pp.

- _____ (2007), *Aire Limpio: Programa para el Valle de Toluca 2007-2011*, Secretaría de Medio Ambiente, Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 152 pp.
- _____ (2007), *Diagnóstico ambiental de la industria en el Estado de México*, Secretaría de Medio Ambiente, Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 54 pp.
- _____ (2007), *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), 2004*, Secretaría de Medio Ambiente. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 97 pp.
- _____ (2008), *Bases de diagnóstico: Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y Vulnerabilidad del Estado de México ante el Cambio Climático Global*, Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 128 pp.
- _____ (2008), *Bases de diagnóstico: inventario de emisiones de gases de efecto invernadero y vulnerabilidad del Estado de México ante el cambio climático global*, Secretaría de Medio Ambiente, Tlalnepantla de Baz, Estado de México.
- _____ (2009), *Incendios forestales en el Estado de México y sus emisiones a la atmósfera*, Secretaría de Medio Ambiente, Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 30 pp.
- _____ (2009), *Iniciativa ante el cambio climático en el Estado de México*, Secretaría de Medio Ambiente, Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 128 pp.
- _____ (2009), *Iniciativa ante el cambio climático en el Estado de México*, Secretaría del Medio Ambiente, Tlalnepantla de Baz, Estado de México.
- _____ (2010), *Inventario Forestal 2010*, Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Protectora de Bosques, 222 pp.
- Instituto Nacional de Ecología (2007), *El sector privado y el cambio climático, Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero (Comegei) Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental*, Semarnat. http://cambio_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/comegei.html. Consultado el 12 de septiembre de 2011.
- _____ (2011), *Cambio climático y gobierno*, http://cambio_climatico.ine.gob.mx/ccygob/ccygob.html. Consultado el 8 de septiembre.

Secretaría del Medio Ambiente (2005), *Reglamento Interior de la Secretaría del Medio Ambiente*, 4 de julio, 11 pp.

_____ (2006), *Reglamento del Libro Segundo del Código para la Biodiversidad del Estado de México*, 3 de mayo, 85 pp.

_____ (2011), Coordinación General de Comunicación Social, en http://portal2.edomex.gob.mx/edomex/noticias/edomex_noticias_22411 Consultado el 8 de septiembre.

_____ (2011), *Relación de grupos ambientalistas registrados ante la SMAGEM*. 2011 www.edomex.gob.mx/ambiente/doc/pdf/Grupos_Ambientalistas. Consultado el 23 de agosto.

Ambientes biofísicos

FACTORES DE DEGRADACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES EN MÉXICO Y ESTADO DE MÉXICO

María Estela Orozco Hernández¹,

Vicente Peña Manjarrez², Patricia Mireles Lezama¹

¹ *Centro de Investigación en Estudios Avanzados
en Planeación Territorial, Facultad de Planeación Urbana
y Regional, Universidad Autónoma del Estado de México*

² *Colegio de Ingenieros del Estado de México, A.C.*

RESUMEN

Este trabajo a través de los casos de México y el Estado de México ofrece una línea de estudio para analizar los factores que provocan la degradación y la deforestación, y su relación con el cambio climático. Los factores de presión directa e indirecta son utilizados para caracterizar el estado de los ecosistemas terrestres en un determinado momento y lugar, y los factores sociales refuerzan la explicación de las transformaciones biofísicas en su dimensión espacial y temporal. La combinación de ambos enfoques confirma la pérdida de sumideros de carbono, cambios previsibles en las condiciones climáticas, deterioro del patrimonio natural y la necesidad de implementar estrategias de adaptación específicas y en diferentes escalas.

Palabras clave: degradación, ecosistemas terrestres y cambio climático.

DEGRADATION FACTORS OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS MEXICO AND THE STATE OF MEXICO

ABSTRACT

This work through the cases of Mexico and the State of Mexico offers a line of study to analyze the factors that cause degradation and deforestation, and its relation to climate change. The factors of direct and indirect pressure are used to characterize the state of terrestrial ecosystems at a particular time and place, and social factors reinforce the explanation of the biophysical changes in spatial and temporal dimension. The combination of the two approaches confirms the loss of carbon sinks, expected changes in climatic conditions, deterioration of natural heritage and the need to implement specific adaptation strategies at different scales.

Keywords: degradation, climate change and terrestrial ecosystems.

INTRODUCCIÓN

El joven desarrollo de los estudios que complementan las ópticas biofísica y social para estudiar los procesos de la alteración de los ciclos de renovación natural de las cubiertas del suelo y la pérdida de sumideros de carbono, resalta el bajo perfil del análisis de las causas que producen alteraciones de largo plazo en los ecosistemas terrestres. El planteamiento central anticipa que los factores sociales, culturales, políticos y económicos han alterado en tiempo y en espacio las funciones e interacciones de los componentes bióticos, abióticos y climáticos de las cubiertas del suelo, lo cual se expresa en transformaciones que tienen efectos directos e indirectos sobre el cambio climático. Los directos se expresan en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) ocasionada por la combustión y descomposición de biomasa aérea asociada a los procesos de conversión de bosques a otros usos, y los indirectos en la pérdida total o parcial de la cubierta vegetal y en la alteración de los suelos, lo que erosiona el patrimonio de múltiples comunidades rurales y conduce a la pérdida de sumideros de carbono atmosférico fundamentales para regular las condiciones del clima local y regional.

En México la tasa de deforestación establece un escenario crítico en un rango que fluctúa en 350 mil y 960 mil hectáreas por año, su agravamiento en las selvas y el incremento de la degradación de los bosques en zonas de montaña y en las regiones áridas y semiáridas (INE, 2000). Esta problemática ha guiado los estudios que tienen por objetivo estimar las tasas de cambio, cuantificar los intercambios y las pérdidas y ganancias en las distintas categorías de ocupación del suelo asociadas a los procesos de deforestación, degradación y recuperación de las coberturas vegetales (Bocco *et al.*, 2001, Mendoza *et al.*, 2002, Alonso *et al.*, 2003, Ramírez y Zubieta, 2005, Velásquez, Mas y Palacio, 2002 y Pineda, 2009), y los estudios que buscan potenciar la capacidad de almacenamiento de carbono en los bosques naturales y en los bosques manejados (Ordóñez, 1999, Franco *et al.*, 2006, Rodríguez *et al.*, 2009, Acosta *et al.*, 2002, Aguirre-Salado *et al.*, 2009, Escandón *et al.*, 1999). Una tercera vía aborda los cambios en el stock de biomasa forestal y leñosa, la conversión de bosques y praderas, el abandono de tierras cultivadas, los cambios en el C en los suelos y su contribución en la emisión gases de efecto invernadero (GEI) (Estrada *et al.*, 2009, Frost, 1998, UNFCCC, 2008).

En nuestro país la categoría Uso de Suelo, Cambios de Uso de Suelo y Silvicultura (USCUSS)¹ es la segunda fuente de emisión de GEI, emite 86 877 Gg de GEI de CO₂ equivalente, aporta 14% de las emisiones totales y 10% corresponde al cambio de uso del suelo,² 64.63% de las emisiones se debe a la combustión y descomposición

¹ La atención a la categoría de emisión USCUSS, en varios de los países comprometidos con el Protocolo de Kyoto es reciente, oficialmente la reducción de GEI por fuente se basa en la Guía Metodológica de Buenas Prácticas de 1996, complementada con la guía del año 2000, hasta el año 2003 fue considerada la categoría USCUSS, las guías del 2006 modificaron sustancialmente las guías de 1996, fusionaron los sectores “Agricultura” y “Uso de los Suelos, Cambio de Uso de los Suelos y Silvicultura”, siendo opcional para los países incorporar las buenas prácticas del 2003 y 2006 (IPCC, www.ipcc.ch, consulta 13-02-2011).

² El Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI) 1990-2002 reporta que la contribución de las emisiones de GEI de las diferentes categorías en términos de CO₂ equivalente en 2002, es la siguiente: energía 61%; le siguen las categorías de USCUSS 14%; desechos 10%; procesos industriales 8% y agricultura 7%.

de biomasa aérea asociada a la conversión de bosques a otros usos (Semarnat/INE, 2006a:33), (cuadro 1). Ante la ausencia de datos y mediciones directas por fuente de área, las estimaciones se basan en la estandarización de la clasificación de vegetación y uso del suelo a nivel histórico en México y en promedios anuales de GEI, por este motivo la cantidad de combustible consumido por el fuego y la descomposición de biomasa aérea asociada a la conversión de bosques a otros usos es prácticamente desconocida.

Cuadro 1
MÉXICO: FUENTES DE EMISIÓN DE GEI DE LA CATEGORÍA USCUS

<i>Fuente de emisión</i>	<i>CO₂ equivalente 2002</i>	<i>%</i>
A. Combustión y descomposición de biomasa aérea asociada a los procesos de conversión de bosques a otros usos	64,484 Gg	64.63%
B. Suelos minerales y áreas agrícolas	30,344 Gg Carbono orgánico en suelos	30.41%
C. Bosques manejados	4,932 Gg	4.94%
Total	99,760	99.98
D. Captura de carbono en tierras abandonadas*	12,883 Gg	
Balance de las emisiones	86,877 Gg*	
Total de la categoría menos captura de carbono*		

Fuente: Semarnat-INE (2006a). El balance es resultado de $A + B + C = \text{Emisión total} - D \text{ captura} = \text{Emisión neta}$.

En una escala global, los cambios de uso del suelo y el aprovechamiento de los bosques y las selvas siguen siendo las fuente netas de bióxido de carbono emitido a la atmósfera. Se estima que el cambio de uso del suelo y la silvicultura contribuyen con la emisión de 70 202.8 Mt de CO₂ equivalente, 99.39% corresponde al CO₂, 0.36% al CH₄ y 0.23% al N₂O (Semarnat-INE, 2009), la combustión de biomasa producida por los incendios ingresa a la atmósfera una cantidad equiparable a la mitad del CO₂ generado por el uso de combustibles fósiles. En los incendios de combustión incompleta (incendios

sin llama) que se producen principalmente en las zonas pantanosas o en los bosques de coníferas, se desprenden cantidades importantes de monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y otros hidrocarburos, junto con hidrógeno y ácidos orgánicos (Ute Hänsler, 2010:2).

El análisis de los cambios de la cubierta forestal y el monitoreo de las pérdidas y ganancias de la superficie de bosque templado y las selvas, destaca los trabajos del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IG-UNAM) y la Comisión Nacional Forestal (Conafor). Para los fines del Inventario Nacional Forestal usuario del trabajo del IG-UNAM se realizó el análisis de los procesos de cambio en la ocupación del suelo, calculando matrices de transición y tasas de deforestación (Velásquez *et al.*, 2002), en este trabajo la deforestación se consideró como la diferencia neta entre las superficies cubiertas por vegetación arbórea (bosques y selvas) en el periodo 1993-2000 y en su comparación con las existencias forestales. La Conafor utilizó información de los años 1993 y 2002, y sin entrar en detalles de pérdidas, ganancias y transiciones, aportó información sobre la dinámica de cambio de la cubierta forestal y la superficie deforestada, aquella superficie que ha sido transformada a otro uso del suelo: agricultura, pastura, reservorios de agua o áreas urbanas (FAO, 2006). No obstante que estos trabajos con métodos y materiales similares obtuvieron resultados distintos,³ establecieron una línea base de tasas de deforestación que han sido utilizadas para comparar los resultados de variados estudios regionales y locales. En otro estudio se aplicaron tres metodologías cuantitativas para modelar la deforestación y sus implicaciones en los proyectos de captura de carbono en la Meseta Purépecha, Michoacán y la reserva de Calakmul; Campeche, las

³ Los estudios sobre deforestación han derivado una enorme cantidad de estimaciones sobre tasas de deforestación en el país. Tal variación se debe a la diversidad de tecnologías usadas en las estimaciones, como a las características de las regiones evaluadas; lo que si es un hecho es que la tasa de deforestación es muy elevada. El problema se observa con mayor intensidad en áreas forestales que no están bajo un manejo sistemático o bien donde los usos no maderables son escasos, incluyendo las Áreas Naturales Protegidas (INE, 2000a).

metodologías produjeron resultados encontrados, la recomendación fue que para estudiar los procesos de deforestación es necesario evaluar las presiones sobre la tierra y comprender los determinantes que ocasionan este proceso, incluyendo los factores biofísicos, socioeconómicos y políticos que ocasionan el cambio. Brown, 2003: 49, destaca la importancia de explicar las causas de la degradación y la modificación de la cobertura y uso del suelo analizando la interacción de factores sociales, económicos, políticos y ecológicos (Bocco *et al.*, 2001).

MARCO LÓGICO DEL CICLO DE LA DEGRADACIÓN-DEFORESTACIÓN

El antecedente analítico más sólido es el sistema Presión-Estado-Respuesta⁴ (PER), esta herramienta que se basa en el conjunto de interrelaciones entre las actividades humanas que ejercen presión (P) sobre el ambiente, modificando la cantidad y calidad de los recursos naturales (E); la sociedad responde (R) con políticas y acciones generales y sectoriales (ambientales y socioeconómicas), mismas que afectan y se retroalimentan de las presiones de las actividades humanas. El sistema considera las actividades humanas como factores de presión indirecta, y el uso de los recursos naturales y la generación de contaminantes y desechos, como factores de presión directa que inciden en el estado del medio ambiente y los recursos naturales (INE, 2000). El sistema lógico para identificar los factores de presión que inducen la alteración o modificación de las condiciones ecológicas (interacción de los componentes bióticos,

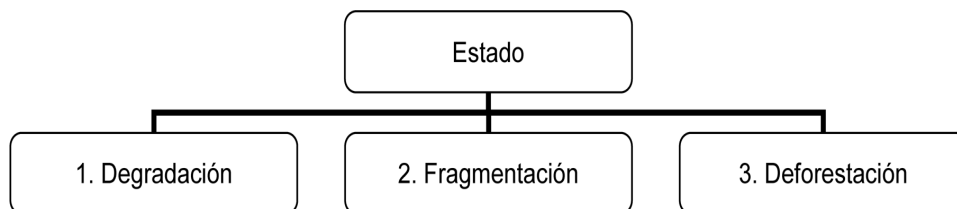
⁴ El Sistema PER fue formulado en Canadá y adaptado por Naciones Unidas para la elaboración de indicadores ambientales que integrarían los sistemas de contabilidad física y económica en varios países. En 1993 fue modificado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) para definir un grupo de indicadores para la evaluación del desempeño ambiental. El Instituto de Nacional de Ecología elaboró para México un reporte general de los indicadores del desempeño ambiental, a través de los cuales se buscaba evaluar el desempeño ambiental y convertirlos en una herramienta de información para la planeación y la toma de decisiones (INE, 2000b).

abióticos y climáticos) en un conjunto de tierras y las coberturas vegetales asociadas, destaca el aprovechamiento forestal, la tala ilegal, los incendios forestales, las plagas y las actividades agropecuarias.

La importancia de los factores de presión varía de acuerdo con la vegetación de que se trate, en los bosques destacan los incendios, las plagas, los cambios de uso de suelo y la tala clandestina; y en las selvas las plagas y las enfermedades, el cambio de uso de suelo, los incendios y en general los conflictos agrarios y la pobreza extrema (Conafor-PEFM, 2003). La perspectiva reactiva que aborda la problemática a partir de los efectos, le concede mayor atención al estado de los ecosistemas terrestres y resalta el poco espacio destinado al análisis de los factores subyacentes que producen el ciclo de la degradación-deforestación. La degradación identifica la alteración de las cubiertas del suelo inducida por diferentes factores de perturbación y no implica un cambio de uso del suelo, la fragmentación refiere la transformación del paisaje dejando pequeños parches de vegetación original rodeados de superficie alterada y la deforestación es la eliminación total de la vegetación arbolada y la conversión de las tierras a otros usos (Semarnat, 2006a), (figura 1).

Figura 1

CICLO DE LA PÉRDIDA DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO



Elaboración propia.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación señala avances en la inversión de la tendencia general de pérdidas de área de bosque, sin embargo, la deforestación y la transformación no controlada de bosques en tierras de cultivo, prosigue a un ritmo alarmante en muchos países (FAO, 2010). En el periodo 1990-2010 se observa la reducción de las tasas negativas de cambio anual en los bosques mexicanos, particularmente en el bosque primario y una tasa de cambio alta y positiva en los bosques plantados. La siembra de árboles (forestación) en tierras que antes no tenían cubierta forestal y la reforestación de áreas taladas, no compensa la superficie de bosque sujeta a los cambios (cuadro 2), así lo confirma la participación de los bosques plantados (5%) en el área forestal total, la importancia del bosque primario (53%)⁵ y el papel estratégico de los bosques regenerados naturalmente (42%) en la reversión de la degradación y la pérdida de la cubierta forestal.

Cuadro 2
TENDENCIAS EN LA EXTENSIÓN DE LOS BOSQUES EN MÉXICO, 1990-2010

<i>Área de bosque (1 000 ha)</i>				<i>Tasa anual de cambio</i>					
1990	2000	2005	2010	1990-2000		2000-2005		2005-2010	
				1 000 ha/año	%	1 000 ha/año	%	1 000 ha/año	%
70291	66751	65578	64802	-354	-0.52	-235	-0.35	-155	-0.24
<i>Área de bosque primario (1 000 ha)</i>				<i>Tasa anual de cambio</i>					
1990	2000	2005	2010	1990-2000		2000-2005		2005-2010	
				1 000 ha/año	%	1 000 ha/año	%	1 000 ha/año	%
39492	35469	34531	34310	-402	-1.07	-188	-0.53	-44	-0.13
<i>Área de bosques plantados (1 000 ha)</i>				<i>Tasa anual de cambio</i>					
1990	2000	2005	2010	1990-2000		2000-2005		2005-2010	
				1 000 ha/año	%	1 000 ha/año	%	1 000 ha/año	%
0	1058	2394	3203	106	-	267	17.74	162	6.00

Fuente: FAO, 2010.

⁵ Basado en un promedio mundial, más de un tercio son bosques primarios; aquellos de especies nativas en los que no existen indicaciones visibles de actividades humanas y los procesos ecológicos no han sido alterados de forma significativa. Aunque representan 36% del área de bosque, han disminuido en más de 40 millones de hectáreas desde el año 2000. Los bosques tropicales húmedos comprenden la mayor riqueza de

Algunos estudios corroboran la disminución de las tasas de deforestación y la recuperación de las cubiertas de bosque y selva, y lo atribuyen al sistema de aprovechamiento-abandono-regeneración natural de la cubierta vegetal y al pago por servicios ambientales (Ramírez, 2001, García *et al.*, 2005), y los datos nacionales exhiben la persistencia de la reducción del bosque por deforestación y su conversión a otros usos, y reafirman la importancia de la regeneración natural del bosque en tierras agrícolas abandonadas por encima de la evolución de las áreas plantadas. En estos términos se supondría que no hay cambios en el área de bosque y en las existencias de carbono. Sin embargo, el carbono almacenado en la biomasa forestal viva, acusa también cambios negativos que confirman las pérdidas motivadas por la degradación, la deforestación y los cambios de uso del suelo (cuadro 3).

Cuadro 3

TENDENCIAS EN LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN LA BIOMASA FORESTAL VIVA EN MÉXICO, 1990-2010

<i>Existencias de carbono en la biomasa forestal viva (millones de toneladas)</i>					<i>Cambio anual (millones de toneladas/año)</i>		
1990	2000	2005	2010	Por hectárea 2010 (toneladas)	1990-2000	2000-2005	2005-2010
2186	2111	2076	2043	32	-8	-7	-7

Fuente: FAO, 2010.

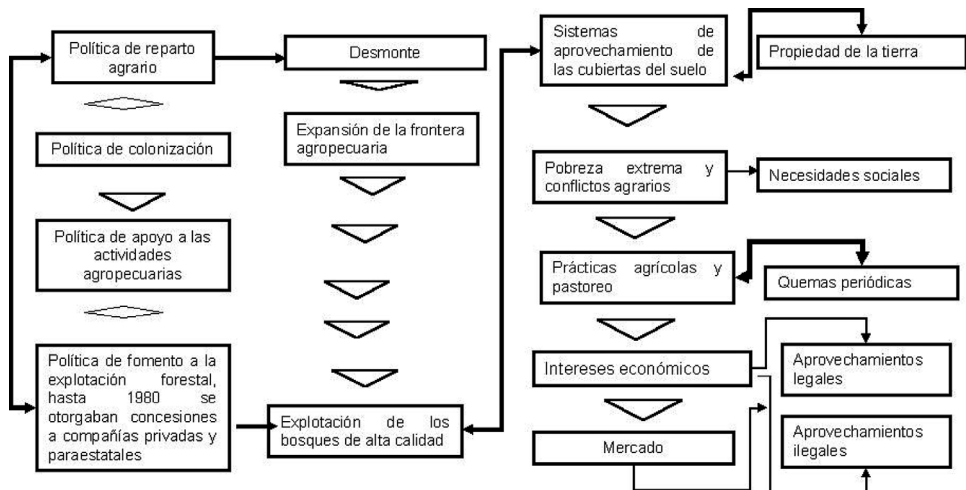
Los cambios de uso del suelo y el aprovechamiento forestal se constituyen en fuentes netas de bióxido de carbono emitido a la atmósfera, aproximadamente 20 a 25% de las emisiones totales de CO₂ se deben a la deforestación tropical (Brown, 2003: 58).

especies y diversidad de ecosistemas terrestres. La reducción del área de bosques primarios en un 0,4% anual en una década, se debe en gran parte a la reclasificación del bosque primario a “otros bosques regenerados naturalmente” por la tala selectiva y otras intervenciones humanas (FAO, 2010: 19)

El trópico húmedo muestra la capacidad homeostática de las selvas altas y medias ante la disminución de la biomasa ocasionada por el cambio de uso del suelo y las actividades humanas, y el amplio potencial de recuperación y regeneración de biomasa determinada por las condiciones biofísicas (De Jong *et al.*, 2004). La omisión de los factores de presión subyacentes en el análisis *del ciclo de degradación-deforestación* permite plantear que la magnitud y la dirección de los impactos cambia en el tiempo y en el espacio en razón directa con los factores sociales, culturales, políticos y económicos, los cuales en distintos momentos han afectado la integridad de los componentes bióticos y abióticos de los ecosistemas terrestres (figura 2).

Figura 2

FACTORES DE PRESIÓN DE LARGA DURACIÓN: POLÍTICOS Y SOCIOCULTURALES



Elaboración propia.

No obstante que la degradación del bosque como paso previo de la deforestación y el cambio de uso del suelo en términos generales se debe al avance de la frontera agrícola, la situación tiene raíces mucho más profundas, que tienen que ver con

coyunturas histórico-políticas de larga duración, entre ellas, el proceso de reparto agrario iniciado en la primera mitad del siglo veinte (Orozco *et al.*, 2009). En el periodo 1934-1940, el gobierno mexicano implementó una de las reformas agrarias más importantes de América Latina, favoreció la dotación de tierras a los núcleos agrarios, la construcción de obras de riego y el excepcional crecimiento del producto agropecuario entre 1940 y 1965 (s/pp., 1985). En sucesivos gobiernos se promovió el reparto de la tierra y el impulso a las actividades agropecuarias, el reparto culminó en el año 1992 con la modificación del artículo 27 constitucional y la Nueva Ley Agraria. En paralelo la política de aprovechamiento forestal pervivió hasta el año 1980 a través de las concesiones otorgadas a las compañías privadas y el aprovechamiento de las empresas paraestatales.

Ambas políticas propiciaron el desmonte y el avance de la frontera agrícola en zonas de vocación forestal, de tal suerte que a lo largo del siglo xx en el país se perdieron entre 50 y 67% de la superficie original de bosque templado (Challenger, 2004), y en la última década de 3.5 a 5.5 millones de hectáreas de bosques y selvas.

El análisis de los sistemas de aprovechamiento de la tierra⁶ supone tener en cuenta la propiedad de ésta, el modo en que los individuos se apropian de los recursos naturales y las condiciones sociotécnicas en las que realizan la explotación de las cubiertas del suelo. El 70% de la superficie forestal del país está bajo el régimen de propiedad social, 4% en propiedad pública y 26% en propiedad privada, es decir que los derechos de manejo y uso de los bosques corresponden en su mayoría a los ejidos y comunidades agrarias. Alrededor de 80% de los bosques mexicanos está en manos de ejidos y comunidades agrarias; el número de *comunidades forestales* oscila en 7 000 y 9 047, la mayoría tiene pequeñas áreas de bosque degradadas de poca importancia

⁶ Las características de los *sistemas de uso de la tierra* o formas de aprovechamiento de un área específica, abarcan los atributos de la biosfera —suelo, geología, hidrología, poblaciones vegetales y animales—, así como los factores sociales que condicionan su explotación y producen alteraciones ambientales, incluye la propiedad de la tierra, los conflictos generados por su apropiación y disfrute, las controversias del uso actual y el uso adecuado de la tierra y la normatividad aplicable en términos de derechos y restricciones para el aprovechamiento de los recursos naturales (FAO, 1992).

comercial (*Barton y Merino, 2004*). En este contexto 82% de la superficie de bosque tiene usos múltiples, 5% tiene como función primaria la producción, 13% se destina a la conservación de la biodiversidad (áreas naturales protegidas) y la función de protección de suelo y agua no figura (FAO, 2010).

Las varias vías por las cuales los productores usan la diversidad natural para la producción, incorpora la variación que resulta de la interacción entre los recursos naturales, el medio biótico y abiótico y las prácticas de manejo de la tierra. Estas prácticas resultan de una combinación indisociable de las características ecológicas de una localización específica, los factores históricos, sociales, culturales, económicos y jurídicos que conforman los modos de vida rural. En las comunidades rurales las prácticas de aprovechamiento y manejo de la tierra han jugado un papel principal en la conservación y/o deterioro de la cubierta forestal. La quema de la vegetación⁷ realizada cada ciclo agrícola favorece el rebrote de pasto tierno para alimentar el ganado y la germinación de las semillas de algunas especies de árboles; sin embargo, su finalidad última es el desmonte para abrir tierras al cultivo y ganadería. Tanto la quema como la apertura de tierras de cultivo expresan la persistencia de una estrategia de supervivencia campesina que puede llevar al deterioro del bosque y el entorno natural.

Las actividades agropecuarias ocupan el primer lugar como causa⁸ de la propagación libre del fuego sobre la vegetación natural (incendio forestal), año con año se inducen miles de pequeños fuegos, éstos no alcanzan la denominación de “incendios forestales” a no ser que los terrenos afectados alcancen superficies mayores (Semarnap, 1998). Los datos sobre los incendios no son alentadores, en el periodo 1970 a 2005 destaca el quinquenio 1991-1995 con el mayor número de siniestros provocados por la quema

⁷ A pesar de que a partir de 1998 se hizo más estricto el calendario de quemas controladas y ha tenido mayor difusión el uso de prácticas más seguras para su ejecución, todavía el causal de incendio más importante sigue siendo el escape y falta de control de incendios agropecuarios (INE, 2000).

⁸ Las causas más frecuentes de los incendios forestales son: actividades agropecuarias (48%); incendios provocados (17%), fogatas (16%), fumadores (8%), actividad silvícola (3%), derechos de vía (1%), otras actividades productivas (1%), otras causas (6%) (Semarnap, 2000).

de la cubierta forestal, particularmente en el Estado de México y Michoacán (Conafor, 2005). La superficie afectada por los incendios incluye la superficie quemada y aquella que ha sufrido alguna alteración, el daño provocado no sólo incrementa los costos de las actividades correctivas de combate a los incendios, sino que reduce rápidamente la superficie forestal y atenta contra los bienes y servicios ecológicos que proveen los bosques (purificación de oxígeno, hábitat de fauna silvestre, captación de agua de lluvia, recarga de los mantos acuíferos y contención de la erosión del suelo). En el año 2005 el área de bosque afectada por los incendios y otros daños (plagas, enfermedades y diversos factores bióticos) fue de 38 000 hectáreas (38x1000) y 61 000 hectáreas (61x1000), respectivamente. En conjunto afectaron 0.15% de la superficie forestal (FAO, 2010). En el periodo 1991-2001, la superficie nacional afectada por los incendios exhibe una tasa general de 1.4%. El índice de afectación se polarizó de Sur a Norte, en estas regiones la incidencia de incendios fue menor, pero su magnitud e intensidad afectó mayor superficie de cubierta vegetal original. En la región Centro Sur la incidencia de incendios fue mayor y la superficie afectada menor (cuadro 4).

Cuadro 4
SUPERFICIE TOTAL AFECTADA POR LOS INCENDIOS FORESTALES 1998-2001

<i>Regiones</i>	<i>Superficie regional en has</i>	<i>Superficie total afectada 1991-2001</i>	<i>Tasa de afectación %</i>	<i>No. De incendios 1991-2001</i>	<i>%</i>	<i>Índice de afectación has/no.</i>
Norte	52 246 914	635 603	22.6	11 876	13.3	54
Noreste	14 439 483	84 469	3	791	0.9	107
Noroeste	38 224 040	167 555	6	2 568	2.9	65
Occidente	17 068 274	327 281	11.6	16 147	18.1	20
Oriente	13 094 765	113 847	4.1	7 663	8.6	15
Centro- Norte	18 443 209	238 814	8.5	2 731	3.1	87
Centro- Sur	2 873 502	151 939	5.4	36 582	41.0	4
Sureste	16 463 528	175 365	6.2	2 454	2.8	71
Suroeste	23 070 283	914 529	32.6	8 319	9.3	110
Total	195 923 998	2 809 402	100.0	89 131	100.0	32

Elaboración propia.

Fuente: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd_compendio08/compendio_2008/03_biodiversidad2.html

En el periodo de referencia las comunidades vegetales más afectadas fueron los pastos naturales (42%), los arbustos y matorrales (36%) y la superficie arbolada (23%); y las regiones⁹ más afectadas fueron el Suroeste y el Norte del país (cuadro 5). Si bien es cierto que los incendios forestales juegan un papel principal como factor desencadenante de la conversión de tierras de vocación forestal a otros usos, el principal impacto en el hábitat de las regiones del norte del país es a causa del uso pastoril de la vegetación natural (cría de ganado bovino) y el desmonte para realizar la agricultura. En las regiones del Sur las transformaciones más significativas se deben a la implantación de sistemas agrícolas intensivos en el uso de agroquímicos, sistemas comerciales extensivos y la persistencia de la práctica de la roza, tumba y quema para inducir el cultivo del maíz o medio para desmontar con rapidez las tierras destinadas a usos diversos.

Cuadro 5

PORCENTAJE DE SUPERFICIE AFECTADA POR INCENDIOS FORESTALES Y TIPO DE VEGETACIÓN 1998-2001

<i>Regiones</i>	<i>Porcentaje de incendios</i>	<i>Porcentaje de superficie pastos naturales</i>	<i>Porcentaje de superficie arbustos y matorrales</i>	<i>Porcentaje de superficie arbolado</i>	<i>Porcentaje de superficie afectada total</i>	<i>Índice de afectación Superficie incendiada /No. incendios</i>
Norte	15.2	18.5	17	24	20	52
Noreste	1.1	0.2	9	2	4	132
Noroeste	3.6	4.2	6	4	5	51
Occidente	17.5	8.6	11	7	9	20
Oriente	10	4.7	5	5	5	19
Centro Norte	4	3.4	9	6	6	63
Centro Sur	35	3.9	4	2	4	4
Sureste	3	2.2	6	6	4	52
Suroeste	11	54.3	33	44	43	148
Total	100	100	100	100	100	

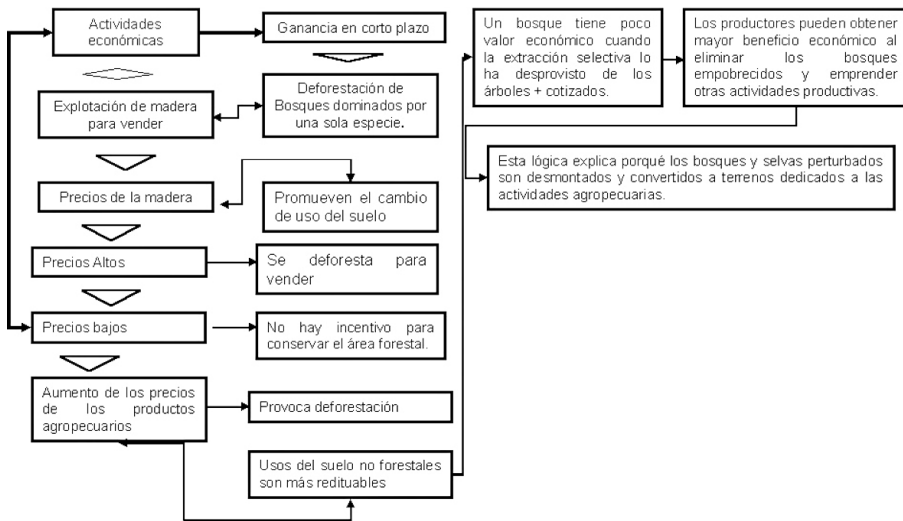
Elaboración propia con base en http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd_compendio08/compendio_2008/03_biodiversidad2.html

⁹ Norte (Chihuahua, Coahuila y Durango), Noreste (Nuevo León y Tamaulipas), Noroeste (Baja California, Baja California Sur, Sinaloa y Sonora), Occidente (Colima, Nayarit, Michoacán y Jalisco), Oriente (Hidalgo, Puebla,

El aprovechamiento del bosque con fines económicos involucra distintos agentes sociales que participan en el deterioro del bosque. Los factores económicos incluyen el mercado, los precios de la madera y los precios de los productos agrícolas (figura 3).

Fig. 3

FACTORES DE PRESIÓN ECONÓMICA



Elaboración propia con base en http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd_compendio08/compendio_2008/03_biodiversidad2.html

El 5% de la superficie de bosque dedicada a la producción muestra el perfil deficitario del subsector forestal, caracterizado por la variabilidad del volumen y el valor de la producción, una contribución igual o menor al 1% al producto interno bruto nacional, bajos niveles de tecnificación y pocos empleos, aunado a la presión que ejercen los poseedores sobre los bosques.

Tlaxcala y Veracruz), Centro Norte (Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas), Centro Sur (Distrito Federal, Estado de México y estado de Morelos), Sureste (Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán), Suroeste (Chipas, Guerrero y Oaxaca).

La pobreza imperante y la necesidades ocasionan la extracción de la biomasa de alta calidad y el desinterés por conservar el bosque, es común que los propietarios opten por eliminar el bosque para expandir la frontera agrícola y ganadera, y realicen cortas ilegales para obtener madera o leña para uso doméstico. Otra forma de aprovechamiento que contribuye al circuito comercial de la madera y está tipificada como delito en la legislación ambiental, es la tala ilegal. Por su ilegalidad no se tiene cuantificada su participación en la devastación del bosque en zonas de difícil acceso, y se estima que el aprovechamiento de las cortas legales, ilegales y desmontes sobrepasa el incremento natural y que aproximadamente la mitad de la remoción maderable es ilegal o no autorizada/ registrada (INE, 2000b:10, 13).

FACTORES DE DEGRADACIÓN Y MEDIDAS DE INTERVENCIÓN EN EL ESTADO DE MÉXICO

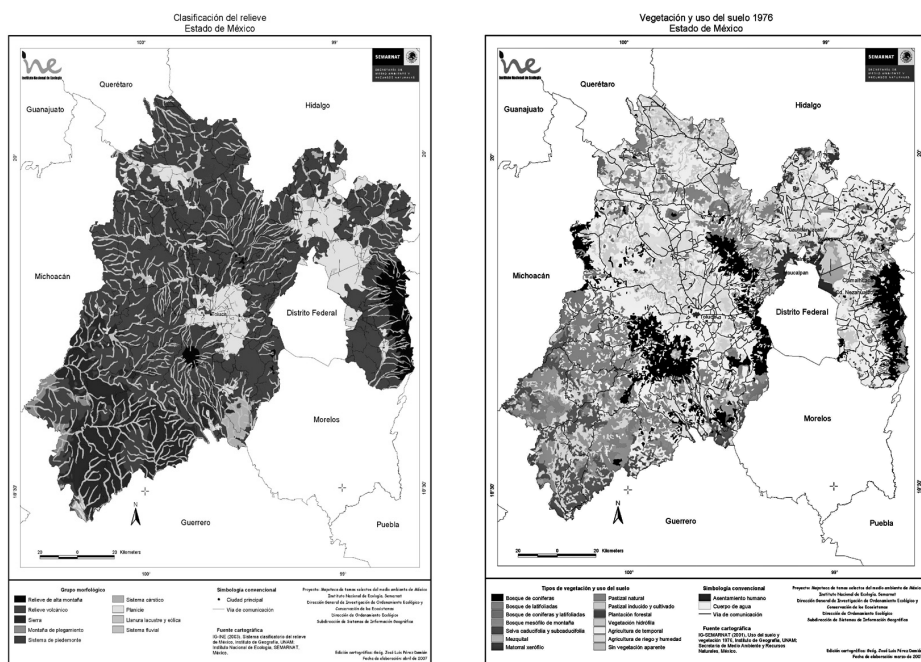
La entidad tiene una superficie de 2 235 680 hectáreas, las presiones humanas resaltan la superficie agropecuaria (46%) y la superficie de pastizal (15%), y las ventajas del bosque templado (18%) (INEGI, 2005), (figura 4). Los bosques se desarrollan en el ambiente templado-frío de las tierras altas de origen volcánico de la porción centro-norte, la selva baja caducifolia en las tierras bajas de composición calcárea de la porción sur y ambientes semicálido y cálido subhúmedo, y el matorral xerófito en el ambiente semiseco prevaleciente en la frontera con la cuenca de México.¹⁰ El estado de salud de los ecosistemas forestales tiene una relación intrínseca con factores históricos, políticos, sociales

¹⁰ En el territorio estatal quedan comprendidas las cabeceras de tres grandes cuencas: Lerma (RH-12) ocupa 27.3 % de la superficie estatal; el Balsas (RH-18), 37.2%; y el Pánuco (RH-26) 35.5% y se integra por ciento veinticinco municipios.

y culturales. Estos factores conjugan la propiedad de la tierra y las necesidades e intereses de variados actores sociales —72% de la superficie forestal y 50% de la superficie agropecuaria están bajo el régimen de propiedad social— que determinan las prácticas de uso de la tierra: quemas periódicas, agricultura de subsistencia, pastoreo extensivo y el aprovechamiento legal e ilegal del bosque maderable, lo que perfila una problemática compleja que induce la alteración de los ciclos de renovación natural y la pérdida del patrimonio ambiental de múltiples comunidades rurales marginadas.

Figura 4

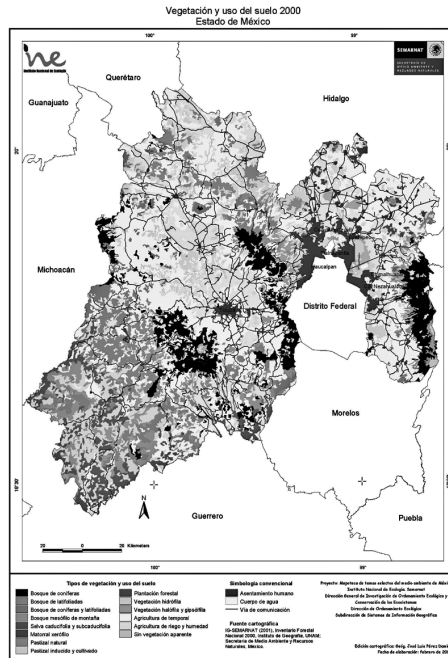
ESTADO DE MÉXICO. ESTRUCTURA LITOLÓGICA Y USOS DEL SUELO, 1970 Y 2000



Fuente: INE-Semarnat, 1976 y 2000.

Figura 4

ESTADO DE MÉXICO. ESTRUCTURA LITOLÓGICA Y USOS DEL SUELO, 1970 Y 2000



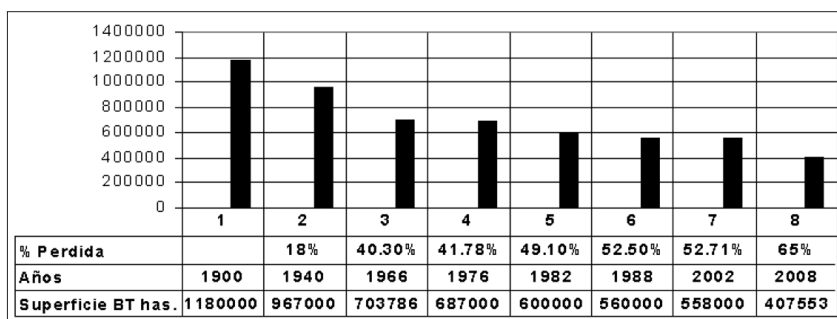
Fuente: INE-Semarnat, 1976 y 2000.

Al inicio del siglo xx la entidad disponía de 1 180 000 hectáreas de bosque templado, en el año 2001 decrece a 558 000 hectáreas (Ceballos *et al.*, 2008), la pérdida de más del 50% de la superficie forestal se atribuye al desmonte de tierras que fueron repartidas a los núcleos ejidales, al aprovechamiento de los bosques maderables y la conversión de tierras de vocación forestal al uso agrícola de bajo potencial productivo (figura 5).

En la segunda mitad del siglo xx y a lo largo de 49 años se mantuvo a los dueños al margen del aprovechamiento del bosque a través de dos vedas (1947-1970 y 1990-1995), aprovechamientos regulados por medio de las concesiones otorgadas por el organismo público descentralizado Protectora e Industrializadora de Bosques,

(Proteinbos, 1970-1990) y la creación de áreas naturales protegidas nacionales y estatales:¹¹ Parques Nacionales: Nevado de Toluca (25-enero-36), Insurgentes Miguel Hidalgo y Costilla (18-sep-36) y Bosconcheve (10-ago-40), Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (10-nov-00) y el Área de Protección de Flora y Fauna, Ciénegas del Lerma (20-sep-00).

Figura 5
EVOLUCIÓN DE LA CUBIERTA DE BOSQUE TEMPLADO



Fuente: Elaboración propia con base en Ceballos *et al.*, 2008.

El denominador común en las áreas de protección es la presencia de bosque templado (bosque de oyamel y pino), (CONANP, 2005), y aunque se reconoce su importancia

¹¹ Reservas de la biosfera: *áreas representativas* de uno o más ecosistemas no alterados por la acción del ser humano o que requieran ser preservados y restaurados, en las cuales habitan especies representativas de la biodiversidad nacional, incluyendo a las consideradas endémicas, amenazadas o en peligro de extinción. *Parques nacionales*: áreas con uno o más ecosistemas que se signifiquen por su belleza escénica, valor científico, educativo de recreo, histórico, por la existencia de flora y fauna, por su aptitud para el desarrollo del turismo o por otras razones análogas de interés general. *Áreas de protección de flora y fauna*: son áreas establecidas de conformidad con las disposiciones generales de la LGEEPA y otras leyes aplicables en lugares que contiene el hábitat de cuya preservación depende la existencia y desarrollo de especies de flora y fauna silvestres.

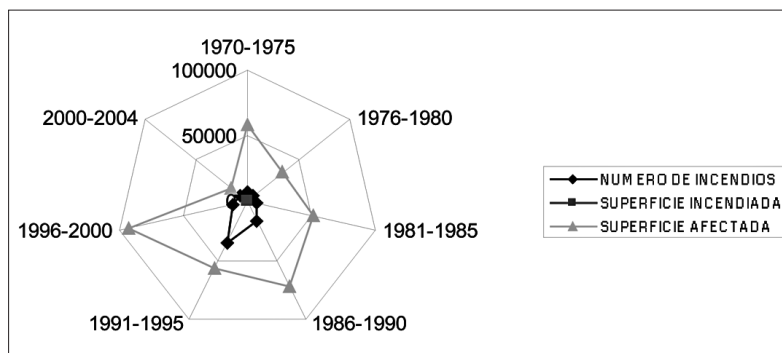
como proveedor de bienes y servicios ambientales: fijación de suelo, transformación y descomposición de la materia orgánica, producción de biomasa, fijación del carbono, generación de oxígeno, protección de fauna, conservación de la biodiversidad y regulación de microclimas, se tiene poca superficie en manejo técnico aunada a una tasa anual creciente de pérdida y degradación de los bosques, que no ha sido posible reducir debido a la intensificación de la explotación selectiva, el aumento en la demanda de materias primas y al bajo nivel de participación de los diferentes sectores involucrados en la actividad forestal (GEM, 2006). Es paradójico que las áreas críticas por los ilícitos forestales se ubiquen en las ANP: Sierra de las Cruces, Reserva Forestal las Goletas, Nevado de Toluca y la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. La tala ilegal la realiza la población pobre y la delincuencia organizada, aunque se refuerzan los operativos de vigilancia forestal,¹² son pocas las acciones para involucrar a las autoridades de los núcleos agrarios en actividades de vigilancia, protección y conservación del bosque. Incluso en las áreas naturales protegidas las labores de protección y vigilancia son deficientes, y su grado de deterioro ha llevado a pensar en su recategorización.

Los incendios tienen su origen en las prácticas tradicionales de uso inadecuado del fuego para la agricultura, quemas intencionales en zonas forestales y problemas de litigio por la tenencia de la tierra, entre otras (Conafor, 2003). La práctica de las quemas se realiza principalmente en los meses de abril y mayo, los actores agrarios adolecen de la conciencia sobre la previsión del riesgo. El perfil de los incendios forestales muestra que al finalizar las vedas (1947-1970 y 1990-1995) el índice promedio de las tierras afectadas aumentó 8 y más hectáreas, y en el lapso intersticial entre una veda y otra se produjo 39.9% de los incendios y un índice de afectación de seis hectáreas (figura 6).

¹² Grupo de Atención al Medio Ambiente (GAMA) de la Dirección General de Seguridad Pública y Tránsito, la Fiscalía Especializada en Delitos Ambientales y Fraccionadores (FEDAF) integrada a la Procuraduría General de Justicia (PGJ), la FEDAF en coordinación con Probosque realiza operativos y recorridos de inspección y vigilancia en los bosques del Estado de México, así como auditorías técnicas a los aprovechamientos forestales e inspecciones a la industria forestal y centros de almacenamiento de materias primas.

Figura 6

ESTADO DE MÉXICO: INCENDIOS FORESTALES, SUPERFICIE AFECTADA, 1970-2004



Elaboración propia con base en Conafor. Coordinación General de Conservación y Restauración Forestal. Gerencia Nacional de Incendios Forestales. Estadístico Anual de Incendios Forestales 1970-2003.

En la segunda veda se registró igual número de incendios (39.9%) y un índice de afectación de 1.6 hectáreas, el índice promedio más alto fue de ocho hectáreas en el quinquenio 1996-2000.

Los incendios en el periodo 1998-2001 indican que los arbustos y matorrales (47.0%), los pastos naturales (39.0%) fueron los más afectados y menos el arbolado (14.0%), (cuadro 6).

Cuadro 6

ÍNDICE DE AFECTACIÓN DE LOS INCENDIOS FORESTALES POR TIPO DE VEGETACIÓN, 1998-2001

	<i>Incendios</i>	<i>Sup afectada</i>	<i>Pastos naturales</i>	<i>Arbustos y matorrales</i>	<i>Arbolado</i>	<i>ISA</i>
1998	3 649	25 847	9 616	12 350	3 881	7.1
1999	1 512	4 190	1 666	1 952	572	2.8
2000	2 152	6 835	3 016	3 125	694	3.2
2001	986	2 845	1 338	1 229	278	2.9
Total	8 299	39 717	15 636	18 656	5 425	4.8

Fuente: Conafor. Coordinación General de Conservación y Restauración Forestal. Gerencia Nacional de Incendios Forestales. Estadístico Anual de Incendios Forestales 1970-2001.

En 2008 y 2009 el índice de afectación promedio se redujo de 3.4 a 3.3 hectáreas, 54% y 62% de la superficie afectada correspondió a vegetación arbustiva, 32% y 23% al pastizal, 13% y 15% al renuevo de pino, 0.06% y 0.2% al arbolado adulto (GEM, 2011), (cuadro 7).

La mirada regional en el año de 1988 —En este año se decretó la LGEEPA— evidenció que la cuenca del río Balsas y la cuenca del río Panuco-subcuenca del río Tula¹³ presentaron la mayor afectación en la superficie de arbustos y pastizales, la generalización encubrió la fragilidad de la selva baja caducifolia y subcaducifolia y el matorral espinoso ante la propagación libre del fuego y la presión ejercida por la ganadería extensiva.

Cuadro 7
NÚMERO DE INCENDIOS E ÍNDICE DE SUPERFICIE AFECTADA (ISA)

<i>Año</i>	<i>No. de incendios</i>	<i>Superficie afectada has</i>	<i>ISA</i>
2002	1 023	1 812	1.8
2003	1 495	7 608	5.1
2004	995	7 334	7.4
2005	1 809	7 401	4.1
2006	1 347	Nd	Nd
2007	1 346	Nd	Nd
2008	1 647	5 754.70	3.4
*2009	1 808	6 030.50	3.3

Elaboración propia

*Secretaría de Medio Ambiente. Gobierno del Estado de México. Iniciativa Cambio Climático (http://www.edomex.gob.mx/medioambiente/cambio_climatico).

Los incendios han acelerado la degradación de las cubiertas del suelo y contribuido al incremento de la vegetación secundaria y las áreas desprovistas de vegetación.

La cuenca del Balsas concentró 71% de la superficie estatal de vegetación secundaria y la subcuenca del río Tula-Panuco 90% de la superficie desprovista de vegetación.

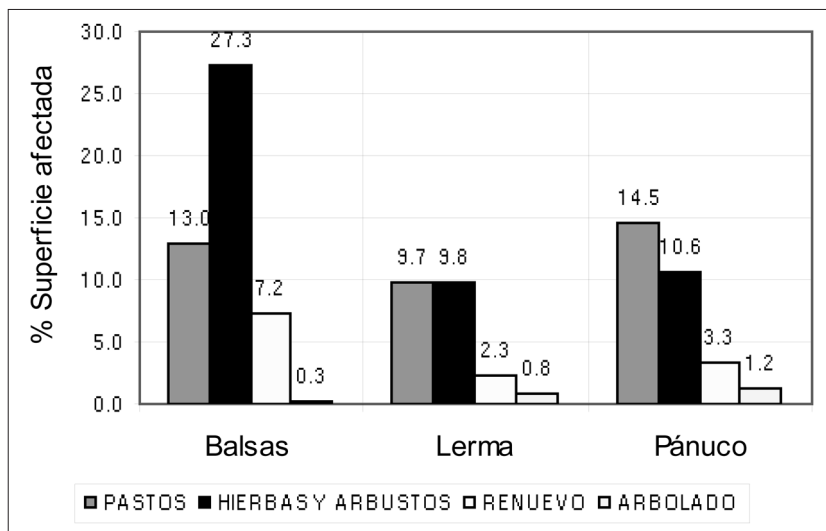
La prioridad concedida a las áreas de bosque templado y los intereses económicos de la actividad pecuaria explican la poca atención a las funciones ecológicas y productivas de los matorrales y plantas arbustivas: Aporte forrajero para el ganado y fauna silvestre, retenedoras de suelo, fuente de materias primas y secuestradoras de carbono atmosférico, también tienen importancia en el incremento de la biomasa herbácea, el reciclaje de nutrientes, la sucesión vegetal e infiltración del agua en sitios degradados (Flores *et al.*, 2007: 311-312). La reducción del índice de las tierras afectadas por los incendios se atribuye a las actividades de combate que consumen cantidades significativas de recursos humanos y materiales para el control de los siniestros, las medidas preventivas se limitan a las brechas corta fuego y poco se da seguimiento a las actividades de protección, mantenimiento e información necesarias para estimular el uso del fuego de una manera responsable, de modo que se reduzca las quemas, la incidencia de incendios y los subsecuentes costos ambientales y económicos (figura 7).

Los incendios reducen rápidamente la vegetación natural, causan debilitamiento en las especies forestales, afectan la reproducción de los organismos silvestres, compactan el suelo y eliminan la hojarasca de la superficie (afectando el ciclo hidrológico), mineraliza la materia orgánica, aceleran la descomposición del carbono en el suelo, liberándolo a la atmósfera con mayor rapidez, junto con el monóxido de carbono, compuestos volátiles y partículas, lo que pone de relieve las dimensiones locales, regionales y globales de los problemas causados por la propagación libre del fuego.

¹³ En el Estado de México la cuenca del río Lerma (RH-12) ocupa 27.3 % del territorio estatal; la cuenca del río Balsas (RH-18) 37.2% y el río Panuco (RH-26) 35.5%.

Figura 7

SUPERFICIE AFECTADA POR LOS INCENDIOS Y TIPO DE VEGETACIÓN, 1998



	Balsas	Lerma	Panuco	Sumatoria
Pastos	13.0	9.7	14.5	37.2
Hierbas y arbustos	27.3	9.8	10.6	47.7
Renuevo	7.2	2.3	3.3	12.8
Arbolado	0.3	0.8	1.2	2.3
Porcentaje de participación regional	47.8	22.6	29.6	100.0
Número de incendios	1704	844	1101	3649
Superficie total afectada	12346.4	5845.1	7656.1	25847.6
Superficie total regional	874153	600699	760828	2235680

Elaboración propia.

Fuente: INEGI-GEM (1999), Anuario Estadístico del Estado de México.

ESTADO DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO

En el Estado de México la cobertura vegetal destaca el bosque templado (62.4%) y las áreas perturbadas (25%), (cuadro 8). En este escenario 225 974 hectáreas están

perturbadas y sin uso productivo e incluyen 4 106 hectáreas con erosión severa. Las tierras presentan degradación y fragmentación de la vegetación natural, distribución irregular de los árboles en combinación con los cultivos y pastizales (GEM, 2006).

Cuadro 8
PARTICIPACIÓN DE LAS CUBIERTAS VEGETALES, ESTADO DE MÉXICO

<i>Superficie total has</i>	<i>Bosque templado</i>	<i>Selva baja caducifolia</i>	<i>Matorral desértico</i>	<i>Vegetación hidrófila y halófila</i>	<i>Áreas perturbadas</i>
894 613	558 069	87 789	16 747	6 034	225 974
Porcentaje	62.4	9.8	1.9	0.7	25.2

Fuente: Ceballos *et al.*, 2008.

El análisis de los cambios en la ocupación del suelo en el periodo 1993-2000 destaca la conversión de bosque primario a bosque secundario, bosque primario a pastizal y menos de bosque primario a cultivos (Pineda, 2008), esta situación sugiere que la degradación de los bosques y la conversión de tierras forestales a tierras de uso pecuario determinan un ciclo de deforestación de menor intensidad, comparado con el ciclo de deforestación de alta intensidad inducido por la ampliación de la frontera agrícola de principios del siglo XX, sin embargo, la continuación del proceso expresa que a diferentes ritmos se tiende hacia la pérdida de la vegetación natural.

La óptica institucional focaliza la recuperación e integración de la superficie forestal degradada a través de trabajos de conservación y restauración de suelos y bosque,¹⁴ y la ampliación de la capacidad de infiltración de agua de los mantos

¹⁴ Zanjias, trinchera, terraceo, subsoleo, control de escurrimientos por medio de presas de gavión para la retención de azolve, reforestación y plantaciones forestales comerciales, y con ello reducir la erosión de los suelos y disminuir la velocidad de los escurrimientos.

acuíferos, mas la problemática adquiere matices regionales que perfilan el patrón histórico de la deforestación y el cambio de uso del suelo a través de la preeminencia de la agricultura extensiva, la distribución del pastizal y la vegetación secundaria, lo cual determina el patrón de degradación-fragmentación-deforestación en los bosques y selvas del alto río Balsas, la degradación-fragmentación del bosque templado en el alto río Lerma, y la fragmentación-deforestación en los bosques y matorrales suscitada por las actividades agropecuarias y la urbanización en la subcuenca del río Tula (cuadro 9).

Cuadro 9
PORCENTAJE DE COBERTURAS Y USOS DEL SUELO POR CUENCA HIDROLÓGICA

		<i>No. de municipios</i>	<i>Superficie total has., 2005</i>	<i>%</i>	<i>Agricultura %</i>	<i>Pastizal %</i>	<i>Bosque %</i>	<i>Selva %</i>	<i>Matorral xerófilo %</i>	<i>OTV %</i>	<i>VS %</i>	<i>ASINV %</i>	<i>Cuerpos de agua %</i>	<i>Áreas urbanas %</i>
Balsas	Alto	16	254741	11	12	4	15	0			18	4	0	2
	Medio	17	619412	28	13	39	42	100	0	20	53	0	30	2
Lerma	Curso alto	21	231594	10	14	6	6	0	0	18	9	5	7	15
	Curso medio	8	272549	12	20	8	7	0	0	0	3	0	16	1
	Curso bajo	3	96556	4	6	4	4	0	0	0	3	0	3	1
	Subcuenca													
Pánuco	del Valle	18	205066	9	7	8	8	0	13	0	3	31	7	66
	de México													
	Subcuenca													
	del río	42	555762	25	30	30	17	0	87	62	12	59	38	13
	Tula													
Estado de México	Total	125	2235680	100.0	100.0	100.0	100	100	100	100	100	100	100.0	100

Elaboración propia.

Fuente: INEGI, 2005. Información estadística municipal de uso del suelo (<http://www.inegi.org.mx/>). OTV: otro tipo de vegetación, VS: vegetación secundaria, ASINV: áreas sin vegetación.

La expansión histórica del uso del suelo agropecuario ha causado cambios severos en la composición, estructura y funciones de las cubiertas vegetales, sin embargo, la falta

de alternativas de empleo, las restricciones para el aprovechamiento de los recursos forestales y la pobreza creciente, son las verdaderas causas de la deforestación, es así como la atención centrada en soluciones técnicas y económicas le confiere muy poco espacio a la solución de las causas subyacentes que producen el deterioro de los componentes bióticos y abióticos de los ecosistemas terrestres.

Los impactos ocasionados en los ecosistemas terrestres por la expansión de las actividades agropecuarias, el cambio de uso del suelo, el aprovechamiento directo de los recursos forestales, la tala ilegal y los incendios, son parte de una misma problemática socio-ambiental que cuestiona los alcances de la estrategia parcial de deforestación evitada que promueve el aprovechamiento de los bosques naturales y las plantaciones forestales comerciales mediante un manejo técnico y cultivo de los bosques y selvas.

DISCUSIÓN

El compromiso voluntario adquirido por México en el Protocolo de Kyoto para mitigar 51 Mt CO₂ en el año 2012,¹⁵ los impactos acumulados y las inercias socioculturales indican que el deterioro de los ecosistemas terrestres está en su punto más álgido, lo que aunado al incontrolable proceso de conversión de tierras forestales a los usos del suelo pecuario y el limitado alcance de las acciones de ordenación forestal, forestación, reforestación y rehabilitación de los bosques, configuran un escenario de usos y abusos incompatibles que reducen la capacidad de los bosques y las selvas para mantener los bienes y los servicios ambientales y la biodiversidad de un área determinada.

¹⁵ México contribuye con 1.6% de las emisiones de gases de efecto invernadero, ocupa la posición décimo tercera de los países emisores y las emisiones per cápita fueron de 6.2 t CO₂ en el año 2006 (SEMARNAT-INE, 2009).

La prioridad nacional de frenar la deforestación, controlar el aprovechamiento de los bosques y mitigar 9.9% de las emisiones de gases de efecto invernadero, han llevado al diseño de medidas ambientales que refuerzan la regulación, la restricción, la prohibición y las sanciones, en otro sentido, se promueven estrategias técnicas e incentivos económicos para conservar y preservar las cubiertas del suelo—planeación, ordenamiento ecológico, beneficios fiscales, subvenciones, pago por servicios ambientales, silvicultura comunitaria, gestión sostenible de los bosques, reforestación, conservación y rehabilitación de suelos, prevención y combate de los incendios forestales, inspección y vigilancia, fortalecimiento de las instancias ambientales y mecanismos de financiamiento (DOF-LGEEPA, 1988), pero las acciones ambientales avanzan lento y en contrasentido de la política agrícola que fomenta las actividades agrícolas y pecuarias para satisfacer las necesidades del mercado nacional e internacional (DOF-LDRS, 2003).

La degradación de tierras en su noción amplia está concebida como la disminución de la capacidad presente o futura de los suelos, de la vegetación o de los recursos hídricos, para sustentar vida vegetal, animal o humana (DOF-RLGDFS, 2005: 2), no obstante, el manejo y aprovechamiento de los recursos forestales se orienta a la ordenación de la actividad productiva de los recursos maderables mediante requisitos y procedimientos administrativos (DOF-LDFS, 2003) y las disposiciones agrarias promueven las actividades económicas propias del sector agrícola y pecuario, y aunque establecen medidas restrictivas para su desarrollo en las áreas naturales protegidas y en las tierras de uso común de los núcleos ejidales (DOF-LA, 1992), el aprovechamiento selectivo de los bosques maderables no se ha detenido y la sustitución del bosque por los pastizales es un fenómeno nacional. En estas condiciones el cambio de uso del suelo se aborda como un hecho consumado y las disposiciones que lo involucran se circunscriben a procedimientos técnicos para monitorearlo y las medidas de intervención para mitigarlo son selectivas y localizadas, y con poca repercusión nacional.

La escasa atención a los incendios forestales como causa de la combustión de biomasa aérea y superficial y fuente de emisión directa de GEI se aprecia en las desarticuladas disposiciones que rigen la utilización del fuego con fines agropecuarios y las medidas de control de la contaminación atmosférica y en el suelo. La Norma

Oficial Mexicana NOM-015 establece la regulación del uso del fuego en terrenos forestales y agropecuarios a través de la promoción de convenios y acuerdos para la programación de las quemas y la difusión de prácticas seguras (DO, 1999), y los impactos producidos por las quemas, la alteración de la sucesión ecológica e inhibición de la regeneración natural de los ecosistemas, apenas se menciona en la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. La regulación de la calidad del aire prescribe la concentración máxima permisible para la salud pública y la compatibilidad del uso de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, con el equilibrio de los ecosistemas y los efectos en la salud humana (DOF-LGEEPA, 1988). El reglamento de prevención y control de la contaminación de la atmósfera (DOF, 25-11-1988) establece que las emisiones de contaminantes, sean de fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas o controladas, en beneficio del bienestar de la población y el equilibrio ecológico, y nada se dice de otro tipo de fuentes, tal es el caso de los incendios forestales.¹⁶ En los últimos años el gobierno federal ha gastado un promedio anual de 300 millones de pesos (aproximadamente US \$ 28.57 millones, base 2005) en el combate a los incendios (Torres-Rojo *et al.*, 2007) y las acciones para cumplir los compromisos del Protocolo de Kyoto las ha sectorizado.¹⁷

En el sector forestal comandado por la Comisión Nacional Forestal (Conafor) prevalecen las estrategias de deforestación evitada: protección, conservación y

¹⁶ Las emisiones producidas por el uso del fuego corresponden a la categoría de agricultura, quemas programadas y quemas *in situ* de residuos agrícolas (SEMARNAT-INE, 2009). La combustión de residuos agrícolas produce la emisión de CO₂, CH₄ y N₂O, ceniza (minerales que no se incineran), humos condensados y otros productos de la combustión incompleta, si es poco el oxígeno disponible y la biomasa está húmeda, se produce el CO y hollín (carbono sin quemar). Las partículas de carbono absorben vapores orgánicos del humo y las sólidas pueden tener contaminantes dañinos para la salud (Quintero *et al.*, 2008).

¹⁷ 51 MTCO₂ en 2012: ingeniería civil y desechos 5.5 MT CO₂ e = 11%, infraestructura, generación de energía eléctrica, 5.5 MT CO₂ e = 36%, ingeniería civil-carreteras-uso de la energía. 11.9 MT CO₂ e = 23%, ingeniería agrícola, agricultura, bosques y otros usos del suelo. 15.3 MT CO₂ e = 30%. En este sector la reducción se desglosa de la siguiente manera: agricultura = 0.95 MT CO₂ e, ganadería = 0.91 MT CO₂ e, bosques = 9.96 MT CO₂ e, frontera forestal-agropecuaria. = 3.48 MT CO₂ e (Conafor-PEF, 2003).

manejo sustentable de los bosques y los suelos, y la meta de incrementar el potencial de los sumideros de carbono a través de la reforestación y la restauración de suelos forestales, plantaciones forestales, manejo forestal sustentable, revegetación y sustitución de los fogones tradicionales por estufas ahorradoras de leña. En el sector agrícola bajo la coordinación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA) se proyecta estabilizar la frontera forestal-agropecuaria a través de proyectos piloto de Reducción de Emisiones de Deforestación y Degradación Forestal (REDD) –Tema que quedó en la cartera de asuntos pendientes en la COP 16 realizada en Cancún, 2010– y la reducción de la incidencia de incendios forestales provocados por quemas agropecuarias, forestales y de otras fuentes (Conafor-PEF, 2003). A un año de cumplir con el compromiso de reducir las emisiones de GEI, la SAGARPA informó que el sector agrícola ha dejado de emitir 2.08 millones de toneladas de CO₂ (10.6% de la reducción de emisiones) (SAGARPA, 29/08/2010) quedan en proyecto las acciones estructurales de importancia vital para la mitigación: la reconversión productiva de tierras marginales a sistemas sustentables –En México las tierras marginales *representan el 80 % de las tierras bajo un uso agropecuario*–, reducir las emisiones de los fertilizantes –*El incremento de los rendimientos de maíz en los últimos años está en razón directa con el incremento del uso de agroquímicos*–, la labranza de conservación, aumento de la producción de biocombustibles y la recuperación de la cobertura vegetal en terrenos de pastoreo.

CONCLUSIONES

Los factores de presión directa –aprovechamiento forestal, tala ilegal, incendios forestales, plagas y cambios de uso del suelo– e indirecta –actividades agropecuarias– considerados en la óptica reactiva del sistema analítico PER, favorecen el análisis sincrónico del estado de los ecosistemas terrestres en un momento dado y lugar, pero no explican el proceso a través del cual se llegó a una situación dada, en este orden de ideas, la fuerza metodológica de los factores sociales, culturales, económicos y políticos, está precisamente en el ámbito de la explicación de los procesos que

desencadenan la degradación-deforestación de los ecosistemas terrestres en su dimensión espacio-temporal.

La degradación de los ecosistemas terrestres está determinada por los impactos de largo plazo ocasionados por las inercias socioculturales, económicas y políticas, y los sistemas y prácticas de aprovechamiento de los recursos naturales, agua, suelo y vegetación en los ámbitos local y regional. La interacción de la propiedad de la tierra, la pobreza, los conflictos agrarios, las necesidades sociales y los intereses económicos, han conducido a la implementación de prácticas de aprovechamiento de las cubiertas del suelo, que rebasan los límites permisibles de conservación y recuperación de los ecosistemas terrestres, y envuelven a las comunidades rurales en un círculo de pobreza social, económica y natural.

El estado de salud de los ecosistemas terrestres se relaciona en mayor o menor medida con la intervención humana que a través de los sistemas de explotación de la tierra incide en los ciclos de renovación natural en escalas locales y regionales, y se constituye en una línea de atención en la investigación sobre cambio climático.

El ciclo de la degradación-deforestación-cambio de uso del suelo (tierras forestales a tierras agrícolas y tierras forestales a praderas) genera emisiones de CO_2 , CH_4 y N_2O y otros gases por combustión (quemadas e incendios forestales), descomposición de biomasa y pérdida de carbono orgánico en el suelo, por lo tanto el estudio de las ganancias (tierras abandonadas, bosques manejados) y las emisiones producidas por las fuentes de área, abren una línea de trabajo multidisciplinaria que aportará información sobre las causas que desencadenan los procesos de degradación-deforestación-cambio de uso del suelo y los efectos directos e indirectos sobre el cambio climático.

Finalmente se rescatan algunos elementos que delinean la posibilidad de complementar metodologías de análisis general y específico que permitan abordar el proceso de degradación-deforestación-cambio de uso del suelo y su relación con el cambio climático

1. La conversión de las tierras forestales a tierras agrícolas y praderas, transforma el paisaje y las funciones del ecosistema original; los efectos se expresan en la reducción de la biomasa, pérdida de la biodiversidad, alteración del hábitat, erosión, cambios

en los regímenes de humedad de la vegetación y el suelo, y en la emisión GEI por descomposición de biomasa y por la pérdida de carbono orgánico en el suelo. En este contexto es fundamental evaluar las presiones sobre la tierra y comprender los determinantes que ocasionan la degradación-deforestación-cambio de uso del suelo, incluyendo los factores biofísicos, socioeconómicos y políticos que ocasionan el cambio.

2. Determinar los cambios de uso de suelo en un periodo dado por medio de las tecnologías de información geográfica y cartografía digital, con el objeto de obtener información sobre la tasa de deforestación en el tiempo, la pérdida anual de la superficie vegetal, el incremento anual de la superficie de otros usos del suelo, tendencias de la deforestación y la estimación de la emisión de GEI en el tiempo. Así como identificar la distribución de las fuentes de emisión de carbono y otros GEI que se relacionan con las áreas de vocación preferentemente forestal sometidas a procesos de degradación, deforestación y cambio de uso del suelo, y las áreas de captura o sumideros de carbono atmosférico se asocian a las áreas ocupadas de bosque primario, las áreas de regeneración natural y restauración de bosque.

3. Realizar la estimación de la biomasa a partir de la información reportada en la malla de puntos de muestreo del Inventario Nacional Forestal y de suelos (2009) y determinar el potencial de captura de carbono en su comparación con una tabla de equivalencias construida con los datos por defecto establecidos por el Panel Intergovernmental de Cambio Climático (IPCC) (Penman *et al.*, 2005) y los valores aportados por estudios específicos sobre los bosques naturales, bosques manejados y otras cubiertas vegetales.

4. Re muestrear puntos seleccionados de los inventarios nacional y estatal, y realizar la medición de biomasa aérea y en las raíces a través de variables dasométricas medidas en cuadrantes y utilizando ecuaciones alométricas, con el objeto de potenciar el almacenamiento de carbono en puntos específicos.

3. Estimar el carbono orgánico del suelo a través de muestreos en sitios seleccionados: suelos forestales, suelos sometidos a los usos agrícolas y pecuarios, tierras abandonadas, tierras deforestadas y degradadas.

6. Estimar las emisiones de gases de traza de la quema de la biomasa a partir de dos mediciones básicas: a) Biomasa consumida por el fuego, a partir del conocimiento

de la carga de combustible media presente en un determinado tipo de vegetación dentro de una zona ecológica particular, y el apropiado factor de combustión —La proporción de la carga potencial de combustible efectivamente quemada por el fuego—.

b) La cantidad de biomasa consumida por los incendios y el factor de emisión para una determinado gas, definido como la masa de gas (CO_2 , CO , CH_4 , NO_x , N_2O , etc.) liberada en la atmósfera por unidad de masa de combustible consumido (generalmente expresada en las unidades g kg^{-1} masa seca de combustible), o bien como la masa de carbono o nitrógeno desprendido en un gas particular por unidad de masa de carbono o nitrógeno liberado del combustible (Frost, 1998).

7. Modelar el balance de pérdidas y ganancias de los GEI derivado de la combustión y descomposición de biomasa aérea asociada a los procesos de conversión de bosques a otros usos y diseñar estrategias específicas de adaptación social y productiva al cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta-Mireles, Miguel Jesús Vargas-Hernández, Alejandro Velázquez-Martínez y Jorge D. Etchevers-Barra (2002), “Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México”, *Agrociencia* 36: 725-736.
- Aguirre-Salado, Carlos A., José R. Valdez-Lazalde, Gregorio Ángeles-Pérez, Héctor M. de los Santos-Posadas, Reija Haapanen, Alejandro I. (2009), “Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino *Patula* en Hidalgo”, *Agrociencia* 43, México, 209-220.
- Alonso P., F. (2003), “Land cover changes and impact of shrimp aquaculture on the landscape in the Ceuta coastal lagoon system, Sinaloa, Mexico”, *Ocean and Coastal Management*, no. 46, pp. 583-600.
- Barton Bray, David y Merino Pérez, Leticia (2004), *La experiencia de las comunidades forestales en México*, INE-Semarnat, México, pp. 1-271.
- Bocco, Gerardo, Manuel Mendoza, Omar R. Masera (2001), “La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de

- deforestación”, *Investigaciones Geográficas*, no. 44. Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 18–38.
- Brown Sandra, Ben de Jong, Gabriela Guerrero, Myrna Hall, Omar Masera, Walter Marzoli, Fernando Ruiz, David SOS (2003), *Modelación de la deforestación en México y sus implicaciones para los proyectos de captura de carbono*, reporte elaborado para la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Finalización de líneas base para proyectos de deforestación evitada, Sandra Brown (coordinadora del proyecto), Winrock Internacional, Arlington, USA: 1-58, 2003 mayo.
- Ceballos, Gerardo, Rurik List, Gloria Garduño, Rubén López Cano, María José Muñoz Cano, Enrique Collado (2008), *La diversidad biológica del Estado de México. Estudio de estado*, Biblioteca Mexiquense del Bicentenario. Colección Mayor, Gobierno del Estado de México-Secretaría del Medio Ambiente, México, pp. 501.
- Challenger, Antony (2004), “Los ecosistemas templados de México”, Seminario Desarrollo sustentable y ecosistemas templados de Durango, 6 de agosto, Dirección de la Reserva de la Biosfera La Michilía, Conanp, Semarnat, Durango, México.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp, 2005), Áreas Naturales de México, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Semarnat, México.
- Comisión Nacional Forestal (2009), *Inventario Nacional Forestal y de Suelos México 2004-2009. Una herramienta que da certeza a la planeación, evaluación y el desarrollo forestal de México*, Semarnat-Comisión Nacional Forestal, México.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor-PEFM) (2003), *Programa Estratégico Forestal para México 2025*, publicación especial de la Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco, México, 191 pp.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor) (2005), *Estadístico Anual de Incendios Forestales 1970-2003*, Coordinación General de Conservación y Restauración Forestal, Gerencia Nacional de Incendios Forestales, México, D.F.
- _____ (2006), *Desarrollo forestal sustentable en México. Avances 2001-2006*, publicación especial de la Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco, México.
- Comisión Nacional Forestal. Coordinación General de Conservación y Restauración Forestal. Gerencia Nacional de Incendios Forestales, *Estadístico Anual de Incendios Forestales 1970-2003*.

- De Jong, Ben y Miguel Ángel Castillo. Omar Masera, Alejandro Flamenco (2004), *Dinámica de cambio de uso del suelo y emisiones de carbono en el trópico húmedo de México. Informe final Selva Lacandona y el Ocote*, El Colegio de la Frontera Sur/Instituto de Ecología, UNAM-Campus Morelia, México, 1-33.
- Diario Oficial de la Federación (1992), *Ley Agraria*, publicada el 26 de febrero de 1992, presidencia de la República de los Estados Unidos Mexicanos, México, Secretaría de Gobernación, Dirección General de compilación y consulta del orden jurídico nacional <http://www.ordenjuridico.gob.mx/>, consulta 7 de septiembre, 2011.
- ____ (2001), *Ley de Desarrollo Rural Sustentable*, publicada el 7 de diciembre de 2001, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/>, consulta 7 de septiembre, 2011.
- ____ (2003), *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*, 25 de febrero de 2003, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Secretaría General, Secretaría de Servicios Parlamentarios, Dirección General de Bibliotecas, <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/>, consulta 7 de septiembre, 2011.
- (DOF), *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera*, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 25 de noviembre, 1988, reformado el 3 de junio, 2004.
- ____ (1999), Norma Oficial Mexicana NOM-015-Semarnat-Sagar-1997, regula el uso del fuego y el combate a los incendios forestales, 02-03-2009.
- ____ (1998), *Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, publicada el 28 de enero, presidencia de la República, Estados Unidos Mexicanos.
- ____ (2005), *Reglamento de la Ley de General de Desarrollo Forestal Sustentable*, Nuevo Reglamento DOF 21-02-2005, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Secretaría General, Secretaría de Servicios Parlamentarios. Dirección General de Bibliotecas, <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/>, consulta 7 de septiembre, 2011.
- Escandon Calderón, Jorge, Ben H. J. de Jong, Susana Ochoa Gaona, Ignacio March Mifsut Miguel Angel castillo (1999), "Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos Landsat TM en Jusnajib La Laguna, Chiapas, México: estudio de caso", *Investigaciones Geográficas, Boletín 40*, México, 71-84 pp.

- Estrada-Salvador, Ana Lucía y José Návar (2009), *Flujos de carbono por deforestación en la selva baja caducifolia del estado de Morelos*, México, XIII Congreso Forestal Mundial, Buenos Aires, Argentina, 18-23 al octubre 2009: 1-9.
- FAO (1992), *Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas*, Estudio de planificación de cuencas hidrográficas, Guía FAO conservación, no. 13/6. ONU, Roma, Italia: 3-143.
- Flores, Ernesto; Frías, Juan; Jurado, Pedro; Olalde, Víctor; Figueroa, Juan de Dios; Valdivia, Arturo; García, Edmundo (2007), Efecto del gatuño sobre la fertilidad del suelo y la biomasa herbácea en pastizales del centro de México, *TERRA Latinoamericana*, vol. 25, núm. 3, julio-septiembre, Universidad Autónoma de Chapingo, México, 311-319.
- Franco Mass Sergio, Héctor Hugo Regil García, Carlos González Esquivel, Gabino Nava Bernal (2006), “Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el periodo 1972-2000”, *Investigaciones Geográficas*, no. 61, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 38-57.
- Frost Peter, G.H. (1998), “Fire in Southern African Woodlands: Origins, Impacts, Effects and Control, Meeting on Public Policies Affecting Forest Fires”, *FAO Forestry paper 138, Rome 1998*, pp. 181.
- García Rubio, Gabriela *et al.* (2005), “Dinámica del uso del suelo en tres ejidos cercanos a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo”, *Investigaciones Geográficas*, boletín del Instituto de Geografía, UNAM, no. 58, Distrito Federal, México, pp. 122-139.
- Gobierno del Estado de México (2006), *Programa de Desarrollo Forestal Sustentable Estado de México 2005-2025*, Secretaría de Desarrollo Agropecuario-Protectora de Bosques, Toluca, México, 100 pp.
- _____ (2011), Iniciativa Cambio Climático (http://www.edomex.gob.mx/medioambiente/cambio_climatico), consulta febrero, 2011.
- Gobierno Federal-Semarnat (2010), Cambio climático. Encuentro Nacional de Porcicultura, Campeche México, septiembre de 2010.
- Gómez-Pompa, A. y R. Dirzo, (1995), *Las reservas de la Biosfera y otras áreas naturales protegidas de México*, Semarnap-Conabio, México, 159 pp.
- Instituto Nacional de Ecología (2000c), *Situación general existente en las comunidades agrarias con respecto al manejo de los recursos naturales*, pp. 1-25, www.ine.gob.mx/dgipea/descargas/ejido_conserv_3.pdf, consulta 1 de mayo 2008.

- ____ (1976), *Mapa de vegetación y uso de suelo* escala 1:200000, México.
- ____ (2000), *Mapa de vegetación y uso de suelo* escala 1:200000, México.
- ____ (2000b), *Indicadores para la evaluación del desempeño ambiental*, Reporte 2000, Semarnat, México, pp. 1-184.
- ____ (2006), *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002*, México.
- ____ (2002), Protocolo de Kioto, “Anexo A”, categorías y sectores de las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero, México, INE.
- Instituto Nacional de Ecología/ Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006), *Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*, INE, México, pp. 27- 209.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2005), *Información estadística municipal de uso del suelo*, <http://www.inegi.org.mx/>, consulta 11 de febrero, 2011.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática/Gobierno del Estado de México (INEGI-GEM, 1999), *Anuario Estadístico del Estado de México*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), www.ipcc.ch, http://www.ipcc.ch/meeting_documentation/meeting_documentation.shtml, consulta 13 de febrero, 2011.
- Inventario Nacional Forestal y suelo de México 2004-2009 (2009), *Una herramienta que da certeza a la planeación, evaluación y desarrollo forestal en México*, Comisión Nacional Forestal, Periférico Poniente 5360, Colonia San Juan de Ocotán, Zapopan Jalisco, México.
- Mendoza Manuel, Gerardo Bocco (2002), “Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán”, *Investigaciones Geográficas*, no. 49, Instituto de Geografía, UNAM, Distrito Federal, México, pp. 92-117.
- Ordóñez Díaz José A. Benjamín (1999), *Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán*, Semarnat-INE, México, D.F.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), (2006), *Global Forest Resources Assessment 2005, Main Report. Progress Towards Sustainable Forest Management*_FAO Forestry paper 147, Rome.

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2010, *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010*, Informe principal, Estudio FAO, Montes, número 163, Roma, pp. 381.
- Orozco Hernández, María Estela, Gabriela Gutiérrez Martínez, Javier Delgado Campos (2009), "Desarrollo Rural y deterioro del bosque en la región interestatal del Alto Lerma", *Economía, Sociedad y Territorio*, vol. IX, no. 30, mayo-agosto de 2009, El Colegio Mexiquense, Toluca, México, pp. 435-472.
- Penman, Jim, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendía, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabián Wagner (2005), *Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura* (UTCUTS), Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), Programa del IPCC sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Organización Meteorológica Mundial (OMM), Suiza, pp. 1.5-1.11.
- Pineda Jaimes, Noel Bonfilio, Bosque Sendra, Joaquín, Gómez Delgado, Montserrat (2008), "Cambios de la ocupación del suelo y análisis de transiciones sistemáticas en el Estado de México (México), mediante Tecnologías de la Información Geográfica", *XI Coloquio Ibérico de Geografía*, Alcalá de Henares, España. Disponible en: http://www.geogra.uah.es/Inicio/web_11_cig/cdXICIG/index.html.
- Poder Ejecutivo Federal (PEF) (2009), *Programa Especial de Cambio Climático, 2009-2012*, CICC, México.
- Quintero Núñez, Margarito, Andrés Moncada Aguilar (2008), "Contaminación y control de las quemadas agrícolas en Imperial, California, y Mexicali, Baja California", *Región y Sociedad*, septiembre-diciembre, año/vol. XX, número 043, El Colegio de Sonora, México, pp. 3-24.
- Ramírez Ramírez, Isabel (2001), "Cambios en la cubierta del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-2000", *Investigaciones Geográficas*, boletín del Instituto de Geografía, UNAM, no. 45, Distrito Federal, México, pp. 39-55.
- Ramírez, M. I. y R. Zubieta (2005), *Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca*, reporte técnico preparado para el Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca, México.
- Rodríguez Laguna, Rodrigo, Javier Jiménez Pérez, Óscar A. Aguirre Calderón, Eduardo J. Treviño Garza y Ramón Razo Zárate (2009), Estimación de carbono almacenado en

- el bosque de pino-encino en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México”, *Ra Ximhai*, septiembre-diciembre, año/vol. 5, no. 3, Universidad Autónoma Indígena de México Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa, pp. 317-327.
- S .P. P. (1985), *Antología de la Planeación en México, 1917-1985*, “Los primeros intentos de planeación en México 1917-1946”, no. 1, FCE, México, 1985, 27.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa), *Disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero en el campo*, comunicado de prensa, no. 378/10, México, D.F., 29 de agosto de 2010.
- Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Protectora de Bosques (2006), *Programa de Desarrollo Forestal Sustentable Estado de México 2005-2025*, Toluca, Estado de México, pp. 100.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006a), *Inventario Nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2002*, Instituto Nacional de Ecología INE, México, pp. 258.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/ Instituto Nacional de Ecología (2006b), México, *Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*, INE, México, pp. 27-209
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales (Semarnat, 2003), *Compendio de estadísticas ambientales*, 2002, México, D.F.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales- Instituto Nacional de Ecología (Semarnat- INE, 2009), *Cuarta Comunicación Nacional ante la CMNUCC*, Semarnat, México.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca-Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Informe de la situación general en materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente 1995-1996/Estadísticas del Medio Ambiente 1997*, INEGI, México, 1998.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap, 2000a), *Guía forestal*, Subsecretaría de Recursos Naturales, Dirección General Forestal-Semarnap, México, D.F., pp. 150.
- Secretaría de Medio Ambiente, Gobierno del Estado de México, Iniciativa Cambio Climático (http://www.edomex.gob.mx/medioambiente/cambio_climatico)
- Semarnap (1998), *Información estadística de incendios en áreas forestales por entidad federativa: Informe final*, México, pp. 135.

- Semarnat, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2002), *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero*, Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- Torres-Rojo, Juan M., Octavio S. Magaña-Torres y Grodecz A. Ramírez-Fuentes (2007), “Índice de peligro de incendios forestales de largo plazo”, *Agrociencia*, no. 41, México, pp. 663-674.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2008), *Informe del taller sobre las cuestiones metodológicas relacionadas con la reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación de los bosques en los países en desarrollo*, Convención Marco sobre el Cambio Climático, Universidad de las Naciones Unidas en Tokio (Japón) del 25 al 27 de junio de 2008, FCCC/SBSTA/2008/11, pp. 1-18.
- Ute Häsler (2010), “Jugar con fuego. Por qué los incendios forestales recalientan la ciencia”, *Geomax. Curiosos por las ciencias*, no.3, Sociedad Max-Planck, Manchen, Alemania: 4.
- Velázquez, A. Mas y Palacio (2002), *Análisis del cambio del uso del suelo; mapas del análisis del cambio de uso del suelo*. INE (Semarnat) - IGg (UNAM), México, Disponible en: http://www.ine.gob.mx/dgoece/xid/dgioece/i_usv/

EL CLIMA Y LA DEGRADACIÓN DEL SUELO EN UNA ZONA SEMIÁRIDA TROPICAL DE MÉXICO

María Engracia Hernández Cerda¹,

Germán Carrasco Anaya²,

Gloria Alfaro Sánchez¹

*¹Instituto de Geografía, ² Escuela Nacional Preparatoria,
Universidad Nacional Autónoma de México*

RESUMEN

La región semiárida tropical, del valle de Tehuacán-Cuicatlán, localizada entre los estados de Puebla y Oaxaca, es considerada uno de los centros más importantes de riqueza biológica en el mundo, donde las comunidades han transformado grandes áreas con cultivos. Con base en la definición de desertificación: degradación de la tierra en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultado de varios factores como variaciones climáticas y actividades humanas, el trabajo establece el estado de la degradación del suelo en áreas con estos climas y con agricultura de esta zona. Se utilizaron tres cartas: climas, evaluación de la degradación del suelo y edafológica. Se obtuvo que la erosión química afecta más del 50% de la superficie en zonas áridas y muy áridas, con un nivel de afectación ligero en más del 75% del área y en más del

50% del área agrícola en semiáridos y áridos. El grado de afectación es extremo.

Palabras clave: degradación, suelos, valle Tehuacán-Cuicatlán.

CLIMATE AND SOIL DEGRADATION IN A TROPICAL SEMIARID ZONE OF MEXICO

ABSTRACT

The tropical semiarid region of Tehuacán-Cuicatlán valley, located between the states of Puebla and Oaxaca, is considered one of the most important centers of biological richness in the world, where communities have transformed large areas of crops. Based on the definition of desertification, land degradation in arid, semiarid and dry subhumid areas resulting from various factors including climatic variations and human activities; this work established the state of soil degradation in areas with dry climates and agriculture of this area. We used three maps: climates, assessment of land degradation and soils. It was found that the chemical erosion affects 50% of the surface in arid and very arid, with a slight level of affectation in more than 75% of the area and more than 50% of agricultural area in semi-arid and arid the degree of affectation is extreme.

Key words: land degradation, soils, Tehuacan-Cuicatlán valley.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los ecosistemas de tierras secas presentan una presión creciente en cuanto al suministro de servicios como la alimentación, el forraje, el combustible, los materiales de construcción y el agua, que es necesaria para el hombre, el ganado, el riego y la salud, entre otros aspectos. Esta demanda se atribuye a una combinación de factores humanos (como la presión demográfica y el modelo de uso del suelo) y climáticos (como las sequías). Aunque la interacción de dichos factores a escala mundial y regional es compleja, es posible entenderla en la escala local.

Aproximadamente entre 10 y 20% de las tierras secas a nivel mundial, se encuentran ya degradadas y, de no tomarse medidas al respecto, la desertificación pondrá en peligro futuros avances en el bienestar humano y posiblemente hará perder la prosperidad ganada en algunas regiones. Por todo ello, la desertificación en el presente es uno de los mayores desafíos medioambientales y un obstáculo de primer orden a la hora de satisfacer las necesidades básicas del hombre en las tierras secas. Con base en estas consideraciones se planteó como objetivo de este trabajo establecer el estado actual de la degradación del suelo en las áreas con clima muy árido, árido, semiárido y subhúmedo seco del valle de Tehuacán-Cuicatlán así como en las superficies donde se desarrolla la agricultura.

ANTECEDENTES

La sequía severa y prolongada que se presentó en la zona más seca del norte de África y que incluía la región semidesértica contigua a ella, inició en 1968 y continuó hasta las décadas de los años setenta y ochenta con variaciones tanto en intensidad como temporalidad, ocasionó afectaciones en los aspectos físicos, sociales y económicos, y dio lugar a la Conferencia sobre Desertificación de las Naciones Unidas (UNCOD) realizada en Nairobi en 1977, donde fue adoptado el Plan de Acción de Combate a la Desertificación (PACD).

En 1992 se realizó la Conferencia del medio Ambiente y desarrollo de las Naciones Unidas (UNCED) en Río de Janeiro, de aquí se crea el Comité de Negociación Intergubernamental (INCD) para preparar una Convención para Combatir la Desertificación en aquellos países que experimenten serias sequías y/o desertificación, en particular en África.

Esta Convención fue adoptada en París el 17 de junio de 1994 y puesta a disposición de las naciones del mundo para su firma a partir del 14 de octubre de 1994 y ratificada el 26 de diciembre de 1996 por 50 países. La Convención adoptó la definición de 1992 sobre desertificación que la considera como degradación de la tierra en zonas áridas y semiáridas y subhúmedas secas, resultado de varios factores,

donde se incluyen tanto las variaciones climáticas como las actividades humanas (Balling and Martin, 1996).

Aunque el término sequía no es mencionado en la definición se sabe que es uno de los factores más significativos que contribuyen a la degradación del suelo en las regiones áridas. Sin embargo, las actividades humanas son la principal causa de este proceso (Dregne, 2000).

El ejemplo más conocido de la relación entre sequía y desertificación es el problema de la rigurosa sequía que sufrieron los países que forman la denominada franja del Sahel, en África, que se presentó desde 1968 hasta 1974.

La desertificación de la sabana africana se atribuye al gran incremento de la población y del ganado. Los administradores europeos de las colonias africanas favorecieron al aumento de habitantes con el suministro de alimentos en los periodos de hambre, reduciendo la mortandad por enfermedades y por el descubrimiento de las aguas freáticas para la irrigación de los cultivos y para abreviar el ganado. Con cada nueva sequía se realizaba un mayor impacto en la vegetación y en el suelo debido al consiguiente incremento poblacional con que venía acompañada. Finalmente, la degradación terrestre fue demasiado severa como para permitir una recuperación de la cobertura vegetal en la estación lluviosa o en los periodos más húmedos o con fuertes lluvias estacionales. De este modo, la desertificación con un tiempo prolongado de sequía y la presión demográfica va adquiriendo visos de permanencia y toma un aspecto externo de cambio hacia un clima desértico. (Dregne, 2000)

Las estadísticas reportan que la desertificación afecta aproximadamente a la sexta parte de la población mundial; al 70% de todas las tierras secas (equivalente a 3 600 millones de hectáreas) y al 30% de la superficie total de tierras del mundo.

Los procesos erosivos provocan la pérdida de tierra agrícola por alrededor de 6 a 7 millones de hectáreas por año, registrándose una pérdida adicional anual de 1,5 millones de hectáreas como resultado de inundaciones, salinización y alcalinización.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO) estima que en América Latina y El Caribe existen alrededor de 250 millones de hectáreas de

tierras degradadas, siendo las principales causas el crecimiento del proceso erosivo, la deforestación, actividades agrícolas no sustentables, sobrepastoreo y sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico.

En América del Sur, 170 millones de hectáreas han sido degradadas debido a la deforestación y sobrepastoreo, por otra parte; en el Caribe, la urbanización acelerada y mal planificada ha provocado la pérdida de tierras para uso agrícola, protección de cuencas y conservación de la biodiversidad (Dregne, 2000).

La falta de protección ambiental a menudo conduce a decisiones inadecuadas para la explotación de tierras. El uso excesivo de las tierras puede deberse a circunstancias económicas, o a legislaciones y prácticas territoriales inadecuadas. Quizás la pobreza no deje otra alternativa que extraer lo que pueden de los escasos recursos de que disponen, aunque ello implique degradar las tierras.

PROCESOS DE LA DESERTIFICACIÓN

Existen siete procesos que son responsables de la desertificación, los cuatro primeros son considerados procesos primarios de desertificación, llamados así porque sus efectos son amplios y tienen un impacto muy significativo sobre la producción de la tierra y los tres restantes se conocen como secundarios.

Los procesos primarios son:

Degradación de la cubierta vegetal (deforestación): esto se refiere a la remoción o destrucción de la vegetación existente en un área determinada.

Erosión hídrica: es el proceso de remoción del suelo, principalmente la capa arable del mismo, por la acción del agua. El proceso de erosión hídrica se acelera cuando el ecosistema es perturbado por actividades humanas tales como la deforestación y/o el cambio de uso del suelo (explotación agrícola, pecuaria, forestal, vías de comunicación, asentamientos humanos, entre otros).

Erosión eólica: desprendimiento y arrastre de las partículas del suelo ocasionados por el viento. Este tipo de erosión en las zonas áridas y semiáridas se debe, principalmente, al sobrepastoreo que destruye o altera a la vegetación natural, a la tala inmoderada y a las prácticas agrícolas inadecuadas.

Salinización: deterioro de los suelos por el incremento en el nivel de sales solubles que reduce su capacidad productiva. Generalmente se da cuando existe un desbalance hídrico y salino que favorece la concentración de las sales.

Los procesos secundarios son:

Reducción de la materia orgánica del suelo: proceso causado indirectamente a causa de la pérdida de la vegetación, la cual provee de los nutrientes orgánicos del suelo.

Encostramiento y compactación del suelo: este fenómeno es consecuencia de los procesos primarios, así como cuando hay escasez de materia orgánica, suelos ricos en limo y arcilla, y se realiza una constante utilización de maquinaria agrícola o sobrepastoreo.

Concentración de sustancias tóxicas y pérdidas de bases: en este proceso se consideran todos los diferentes tóxicos de la concentración de sales derivada de la actividad industrial.

CONSECUENCIAS DE LA DESERTIFICACIÓN

La degradación de suelos puede ocurrir en cualquier ecosistema, pero cuando se presenta en zonas secas se califica como desertificación, y es en estas áreas donde el problema es más grave, ya que provoca alteraciones en su nivel de fertilidad y, consecuentemente, en su capacidad de sostener una agricultura productiva.

Por otro lado, en la actualidad las zonas áridas y semiáridas de México constituyen un mosaico pluriétnico con más de 20 grupos indígenas, cuya subsistencia depende de actividades tales como la agricultura, en muchos casos dirigida al autoconsumo,

el pastoreo extensivo de cabras y vacunos, así como la recolección de plantas silvestres. Junto a esta economía campesina tradicional se desarrollan en estas zonas áridas, importantes polos de desarrollo agroindustrial y pecuario. Todos estos procesos productivos constituyen la base de la subsistencia de muchas comunidades campesinas e importantes piezas para el desarrollo económico regional y nacional. Sin embargo, existen hoy en día graves problemas ambientales como resultado de un desenvolvimiento defectuoso de los procesos de uso y manejo de los recursos naturales que ponen en riesgo la integridad del gran reservorio de diversidad biológica y cultural, así como la base material para el sostenimiento de los procesos productivos (Valiente-Banuet *et al.*, 1995).

Estos procesos de deterioro que en su conjunto han sido integrados dentro del concepto de desertificación, constituyen una de las problemáticas más grandes de los países de América Latina.

En general, se dice que la desertificación disminuye la resistencia de las tierras ante la variabilidad climática natural. El suelo y la mayoría de los elementos de las tierras secas, en general, son resistentes, logran recuperarse después de sufrir perturbaciones climáticas y efectos provocados por el hombre. Sin embargo, cuando las tierras se degradan, esta capacidad de recuperación se reduce sustancialmente, lo que conlleva repercusiones físicas y socioeconómicas. El suelo se vuelve menos productivo, la vegetación se deteriora. La degradación de tierras puede ocasionar inundaciones aguas abajo, disminuir la calidad del agua y aumentar la sedimentación en ríos y lagos, y la deposición de lodos en pantanos y vías de navegación. Puede asimismo, provocar tempestades de polvo y contaminar el aire, lo que a su vez daña las máquinas, reduce la visibilidad, aumenta los depósitos de sedimentos indeseables y ocasiona presiones sobre el suelo. Las ráfagas de polvo también pueden empeorar los problemas de salud, como las infecciones oculares, enfermedades respiratorias y alergias.

Si no se detiene o revierte la desertificación, la producción de alimentos en muchas áreas afectadas disminuirá, lo que puede causar malnutrición y hambrunas. La desertificación conlleva enormes costos sociales, hay una creciente percepción de los vínculos que existen entre la desertificación, los desplazamientos civiles y

los conflictos. En África, muchas personas han debido desplazarse internamente o emigrar a otros países a causa de la guerra, la sequía o la degradación de tierras. Los recursos naturales en las ciudades y sus alrededores, y en los campamentos de refugiados, sufren una intensa presión. Las difíciles condiciones de vida y la pérdida de identidad cultural socavan aún más la estabilidad social.

La degradación de tierras también afecta la cantidad y calidad de los abastecimientos de agua dulce. La sequía y la desertificación están asociadas con la disminución de los niveles hídricos de ríos, lagos, y capas acuíferas, por ejemplo, las prácticas de riego no sostenibles pueden secar los ríos que desembocan en los grandes lagos; así, los volúmenes del Mar de Aral y el Lago de Chad se han reducido en forma espectacular. Es asimismo, una fuente mayor de la contaminación de los océanos desde tierra firme, ya que los sedimentos y aguas contaminados se vierten en los ríos principales.

La acumulación de sustancias tóxicas para las plantas o los animales es causada por el uso excesivo de fertilizantes y métodos químicos de control de plagas, los cuales envenenan el suelo provocando la pérdida de la cubierta vegetal, y por consecuencia de los otros procesos.

La desertificación es un problema complejo, con múltiples causas y consecuencias, no existen soluciones fáciles. La lucha contra la desertificación debe, en efecto, abarcar múltiples soluciones encaminadas al manejo adecuado de los recursos naturales en zonas desertificadas; al reemplazo de la leña como combustible doméstico, mediante la introducción de tecnologías apropiadas; a la creación de fuentes de ingreso o actividades productivas alternativas para las poblaciones afectadas; la aplicación de programas de reforestación, de manejo adecuado del ganado, particularmente caprino; y de sensibilización y educación, entre muchos otros aspectos.

En México, se reúnen muchas de las causas naturales que favorecen la degradación del suelo, el problema principal es la falta de conciencia del hombre que con sus diversas actividades empobrece a los ecosistemas hasta convertirlos en sitios improductivos, erosionados y contaminados entre otras situaciones por el uso y manejo inadecuado de los recursos.

México cuenta con una diversidad de ecosistemas donde se observan asociaciones biológicas que han sido modificadas por un cambio en el uso diferente de su vocación, lo que provoca la degradación de los ecosistemas y por consecuencia del suelo.

Ortiz, Solorio, Ma. de la Luz *et al.* (1995), indican que de acuerdo con el Censo Agrícola ejidal de 1960, en México había 150 millones de hectáreas con problemas de degradación del suelo, lo que representa casi 80% de la superficie del país. Se estima que el deterioro avanza de 100 000 a 200 000 ha/año, lo que indica que la superficie agrícola disminuye a causa de los procesos de degradación.

Una característica de México es el predominio de paisajes montañosos, donde es vital que se mantenga el bosque para contribuir al desarrollo normal del ciclo del agua y por consiguiente se aseguren las condiciones de fertilidad de las partes bajas y planas. El inadecuado manejo de los recursos forestales ha llevado al país a una crisis ecológica, lo que favorece la erosión masiva del suelo. Las áreas agrícolas de temporal en México coinciden con suelos donde las condiciones topográficas no son propicias para dicha actividad.

En el 2002, 72.58% del país aún estaba cubierto por comunidades naturales en diferentes grados de alteración; el porcentaje restante había sido convertido a terrenos agrícolas, ganaderos, urbanos y otras cubiertas modificadas por el hombre. El hecho de que casi tres cuartas partes del territorio nacional aún conservaran vegetación natural no significa que permanecieran inalteradas. Según esta misma evaluación, sólo 50.8% del territorio nacional (70% de la vegetación remanente) conservaba vegetación primaria (es decir, que no presenta perturbación importante), siendo las selvas las que habían experimentado la perturbación más extensiva, ya que sólo 35% de éstas (en superficie) se mantenían como selvas primarias (Semarnat, 2005).

En el estudio de degradación del suelo en México, Estrada Berg (1991) concluye que la degradación abarca 95% de la superficie del territorio y el proceso más intenso es la pérdida de la materia orgánica con un 80%, seguido por la degradación hídrica que afecta al 60% del país y en menor porcentaje efectos por pérdida de bases por lixiviación y el ensalitramiento.

Ortiz Solorio *et al.* (1995) hacen una estimación de la degradación en cuatro categorías (ligera, moderada, severa y muy severa), lo que refleja que todos los estados de la república sufren deterioro en su territorio; destacan Tabasco 85%, Jalisco y Colima 75%, Michoacán y Campeche 70%, Aguascalientes y Veracruz 55%, Quintana Roo 60% en grado muy severo. Estos mismos autores consideran que el deterioro avanza de 100 000 a 200 000 ha/año, lo que indica que la superficie agrícola disminuye a causa de los procesos de degradación.

En 1999, en la memoria del Mapa de la evaluación de la degradación del suelo, escala 1:1000 000 (Semarnat – CP, 2001-2002), se reporta que 64% de los suelos del país presentan problemas de degradación en diferentes niveles, 13% corresponden a terrenos de desiertos, terrenos rocosos o zonas abandonadas improductivas, y tan sólo 23% del territorio nacional cuenta con suelos que mantienen actividades productivas sustentables (sin degradación aparente).

El proceso más importante de degradación de suelo que se obtuvo, fue la erosión hídrica, cuya superficie afectada es de 37%, le siguen la erosión eólica, que afecta al 15% de la superficie nacional, principalmente en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas y la degradación química (salinización y contaminación por desechos urbanos e industriales), que se encuentran principalmente en las zonas agrícolas.

Otro antecedente importante de mencionar es el trabajo de la Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación (Oropeza, 2004), en donde se plantea que no solamente las zonas áridas son vulnerables a la degradación del suelo, sino que prácticamente todo el país (96.9%) es susceptible de ser afectado por uno o varios procesos de degradación de tierras en grado alto (48%) y moderado (48.9%).

La más reciente evaluación oficial muestra que los suelos afectados por algún tipo de degradación, representan 45% del área total del país; de esta superficie 5% presenta un deterioro severo o extremo y 95% queda ubicado dentro de los márgenes de ligero a moderado (Semarnat, 2006).

Para combatir la degradación de tierras y la desertificación en México, se han elaborado planes y constituido organismos como el de la Comisión Nacional de las Zonas Áridas, Conaza, creada en diciembre de 1970 y sectorizada a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa).

Es una institución técnica especializada en la planeación, regulación, dirección y diseño de las políticas y programas orientados a frenar la desertificación mediante el uso, manejo y conservación del suelo, el agua y la cubierta vegetal en tierras frágiles, con un enfoque preventivo y productivo.

Entre las actividades realizadas por la Conaza, está un documento guía llamado Plan de Acción para el Combate a la Desertificación (1994). Se realizaron talleres en donde participaron 32 instituciones y del cual resultó un libro en donde se incluye un mapa de desertificación y se plantean algunos programas del plan de acción.

Este plan si bien orienta de manera general las acciones, requiere ser actualizado de acuerdo con los avances en diagnóstico, marco jurídico e institucional y participación social. El reto de actualizar el plan de acción incluye además mecanismos y compromisos claros para la elaboración y operación de programas y proyectos, así como ampliar el concepto de degradación de suelos en el ámbito de su aplicación. En 1997 surge la Red Mexicana de Esfuerzos contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales (RIOD-Méx) que agrupa a 46 organizaciones no gubernamentales, organizaciones de productores y representantes del sector académico, quienes en un esquema de corresponsabilidad entre el gobierno y la sociedad están realizando diferentes acciones orientadas a lograr una mayor conciencia social sobre la gravedad del problema de la degradación de tierras, así como hacia el fortalecimiento de las capacidades locales y regionales para enfrentar esta problemática y sus efectos (Semarnat, 2011).

ZONA DE ESTUDIO

El valle de Tehuacán-Cuicatlán se localiza en el centro sur del país, aproximadamente a 180 km al sureste de la ciudad de México. Abarca el extremo sureste del estado de Puebla y noroeste del estado de Oaxaca, entre los 17° 39' y 18° 53' de latitud norte y los 96° 55' y 97° 44' de longitud oeste (Dávila *et al.*, 2002). La orientación general del valle es nor-noroeste a sur-sureste: El extremo noroeste es una extensión meridional

de la Meseta de Anáhuac; aquí el valle es amplio y con mayor altitud, en cambio, en el extremo sur se presenta más estrecho y con menor altitud, esto se debe a la presencia de una serie de escalonamientos que originan un gradiente descendente de norte a sur (figura 1).

Figura 1
LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO



Elaboración propia.

Al norte el valle se encuentra limitado por el Pico de Orizaba con altitudes mayores a 4 000 m y al este es bordeado por las estribaciones de la Sierra Madre Oriental que reciben los nombres de Sierra Zongolica con altitudes de más de 3000 m y sierra Mazateca al sureste, la cual alcanza de 2 500 a 3 000 msnm, al sur y oeste se localizan la sierra de Zapotitlán y otras cordilleras que pertenecen a la Mixteca Alta o sierra Mixteca. Estas montañas tienen una elevación máxima de 2 500 m.

El clima está determinado por los patrones generales de circulación de la atmósfera, con vientos del este (alisios) durante el verano y vientos del oeste en invierno; y en ocasiones, durante la época invernal los vientos polares (nortes) provocan precipitaciones en las partes más altas de las montañas y descensos térmicos en el norte del valle. Otro factor regulador del clima, muy importante en la región, es la topografía accidentada del centro sur de México (Byers, 1967). La principal barrera a la llegada de la precipitación al valle es la sierra de Zongolica localizada al este, es decir, la aridez en la zona de estudio es originada principalmente por efectos orográficos que de acuerdo con Cloudsley-Thompson (1979), García (1965), entre otros, son denominados desiertos por sombra pluviométrica.

El valle comprende zonas con diferentes climas, desde cálidos a templados y desde muy áridos a semiáridos y subhúmedos secos (García, 1997), aunque en general comparten otras características como son un régimen de lluvias de verano, un bajo porcentaje de lluvia invernal, poca oscilación térmica anual y canícula. Desde el punto de vista climático, el valle es una entidad heterogénea.

Dentro de la zona se encuentra una red hidrológica formada al norte por el río Salado y al sur por los ríos Tomellín, de las Vueltas y Grande. Todas las corrientes confluyen en la parte más baja del valle cerca de Quiotepec para formar el río Quiotepec o Santo Domingo, que corta la Sierra Madre Oriental y vierte sus aguas en el río Papaloapan.

El aislamiento en el que se encuentra el valle de Tehuacán-Cuicatlán, hace que se presente una gran diversidad y endemismo de plantas. Esta zona se caracteriza por su gran riqueza de formas de vida silvestres en donde sobresale la alta concentración de especies endémicas de flora, sobre todo de plantas vasculares tales como compuestas, cactáceas, leguminosas, bromeliáceas y crasuláceas.

Estudios realizados por el Herbario Nacional del Instituto de Biología de la UNAM (Dávila *et al.*, 1993) reportan un total de 2 750 especies de plantas con flores (lo cual constituye más del 1% de la flora mundial) que representa entre 10 y 11.4% de la flora mexicana (Dávila *et al.*, 2002). Se estima que 365 son especies endémicas que representan 13.9% de esta flora. De hecho, el valle mantiene un número mayor de especies de las que es posible encontrar en grandes desiertos de México, como

el sonorense. En particular, sobresale el grupo de las cactáceas columnares cuyo número de especies se estima en 45 de un total de 70 reconocidas para el país, las cuales llegan a formar bosques con densidades de hasta 1 800 individuos por hectárea (Valiente-Banuet *et al.*, 1995). Respecto a la fauna, la información es menos amplia en comparación a las plantas, sin embargo en un estudio realizado por Dávila *et al.* (2002), se menciona que el Valle posee 11 especies de anfibios, 48 de reptiles y 91 de aves que sobrepasa la diversidad encontrada en otras zonas secas del mundo. En cuanto a los mamíferos de la región los datos son más escasos, excepto para los murciélagos, de los cuales se han reportado 31 especies (Valiente-Banuet *et al.*, 1995). Tocante al uso de la flora, este estudio revela que 815 especies son utilizadas por la gente de la zona. Por ello el 18 de septiembre de 1998 se decreta dentro del valle de Tehuacán-Cuicatlán, la reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán con una superficie total de 490 186 hectáreas con la finalidad de mantener su integridad ecológica, ambiental y cultural.

Predomina la vegetación de selva baja caducifolia en el valle y bosque de encino en las partes altas. Al norte se presenta una gran diversidad de vegetación, predominando la de matorral desértico rosetófilo rodeado de fragmentos de agricultura de riego y de temporal y algunas porciones de matorral crasicaule.

El valle de Tehuacán-Cuicatlán ha estado poblado desde tiempos ancestrales, investigaciones antropológicas han encontrado vestigios humanos de 7 000 a.C. (MacNeish, 1972). Estos hallazgos han contribuido enormemente a entender los procesos del origen y expansión del cultivo de plantas y la domesticación del maíz (*Zea mays*), el mismo que llevó al sedentarismo, desarrollo de la cultura y establecimiento de las civilizaciones. En esta zona se asienta un total de siete grupos indígenas, que dependen de los recursos naturales de la región para su subsistencia.

El valle de Tehuacán ha sido irrigado por cerca de 2 000 años. Las comunidades locales han transformado grandes áreas por medio de sistemas de irrigación de cultivos extensivos. Las tecnologías de captura de agua incluyen no sólo el uso de aguas superficiales en una larga red de canales, sino también el uso de túneles o galerías para obtener el recurso de los mantos acuíferos (Enge y Whiteford, 1989).

La agricultura en el valle de Tehuacán es de dos tipos: una se realiza en las zonas altas de encino-pino que rodean las montañas sobre los 1 800 m y la otra se realiza como agricultura intensiva del valle en las áreas aluviales de los cañones y ríos. Los cultivos que se cosechan son: maíz, haba, calabaza, tomate, chicharo, pimienta, caña de azúcar, alfalfa, piña, limón, melón, ajo y sorgo.

SUELOS

Los suelos del valle, a pesar de ser originados del mismo tipo de roca madre y similares procesos de intemperización, son de diferente tipo. Su formación depende de factores bióticos y abióticos (drenaje, pendiente, temperatura, precipitación, descomposición de la vegetación y la actividad de los microorganismos). Se reconocen ocho unidades en el valle: vertisoles, cambisoles, rendzinas, feozem, xerosoles, regosoles, litosoles y acrisoles.

Los suelos con escaso desarrollo dominan la superficie del valle, debido al relieve montañoso, son regosoles y litosoles en laderas con pendientes mayores a 8° de las tierras altas de Oaxaca y en las sierras Mazateca y de Juárez. En la planicie existe una gran diversidad de afloramientos geológicos con diferente tipo de roca y los suelos son someros, pedregosos, halomórficos con diferente alcalinidad y salinidad (cambisoles y xerosoles cálcicos); en el valle son calcáreos, salino-calcáreos, yesosos y calcáreo-yesosos típicos de zonas áridas, halomórficos con diferente salinidad y alcalinidad (Aguilera, 1970, Téllez *et al.*, 2008).

A continuación se describen las principales unidades de suelos presentes en la zona de estudio (INEGI, 1995, FAO-UNESCO, 1990, 2006):

Andosoles. Suelos que presentan propiedades ándicas hasta una profundidad de 35 cm como mínimo desde la superficie y tienen un horizonte A mollico o úmbrico, posiblemente por encima de un horizonte B cámbico, o un horizonte A ócrico; sin otros horizontes de diagnóstico. Carecen de propiedades gleicas en una profundidad de 50 cm a partir de la superficie; carecen de las características que son diagnósticas para los vertisoles y de propiedades sálicas.

Se usan en la agricultura con rendimientos bajos, también se usan con pastos naturales o inducidos para ganado ovino, su vocación natural es forestal y es la forma como menos se destruyen.

En condiciones naturales soportan vegetación de bosque de pino, encino, abeto, en zonas tropicales con vegetación de selva, además de ser muy susceptibles a la erosión.

Calcisoles. Del latín *calx*, cal; conotativo de acumulación de carbonato cálcico. Son suelos que se localizan en las zonas áridas y semiáridas. Su vegetación natural es de matorrales y pastizales.

Se caracterizan por tener un horizonte gypico; un horizonte cálcico, un horizonte petrocálcico o concentraciones de caliza pulverulenta blanda dentro de una profundidad de 125 cm a partir de la superficie; sin otros horizontes de diagnóstico que un A ócrico o un horizonte B cámbico o un horizonte B árgico calcareo, carecen de características que son diagnósticas para vertisoles, planosoles; de propiedades sálicas y de las propiedades gleicas en una profundidad de 100 cm a partir de la superficie.

Su utilización agrícola está restringida, la mayoría de las ocasiones, a las zonas con agua de riego donde su productividad puede ser alta debido a la alta fertilidad de estos suelos. La agricultura de temporal es insegura y de bajos rendimientos.

El uso pecuario también puede ser importante en estos suelos, sobre todo en la cría de ganado bovino, ovino y caprino con rendimientos variables en función de la vegetación.

Los calcisoles son suelos de baja susceptibilidad a la erosión, es alta cuando están en pendientes y sobre caliche o tepetate.

Cambisol. Estos suelos son jóvenes y poco desarrollados, en el subsuelo presentan una capa que parece más suelo que roca, en la que se forman terrones y el suelo no está suelto, además se caracterizan por presentar un horizonte B cámbico o un A ócrico o úmbrico o un horizonte A mólico situado inmediatamente encima de un horizonte B cámbico con un grado de saturación (por $\text{NH}_4 \text{OAc}$) menor del 50%. Los rendimientos que permiten estos suelos dependen en mucho de las condiciones climáticas, además tienen una susceptibilidad a la erosión de alta a muy alta. Su uso es

principalmente forestal, en la ganadería con pastos naturales, inducidos o cultivados, y en la agricultura para cultivos de granos con rendimientos de medios a altos, sus limitantes principales son la topografía y el clima.

Castañozem. Estos suelos se caracterizan principalmente por la presencia de un horizonte A mólico de color pardo o rojizo oscuro, son ricos en materia orgánica y nutrientes, presentan un horizonte cálcico o petrocálcico (caliche) o gypico de consistencia suelta o ligeramente cementado en el subsuelo. Se usan para la ganadería extensiva mediante el pastoreo, o intensiva con pastos cultivados y rendimientos de medios a altos; en la agricultura, su rendimiento es en general alto con cultivos de granos, oleaginosas y hortalizas, especialmente bajo riego, en forma natural su fertilidad es alta. Su susceptibilidad a la erosión es moderada.

Chernozem. (Del ruso *cherno*, negro, y *zemija*, tierra, literalmente: tierra negra). Suelos que se encuentran en zonas semiáridas o de transición hasta climas más lluviosos; en condiciones naturales tienen vegetación de pastizal con algunas áreas de matorral. Presentan una capa superior de color gris o negro, rica en materia orgánica y nutrientes y acumulación de caliche suelto o ligeramente cementado en el subsuelo. Se usan para ganadería extensiva mediante pastoreo, o intensiva con pastos cultivados y de rendimientos de medios a altos; además, se usan en agricultura con cultivos de granos, oleaginosas y hortalizas de rendimientos generalmente altos, sobre todo si están sometidos a riego, su naturaleza es de una alta fertilidad y son moderadamente susceptibles a la erosión.

Feozem. Suelos con un horizonte A mólico, con un grado de saturación del 50% (por NH_4OAc) como mínimo en los primeros 125 cm superiores del perfil, presentan una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes.

Su uso es pecuario y forestal. Sus principales limitantes al uso y manejo son el clima y la topografía. Su vocación es forestal con bosque o selva. Pueden usarse en la agricultura en función de su profundidad y el relieve del terreno. La susceptibilidad a la erosión va de moderada a alta.

Fluvisol. Suelos formados por materiales acarreados por agua, presentan horizontes de diagnóstico A ócrico, mólico, úmbrico o hístico, un horizonte sulfúrico o material sulfuroso en los 125 cm superficiales. No presentan estructura en terrones

es decir, son suelos poco desarrollados. Se encuentran cerca de los lagos o sierras, donde el agua escurre hacia los llanos y en los lechos de los ríos.

La vegetación varía desde selva hasta matorrales y pastizales. Muchas veces presentan capas alternadas de arena, arcilla o gravas, que son producto del acarreo durante inundaciones y crecidas relativamente recientes. Su profundidad varía así como su textura y fertilidad en función del material del que están formados.

Son suelos con una fertilidad moderada, se usan en la agricultura con rendimiento de moderado a alto en función de la disponibilidad de agua y a la capacidad del suelo para retenerla.

En zonas muy secas se utiliza para pastoreo con rendimientos moderados. En zonas cálidas y húmedas se usan para la ganadería, y con pastizales cultivados dan altos rendimientos. Otros usos son el pastoreo y el cultivo de hortalizas. Su rendimiento varía en función de su textura, profundidad y disponibilidad de agua.

Leptosoles. Son suelos limitados por roca dura y continua o por materiales calcáreos en los primeros 30 cm de profundidad a partir de la superficie; o que tienen menos del 20% de tierra fina en los primeros 75 cm, con un horizonte A mólico, úmbrico o un horizonte petrocálcico, con o sin un horizonte B cámbico. La variabilidad de estas características está en función del material que los forma. Pueden ser fértiles o infértiles, arenosos o arcillosos. La susceptibilidad a la erosión depende de su ubicación topográfica y puede ser desde alta a muy alta.

Su uso es variable pudiendo ser forestal; donde hay pastos o matorrales puede ser pecuario con ciertas limitaciones, en la agricultura se utilizan con rendimientos variables el uso puede ser limitado por la presencia de agua suficiente y por la erosión.

Luvissols. Son suelos con un horizonte B árgico, cuya capacidad de cambio es igual o mayor a 24 cmol(+) Kg⁻¹ de arcilla, un grado de saturación (por NH₄ OAc) de 50% o mayor en la totalidad del horizonte B.

Su vegetación es de bosque o selva. Se caracterizan por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo, semejante con los Acrisoles, pero son más fértiles y menos ácidos.

Su uso es principalmente forestal y pecuario. Sus principales limitantes al uso y manejo son el clima y la topografía.

Regosoles. Son suelos formados por materiales no consolidados, no presentan una horizontalización, son de colores y se parecen bastante a la roca que los subyace cuando no son profundos. Se encuentran formando las playas y en las laderas de las sierras. Su uso es forestal, pecuario y agrícola. Sus limitantes son la topografía y el clima. La susceptibilidad a la erosión puede ser de alta a muy alta.

Vertisoles. Son suelos arcillosos (30% o más de arcilla), de colores que varían de negros a grisáceos, casi todos los años, presentan grietas de 1 cm o más desde la superficie cuando el suelo está seco. Son muy adhesivos, plásticos y muy duros cuando secos, algunas veces salinos. El uso es agrícola y forestal, sus principales limitantes son el clima y la topografía.

METODOLOGÍA

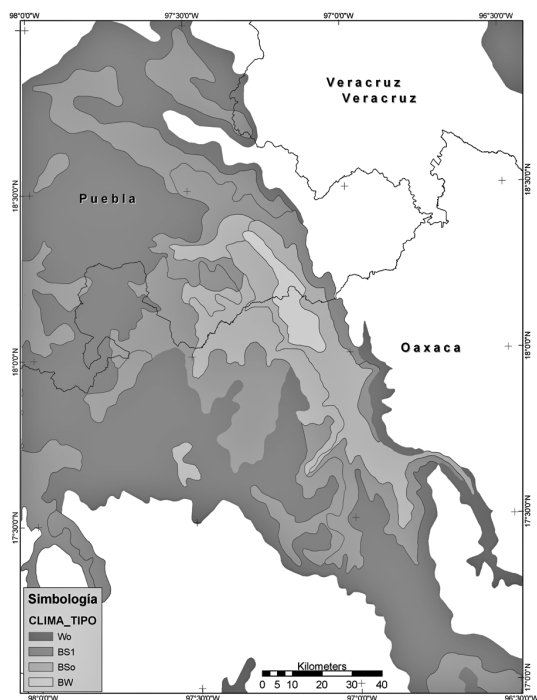
Este trabajo se realizó con base en la definición sobre desertificación como “degradación de la tierra en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultado de varios factores, donde se incluyen tanto las variaciones climáticas como las actividades humanas”.

Para esto se utilizó la Carta de Climas de la Comisión Nacional de la Biodiversidad Conabio, escala 1: 1 000 000 (García, 1997), con información aproximadamente al año 1995, la cual se basa en el Sistema de Clasificación de Köppen Modificado por García, por considerar que establece con bastante confiabilidad la delimitación de las zonas climáticas. Es importante mencionar que algunos de los criterios que se utilizaron para la delimitación de los nuevos subtipos climáticos de este sistema de clasificación, estuvieron basados en la distribución de algunas comunidades de vegetación (García, 1961).

De este mapa se obtuvo el grado de humedad, el cual se simplificó de la siguiente forma: se agruparon todos los subtipos: muy húmedos, húmedos, subhúmedos húmedos y subhúmedos intermedios.

Las condiciones de humedad restantes y la gama de grises utilizados para señalarlos (figura 2) fueron: subhúmedos secos (wo), en gris muy oscuro, semiáridos (BS1), en gris oscuro; áridos (BS0), en gris claro y los muy áridos (BW), en gris muy claro.

Figura 2
CLIMAS DE LA ZONA DE ESTUDIO



Elaboración propia.

Otra fuente cartográfica utilizada fue la Evaluación de la degradación del suelo, causada por el hombre en la República Mexicana. Escala 1: 250 000, que utilizó la metodología ASSOD (por sus siglas en inglés Assessement of Soil Degradation, Evaluación de la Degradación del Suelo), que es una modificación de la denominada GLASOD (por sus siglas en inglés Global Assessement of Soil, Degradation, Evaluación Global de la Degradación del Suelo). Esta última adoptada por la FAO a nivel mundial y por el Inventario Nacional de Suelos de la Dirección General de Restauración y Conservación de Suelos (DGRYCS) dependiente de la Semanart (Semanart-CP, 2001-2002).

En este mapa se reconocen dos grandes categorías de procesos de degradación del suelo: la degradación por desplazamiento del material del suelo, que tiene como agente causativo a la erosión hídrica o eólica y la degradación resultante de su deterioro interno, que considera en la actualidad a los procesos de degradación física y química (Semanart-CP, *op.cit.*).

Este material cartográfico se simplificó agrupando los tipos de degradación dominante para dejar los siguientes: erosión eólica (E), hídrica (H), física (F) y química (Q); se eliminaron los procesos asociados a él.

El nivel de afectación de la degradación del suelo fue evaluado en términos de la reducción de la productividad biológica de los terrenos, por tanto se consideraron cuatro niveles:

1. Ligero: los terrenos aptos para sistemas forestales, pecuarios y agrícolas locales presentan alguna reducción apenas perceptible en su productividad.
2. Moderado: los terrenos aptos para sistemas forestales, pecuarios y agrícolas locales presentan una marcada reducción en su productividad.
3. Fuerte: los terrenos a nivel de predio o de granja tienen una degradación tan severa, que se pueden considerar con productividad irrecuperable a menos que se realicen grandes trabajos de ingeniería para su restauración.
4. Extremo: su productividad es irrecuperable y su restauración materialmente imposible.

También se incluyeron las siguientes unidades:

SN, estable bajo condiciones naturales: influencia humana (casi) ausente sobre la estabilidad del suelo y gran cobertura de vegetación no disturbada. Nota: algunas de estas áreas pueden ser muy vulnerables a pequeños cambios que afectan el equilibrio natural.

NU, tierras sin uso: tierras sin vegetación y con influencia humana (casi) ausente sobre la estabilidad del suelo; se consideraron: desiertos, regiones áridas montañosas (NUm), afloramientos rocosos (NUr), dunas costeras y

planicies salinas. Se pueden presentar en ellas procesos de degradación en forma natural.

Para el estudio de la degradación de las zonas con agricultura se utilizó la cartografía digital del Inventario Forestal Nacional, escala 1:250 000 (Inventario Forestal Nacional, 2000).

Para realizar el análisis de la relación entre suelo y clima se empleó la carta digital Edafológica 1:250 000 (INEGI, 1995). Se agruparon las unidades de suelo y se hicieron las adecuaciones, en los casos necesarios, en la taxonomía de estas unidades con base en las últimas versiones de la clasificación de suelos de FAO (1995, 2006).

Estos dos últimos mapas fueron proporcionados por el Laboratorio de Análisis Espacial del Instituto de Geografía (LAGE) de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El procesamiento de los mapas antes mencionados (intersecciones, selección por atributos para obtener los datos estadísticos y poder cuantificar las áreas resultantes) se realizó con base en un Sistema de Información Geográfica (ArcGis 9.3), además del uso de la hoja de cálculo (Excel).

RESULTADOS

En primer lugar, en cuanto a la extensión de los subtipos climáticos secos en el valle, como se observa en el cuadro número 1, el clima subhúmedo seco (wo) es el que cubre más de la mitad de la superficie (54.7%) y el de menor extensión es el clima muy árido (BW), con menos del 2%.

Cuadro 1
SUPERFICIE (%) DE LOS TIPOS CLIMÁTICOS

<i>wo</i>	<i>BSI</i>	<i>BSO</i>	<i>BW</i>	<i>Total</i>
10477.3	6059.6	2312.3	315.0	19164.1
54.7	31.6	12.1	1.6	100.0

Elaboración propia. Fuente: García, E. (1997).

En el área de estudio se presentan 11 unidades de suelo, donde los leptosoles abarcan casi la mitad de la superficie total (46%), seguido por los regosoles (36 %) y en menor proporción los cambisoles (5%) y luvisoles (4%), en pequeñas áreas los calcisoles, feozem, vertisoles, castañozem, andosoles, fluvisoles y luvisoles.

Las climas secos se relacionan principalmente con las siguientes unidades de suelo a partir de la superficie que ocupa cada subtipo climático: en los subhúmedos secos (wo) predominan los regosoles (48%) y los leptosoles (31%); para los semiáridos (BS₁) los leptosoles (46%) y regosoles (19%); en los BSo áridos destacan los leptosoles con un 90% y en los muy áridos (BW) 89 % corresponde a los leptosoles.

Cuadro 2
SUPERFICIE (%) AFECTADA POR LOS TIPOS DE DEGRADACIÓN DEL SUELO

<i>E</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>Q</i>	<i>UN</i>	<i>SN</i>
8.0	1.5	16.2	16.1	32.8	25.3

Elaboración propia. Fuente: Semarnat - CP. (2001-2002).

Eólica (E), física (F), hídrica (H) y química (Q) y las unidades: tierras sin uso (NU) y estable bajo condiciones naturales (SN).

En el cuadro 2 se muestra que el área de estudio es afectada por los cuatro tipos de degradación definidos para México, si bien se observa que las tierras sin uso (NU), son las que ocupan la mayor extensión (33%) son tierras sin vegetación y con influencia humana (casi) ausente sobre la estabilidad del suelo, en este caso corresponden a regiones áridas montañosas; se pueden presentar en ellas procesos de degradación en forma natural. Le sigue en segundo lugar la condición de estable bajo condiciones naturales (SN), ésta se caracteriza por una casi ausente influencia humana sobre la estabilidad del suelo y gran cobertura de vegetación no disturbada; es importante señalar que algunas de estas áreas pueden ser muy vulnerables a pequeños cambios que afectan el equilibrio natural.

En cuanto a los tipos de degradación se puede apreciar en el cuadro 2 que los más importantes son el químico e hídrico, pues afectan a casi la tercera parte de la superficie de la zona de estudio.

Cuadro 3
SUPERFICIE (%) DE DEGRADACIÓN DEL SUELO POR TIPO CLIMÁTICO

<i>Tipo</i>	<i>Wo</i>	<i>BSI</i>	<i>BSo</i>	<i>BW</i>
E	8.9	7.6	5.0	10.3
F	1.8	1.8	0.1	0.0
H	17.9	17.3	7.8	0.8
Q	29.9	29.9	49.9	61.5
NU	14.7	18.9	14.1	27.3
SN	26.9	24.5	23.1	0.1

Elaboración propia. Fuente: Semarnat - CP. (2001-2002).

Eólica (E), física (F), hídrica (H) y química (Q) y las unidades: tierras sin uso (NU) y estable bajo condiciones naturales (SN).

En relación con la degradación del suelo, por tipos climáticos (cuadro 3), se observa que la erosión química es la que afecta la mayor área y es más de 50% de la superficie en los subtipos climáticos áridos y muy áridos y de 30% en los semiáridos y subhúmedos secos, lo que conlleva a una disminución en el rendimiento de los cultivos. Se puede apreciar en el cuadro 4 que el nivel de afectación es ligero en más del 75% en cada unos de estos subtipos climáticos. Como ya se mencionó, los tipos de suelos que predominan en los semiáridos, áridos y muy áridos son los leptosoles, que se caracterizan por ser someros y con un porcentaje de materia orgánica de escaso a muy escaso.

En el cuadro 3 también se puede observar que es menor la superficie degradada por erosión física en los climas áridos (0.1%), de esta superficie, 67% registra una reducción de la productividad biológica extrema (nivel 4), por otra

parte, los semiáridos con 1.8% de su superficie afectada por la degradación física, 46% de esta área tiene el mismo nivel 4 (cuadro 4), es decir, la productividad es irrecuperable y su restauración materialmente imposible; es importante señalar que los leptosoles, suelos predominantes en estos climas, se caracterizan por tener un desarrollo incipiente, pobre en materia orgánica y una susceptibilidad a la erosión de alta a muy alta.

En cuanto a la afectación del suelo por erosión eólica, el valor más alto (10.3%), corresponde al clima muy árido, con un nivel de afectación moderado; este resultado coincide a nivel nacional, donde este tipo de erosión afecta al 15% del territorio, principalmente en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas (cuadro 3).

Cuadro 4

SUPERFICIE (%) AFECTADA POR NIVELES DE INTENSIDAD DE DEGRADACIÓN Y TIPO CLIMÁTICO

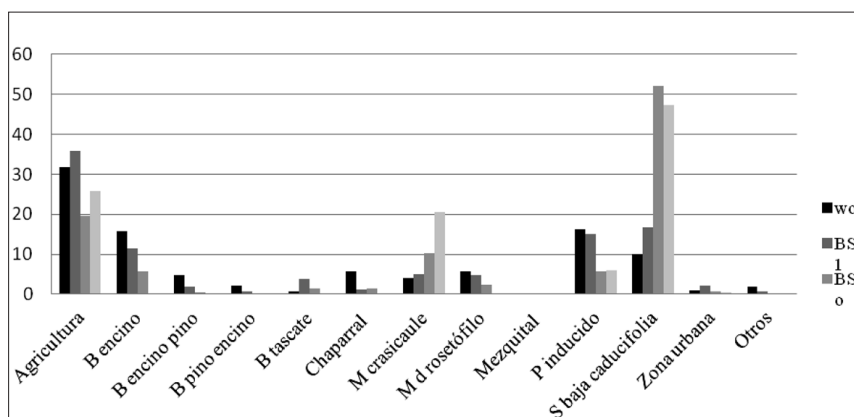
	<i>E</i>				<i>F</i>				<i>H</i>				<i>Q</i>			
<i>Tipo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
wo	49.2	50.8	0.0	0.0	83.6	2.2	2.3	11.9	73.8	25.6	0.6	0.0	76.0	24.0	0.0	0.0
BS1	40.8	50.7	0.0	0.0	42.7	10.2	1.2	45.9	71.1	28.6	0.3	0.0	82.4	17.6	0.0	0.0
BSo	3.1	83.9	0.0	0.0	33.3	0.0	0.0	66.7	80.2	19.8	0.0	0.0	78.0	22.0	0.0	0.0
BW	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	76.6	23.4	0.0	0.0

Elaboración propia. Fuente: Semarnat - CP. (2001-2002)

Ligero (1), moderado (2), fuerte (3), extremo(4).

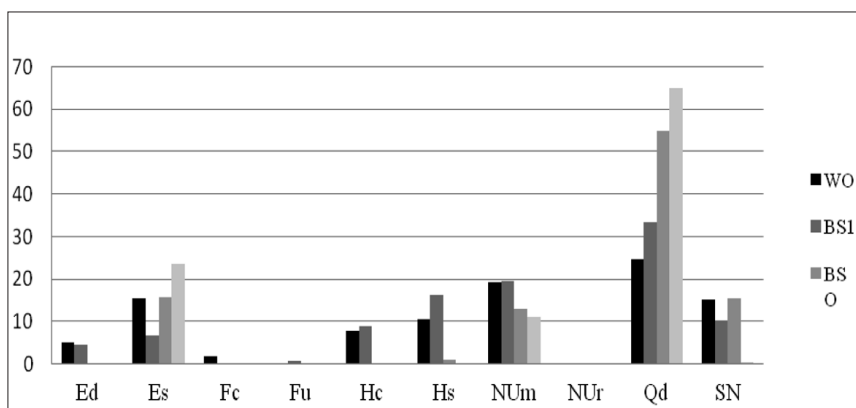
En el análisis que se hizo entre el tipo de uso del suelo y vegetación en relación con los climas, se obtuvo que en la zona de trabajo se presentan los tipos de vegetación que se muestran en la gráfica (figura 3), donde se observa que la superficie ocupada por la agricultura es mayor de 30% en los climas subúmedos secos y semiáridos, el otro valor importante de extensión es el correspondiente a la selva baja caducifolia, que abarca aproximadamente 50% en los climas áridos y muy áridos.

Figura 3
SUPERFICIE (%) OCUPADA POR LOS DIFERENTES TIPOS DE USO DE SUELO
Y VEGETACIÓN EXISTENTES EN CADA SUBTIPO CLIMÁTICO



Elaboración propia. Fuente: García, E. (1997) e Inventario Forestal Nacional (2000).

Figura 4
SUPERFICIE (%) AFECTADA POR TIPO Y CAUSA DE DEGRADACIÓN EN ZONAS AGRÍCOLAS



Elaboración propia. Fuente: Semarnat - CP. (2001-2002).

Deformación del suelo por acción del viento (Ed), pérdida del suelo superficial por acción del viento (Es), compactación (Fc), pérdida de la función productiva (Fu), erosión hídrica con deformación del terreno (Hc), regiones áridas montañosas (NUm), afloramientos rocosos (NUr), declinación de la fertilidad y reducción del contenido de materia orgánica (Qd) y estable bajo condiciones naturales (SN).

En la figura 4 se muestra la superficie de las zonas agrícolas afectadas por la degradación, se puede observar que la química es la más importante por la extensión que abarca, y es en los climas muy áridos y áridos en donde es afectada más de la mitad de la superficie. Esta situación implica la declinación de la fertilidad y reducción del contenido de materia orgánica, por el decrecimiento neto de nutrimentos y materia orgánica disponibles en el suelo que provocan una disminución en la productividad.

Las posibles causas son el balance negativo de nutrimentos y materia orgánica entre las salidas, representadas por los productos de las cosechas, de las quemas, las lixiviaciones, etc., y las entradas, entendidas como la fertilización o el estercolamiento, la conservación de los residuos de cosecha y los depósitos de sedimentos fértiles. La erosión eólica es la que ocupa el segundo lugar en cuanto a superficie con zonas agrícolas afectada, en más de 23% en los climas muy áridos y más de 15% en los subhúmedos secos y áridos, esto da lugar a la disminución del espesor del suelo superficial (horizonte A), debido a la remoción uniforme del material del suelo por la acción del viento. Las posibles causas son la insuficiente protección de la cubierta vegetal o del suelo contra el viento, por deficiente humedad o por la destrucción de la estructura del suelo y, como ya se dijo, los suelos característicos de estas zonas son los leptosoles, susceptibles a tener una erosión de alta a muy alta.

El nivel de afectación de la degradación del suelo es moderada (2) (figura 5), en toda la superficie cultivada de los climas muy áridos y en casi 60% de los subhúmedos secos, esto implica que los terrenos aptos para sistemas forestales pecuarios y agrícolas locales presentan una marcada reducción en su productividad (figura 4).

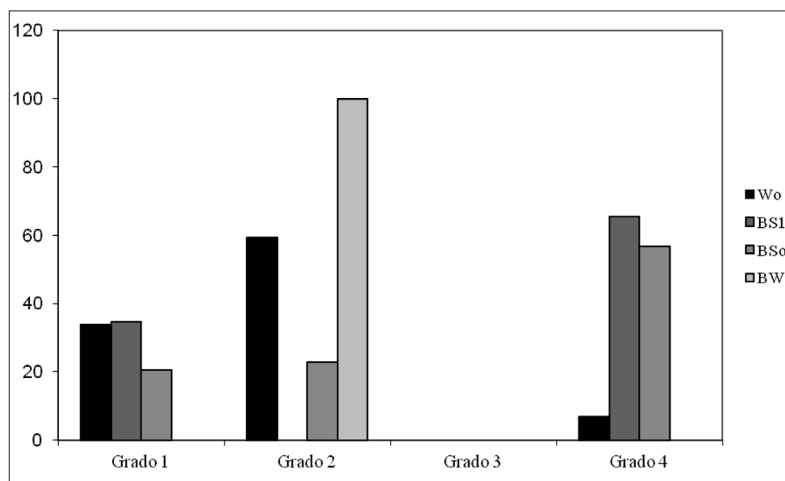
En más de la mitad del área agrícola de los semiáridos (65%) y de los áridos (57%), el grado de afectación es extremo (4), es decir que la productividad es irrecuperable y su restauración materialmente imposible.

Al no presentarse condiciones de afectaciones extremas en los climas muy áridos, es posible decir que no se tienen condiciones desérticas en la zona de estudio, es importante señalar la pérdida de productividad que se encontró, lo cual se puede atribuir entre otros, a la problemática ambiental que enfrenta la zona como es la presencia de ganadería caprina, la basura generada en las ciudades más grandes como Tehuacán y Zapotitlán que se deposita en basureros clandestinos, la agricultura,

el cambio de uso del suelo y además el desarrollo de vías de comunicación que se han y se siguen construyendo.

Figura 5

SUPERFICIE (%) CON ZONAS AGRÍCOLAS AFECTADA POR NIVELES
DE INTENSIDAD DE DEGRADACIÓN POR TIPO CLIMÁTICO



Elaboración propia. Fuente: Semarnat - CP. (2001-2002)

Ligero (1), Moderado (2), Fuerte (3), Extremo (4).

CONCLUSIONES

En los climas secos de la zona de estudio, el subtipo climático subhúmedo seco abarca la mayor extensión.

La zona analizada presenta once unidades de suelo, donde los leptosoles cubren casi la mitad de la superficie. En los subtipos climáticos semiáridos, áridos y muy áridos predominan los suelos leptosoles y en los subhúmedos secos los regosoles. Todos los procesos de degradación de suelo están presentes en la zona de estudio. La degradación química es el proceso más importante por la extensión que ocupa, principalmente en las zonas agrícolas de los climas muy áridos y áridos.

No existen condiciones de desierto, ya que no se presentan afectaciones extremas de degradación en las zonas con clima muy árido.

Pequeñas extensiones (menos del 2%) de los climas áridos y semiáridos presentan degradación física con nivel de afectación extremo, donde la pérdida de la productividad es irrecuperable y su restauración es materialmente imposible.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, H.N. (1970), "Suelos de las zonas áridas de Tehuacán, Puebla, y sus relaciones con las cactáceas. Cactáceas y Suculentas Mexicanas", *Sociedad Mexicana de Cactología*, A. C. tomo XV (3): 51-63.
- Balling, Jr. R. C. and Martin, A. J. W. (1996), *Interactions of desertification and climate*. World Meteorological Organization. United Nations Environmental Programme, Arnold, Member of the Hodder Headline Group, London, 270 pp.
- Byers, D. S. (1967), "Climate and hydrology", en Byers, D. S. (ed), *The prehistory of the Tehuacan valley*, vol. 1, Environment and Subsistence, University of Texas Press, Austin, 48-65.
- Bruins, J. H. and Berliner, R. P. (1998), "Aridity, climatic variability and desertification" in: Bruins, J. H. and Harvey, L. (Ed). *The arid frontier: interactive management of environment and development*, Kluwer Academic, Israel, 100-112.
- Cloudsley-Thompson, J. L., (1979), *El hombre y la biología de zonas áridas*, Blume, Barcelona.
- Conaza (Comisión Nacional de las Zona Áridas) (1994), *Plan de acción para combatir la desertificación en México (Pacd-México)*, Conaza, Secretaría de Desarrollo Social, México, 160 pp.
- Dávila, P., Villaseñor, R. J. L., Medina, L. R., Ramírez, R. A., Salinas, T. A., Sánchez-Ken, J. y Tenorio, L. P., (1993), *Listados florísticos de México X. Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán*, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Dávila, P., Arizmendi, M.C., Valiente-Banuet, A., Villaseñor, J.L, Casas, A y Lira, R., (2002), "Biological diversity in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico", *Biodiversity and Conservation*, 11: 421-442.

- Dregne, E. H. (2000), "Drought and Desertification. Exploring the linkages", in *Drought, a global assessment*, Wilhite, D. A. (ed), Routledge Hazards and Disasters Series, London and New York, 2. 231-240.
- Estrada Berg, W. J. W. (1991), "Diagnóstico y perspectivas sobre el suelo en México", seminario Transformaciones del Agro Mexicano en los Noventa, Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de Suelos, México.
- Engel, K.I. y Whiteford, S. (1989), *The keepers of water and earth: Mexican rural social organization and irrigation*, University of Texas Press, Austin.
- García, E., Soto, C. y Miranda, F. (1961), "Larrea y Clima", *Anales Instituto de Biología*, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 31: 133-171.
- García, E., (1965), *Distribución de la precipitación en la República Mexicana*, Publicaciones del Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, vol.1, 171-191.
- García, E., (1997), *Cartas de Climas. Hojas México y Oaxaca, según el sistema de Köppen modificado por García*, Escala 1:1 000 000, Conabio, México.
- FAO-UNESCO (1990), *Mapa mundial de suelos. Leyenda revisada*, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma 141.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (1995), *Carta Edafológica*, Escala 1: 250 000, digital.
- Inventario Forestal Nacional (2000), *Cartografía digital*, escala 1:250 000. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México e Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- MacNeish, R.S. (1972), "Summary of the cultural sequence and its implications in the Tehuacan valley", in MacNeish, R.S. *et al.*, *The prehistory of the Tehuacán valley*, vol. 5, Excavations and reconnaissance, University of Texas Press, Austin.
- Oropeza, O. O. (2004), "Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación", en: Martínez, J. y Fernández, A. (Ed.), *Cambio climático: una visión desde México*, Semarnat, Instituto Nacional de Ecología, México, 303-313.
- Ortiz, S. Ma. de la Luz, Anaya, G. M. y Estrada B. W. J. W. (1995), *Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra*, Colegio de Posgraduados, Comisión Nacional de las Zonas Áridas (Conaza) Montecillo, México.

- Semarnat-CP. (2001-2002), *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana*, escala 1: 250 000. Memoria Nacional, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Colegio de Posgraduados, México, 69 pp.
- Semarnat (2006), *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales 2005*, México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Valiente-Banuet, A. (1995), “Bases ecológicas del desarrollo sustentable en zonas áridas: el caso de los bosques de cactáceas columnares en el valle de Tehuacán y la Baja California Sur, México”, in Anaya, G., M. (editor), *Memorias del IV Curso sobre desertificación y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe*, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, pp. 20-36.

CIBERGRAFÍA

- FAO/ISRIC/IUSS (2006), Base de referencia para los suelos del mundo.
- <http://edafologia.ugr.es/carto/tema01/wrb06/faowrbhd06.htm> Recuperada septiembre 2011.
- Téllez, V., Reyes, C. M., Dávila, A. P., Gutiérrez, G. K., Téllez, P. O., Álvarez, E. R., González, R.A., Rosas, R. I., Ayala, R. M., Hernández, M. M., Murguía, R. M. y Guzmán, C. U. (2008), *Guía Ecoturística. Las plantas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán*. Compañía Automotriz Volkswagen. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, Millenium Seed Bank Project de los Reales Jardines Botánicos de Kew. http://www.kew.org/ucm/groups/public/documents/document/kppcont_035786.pdf. Consultado en septiembre de 2011.
- http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_SUELO03_10&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce. Consultado en septiembre de 2011.

REVISIÓN COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE GASES EFECTO INVERNADERO EN CUERPOS DE AGUA

Gratia Dei Flores Salgado¹, Patricia Mireles Lezama²,

María Estela Orozco Hernández²

*¹Facultad de Química, ²Facultad de Planeación Urbana y Regional,
Universidad Autónoma del Estado de México*

RESUMEN

La revisión de algunos métodos de medición de los procesos de flujo y emisión de gases de efecto invernadero, es un ejercicio necesario para abordar el estudio de los humedales de agua dulce. Los métodos generales aplicados en distintas latitudes deben ser analizados y depurados para que se apliquen en un medio acuático específico, para lo cual se deben considerar las ventajas de la moderna tecnología de medición y sus posibilidades de aplicación, así como los procedimientos de medición de menor costo y accesibles en un contexto de recursos limitados para la investigación.

Palabras clave: métodos, medición, gases de efecto invernadero, humedales.

COMPARATIVE REVIEW OF METHODS FOR MEASURING GREENHOUSE GASES IN WATER BODIES

ABSTRACT

The review of the assessment of the fluxes and emissions of greenhouse gases is extremely necessary for the study of the wetlands and interior water bodies. The general methods that had been applied in all over the world have to be analysed and depurated in order to apply one of those or create a new one according with an specific water body, for which should be taken in account to be applied the modern technology measurements techniques, as well as low cost methods as a resource when the research has limited finding`s.

Key word: methods, assessment, greenhouse gas, wetlands.

INTRODUCCIÓN

La Convención Internacional sobre los Humedales de importancia Internacional (Ramsar) define los humedales como ecosistemas naturales y artificiales que se hallan permanente o temporalmente inundados, por aguas dulces, salobres o salinas, estancadas o corrientes; incluyen regiones ribereñas, costeras o marinas que no excedan los seis metros de profundidad. Los humedales son ambientes intermedios entre terrestres y acuáticos, con características de ambos, y que mantienen su particularidad. Los humedales que nos interesan son los interiores, entre los que se hallan los pantanos, las ciénagas, lagos y cenotes. Estos sistemas dinámicos cambian en forma natural como resultado del aporte de sedimentos de las áreas adyacentes, de la subsidencia (hundimiento del fondo), del clima extremo, todo esto acelerado por las actividades humanas (De la Lanza, 2008).

Se estima que en el mundo los humedales cubren una extensión de siete a nueve millones de kilómetros cuadrados; sin embargo tiende a disminuir su extensión y recursos naturales por las necesidades humanas, en este contexto un número

significativo de países han adoptado la política de poner límites a la destrucción y la degradación, reconociendo que los humedales deben utilizarse y conservarse (Barcada *et al.*, 2007).

La importancia de los humedales radica no sólo en que proporcionan variedad de bienes, servicios y funciones ecosistémicas, también almacenan y emiten bióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero (GEI) que inciden en el micro clima local y global, asimismo los cambios en la temperatura, en los patrones de precipitación, aumento en el nivel del mar, son entre otras variaciones del clima, las que pueden producir sensibles impactos en los humedales (Bárbaro y Moya, 2005).

La trascendencia de la línea de atención que se aborda, la captura y emisión de GEI en los cuerpos de agua interiores, parte de los argumentos siguientes: varios de los precursores de GEI se encuentran como parte natural de los humedales interiores, empero la adición masiva de los nutrientes (nitrógeno y fósforo) de forma natural o inducida por la influencia humana, acelera la pérdida de oxígeno, la descomposición de la materia orgánica y como consecuencia favorecen la emisión de GEI hacia la atmósfera. Algunos estudios realizados en el mundo exponen el papel que desempeñan los humedales en el proceso de emisión y absorción de gases de efecto invernadero.

Los sitios que más han estudiado la relación que guardan los cuerpos de agua y los GEI son Canadá y Brasil en el continente americano, sin embargo, algunos países europeos han hecho lo propio tales como Reino Unido y Holanda, empero no existe ningún acuerdo sobre cuál es el mejor método para muestrear el flujo de gases ni mucho menos para conocer su composición, mas desde 2004 la UNESCO apoya este tipo de investigaciones, en aquel entonces comenzó con cursos-talleres para identificar los trabajos más sobresalientes, pero hoy en día se realizan reuniones anuales que aportan grandes descubrimientos. Ejemplo de lo anterior es que en 2008, Tremblay determinó que después de algún tiempo los GEI emitidos por un cuerpo de agua en la región boreal se encuentran en equilibrio en lo que contienen de precursores como los que emiten, sin embargo, para zonas tropicales esto no se ha sugerido, otro de los grandes productos que se han obtenido a través de la UNESCO/ IHA es un manual de cómo aplicar los métodos de medidas de flujos y de identificación de gases que año con año se renueva de forma que facilite a los investigadores la obtención de

datos y su análisis en esta relación agua- GEI, aun así y de los grandes esfuerzos de dichas instituciones no se tiene un acuerdo ni consenso de los métodos necesarios y requeridos para el estudio de la relación agua- GEI.

En un esfuerzo por comprender la relación agua- GEI, como medirlos e identificarlos, se desarrollan cuatro subtítulos que conforman este capítulo.

Dentro del subtema, la dinámica de los gases en el agua se menciona como se encuentran los precursores de GEI, sus ventajas, desventajas cómo llegan al agua, como se encuentran en el agua y las constantes de Henry establecidas para ellos.

En el apartado de la definición de emisiones (brutas y netas) de gases efecto invernadero se pretende dar una explicación concisa de qué es una emisión de GEI, como y para qué funcionan cada una y que es lo que se mide directa e indirectamente.

Por último, en el subtítulo de metodología para la cuantificación de emisión de gases se explican los métodos para medir el flujo y las emisiones de GEI, sus ventajas y desventajas según algunos de los autores y la guía UNESCO/IHA 2010. Al final se mencionan las conclusiones a las que se llegaron.

LA DINÁMICA DE LOS GASES EN EL AGUA

Los gases disueltos son cruciales para la vida de las especies acuática como el O_2 para los peces y el CO_2 para las algas fotosintéticas aunque también pueden causar grandes daños cuando hay una saturación del N_2 , por mencionar un ejemplo. Por eso es que la disolución de los gases en el agua es de suma importancia, ya que permite la vida de los organismos, o bien la puede restringir; sin embargo la cantidad de gas que se disuelve en agua depende del propio gas en equilibrio con el agua, y la temperatura (Rodríguez-Medallo *et al.* 1999 y Manahan, 2000).

La solubilidad de un gas en agua será calculada acorde a la ley de Henry (cuadro 1), la cual establece que la solubilidad de un gas es proporcional a la presión parcial del gas contenido en el líquido, sin embargo, la temperatura juega un papel importante en la disolución de los gases, ya que al aumentar, ésta disminuye la solubilidad de los gases y se calcula a partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron (Manahan, 2000).

Cuadro 1
CONSTANTES DE LA LEY DE HENRY PARA ALGUNOS GASES A 25 °C

<i>Gas</i>	<i>K, mol X L⁻¹ X atm⁻¹</i>
O ₂	1.28x10 ⁻³
CO ₂	3.38x10 ⁻²
H ₂	7.90x10 ⁻⁴
CH ₄	1.34x10 ⁻³
N ₂	6.48x10 ⁻⁴
NO	2.0x10 ⁻⁴

El oxígeno disuelto en el agua proviene principalmente de la atmósfera, el cual representa 20.95% de volumen del aire seco. Por consiguiente, la capacidad de que un cuerpo de agua se re-oxigene al entrar en contacto con la atmósfera es vital para los diferentes ciclos que allí se llevan a cabo. La solubilidad del oxígeno depende directamente de la temperatura, la presión parcial y el concentración de sal en el agua; cabe mencionar que hay dos conceptos que distinguir dos conceptos: La solubilidad del oxígeno (es la máxima concentración de gas disuelto en el equilibrio) y la concentración de oxígeno disuelto (no es la concentración en equilibrio, está limitada por la velocidad a la que se disuelve), cuando el agua se encuentra en equilibrio las concentraciones de oxígeno disuelto no son muy altas. Por lo tanto, cuando hay altas temperaturas la solubilidad del O₂ disminuye y si a esto se suma un incremento en la tasa de respiración de los organismos (condiciones de grandes demandas de oxígeno y bajos niveles de solubilidad en el agua) resultando un agotamiento severo de O₂ (Manahan, 2000).

El dióxido de carbono en el agua está presente por encontrarse en la atmosfera, por la descomposición de la materia orgánica y la producción por algunos microorganismos. El dióxido de carbono al igual que sus productos de ionización el ion bicarbonato (HCO₃⁻) y el ion carbonato (CO₃²⁻) tienen una gran influencia en la química del agua; un ejemplo de lo anterior es cuando el CO₂ disuelto en el agua, adicionado al que se encuentra en la atmósfera, el ion de carbonato y otros minerales en equilibrio y en solución acuosa tiene un efecto de amortiguador de

pH muy importante. Otras características químicas que se ven afectadas por la concentración de dióxido de carbono son la alcalinidad y la concentración de calcio disuelto. El exceso de este gas en los cuerpos de agua afecta negativamente el intercambio gaseoso en los animales acuáticos (Manahan, 2000, Liikanen, 2002 y Tremblay *et al.*, 2005).

Definición de emisiones de gases (brutas y netas)

Las emisiones brutas (GE) de gases efecto invernadero (GEI) son aquellas que se miden en la interface agua-aire, suelo-aire o bien suelo-agua. Las emisiones netas son más utilizadas para los cuerpos de agua creados por el hombre, y se calculan restándole a las GE las emisiones previas a la creación del cuerpo de agua tomando en cuenta las emisiones naturales (ecosistemas terrestres y acuático) de toda la cuenca incluyendo la corriente del río y la parte del estuario (Tremblay *et. al.*, 2005, Goldenfum, 2010). Para Goldenfum (2010) las emisiones netas (NE) son para contabilizar las emisiones de GEI, de las presas creadas por el hombre junto a las hidroeléctricas no para cuerpos de aguas naturales. Las NE no se pueden medir directamente para lo que se utiliza las medida de GE antes y después de la construcción y obteniendo la diferencia de éstas.

Las GE están relacionadas con las medidas de rutina tales como velocidad, dirección y temperatura del aire, pluviosidad, la radiación solar, concentraciones disueltas de partículas de materia orgánica y nutrientes, la tasa de mineralización de la materia orgánica, a partir de las cuales se pueden inferir las emisiones de CO₂ y CH₄, dado que la oxidación aeróbica de este último es un factor de control del flujo del CH₄, ofreciendo un panorama general del balance en las emisiones de ambos gases. (UNESCO/IHA, 2008 y Goldenfum, 2010).

La importancia de tomar en cuenta ambos tipos de emisiones radica en la inclusión e inferencia del ciclo del C y los nutrientes que están presentes en la cuenca, ya sea por razones humanas o naturales (Delmas, 2001, Goldenfum, 2010), además de las interacciones que se llevan en la superficie agua-aire de los cuerpos de agua donde se llevan a cabo los intercambios gaseosos entre dichas superficies.

Cuerpos de agua, fuentes potenciales de la emisión de gases efecto invernadero

Se estima que los sistemas dulceacuícolas reciben alrededor de 1.9 Pg C/año de nutrientes, en una combinación de los alrededores y la influencia antropogénica, de ellos el 0.2 Pg C/año se convierte en sedimentos, aproximadamente 0.8 es devuelto a la atmósfera en gas, y 0.9Pg C/año se transporta hasta los océanos, todo lo anterior nos indica la importancia de los cuerpos de agua en el ciclo del carbono (Cole *et al.*, 2007). Sin embargo, existen relativamente pocos trabajos que estiman la emisión de GEI de ecosistemas acuáticos comparados con los ecosistemas terrestres que se centran en encontrar si se encuentran en balance las emisiones de los cuerpos de agua, con las emisiones de la vegetación aledaña (Cole y Caraco, 2001).

Los cuerpos de agua al jugar un papel de suma importancia en el ciclo del carbono, al ser considerados fuentes potenciales de emisiones de GEI a la atmósfera, tales como el metano y el dióxido de carbono en diferentes ambientes como el boreal, el templado y el tropical, donde sus máximos representantes son: Rudd *et al.*, 1993; Duchemin *et al.*, 1995; Kelly *et al.*, 1997; Tremblay *et al.* 2005; Keller and Stallard, 1994; Rosa and Schaeffer, 1994; Delmas *et al.* 2001; Therrien *et al.* 2005 y Soumis *et al.* 2004, en las diferentes zonas climáticas del mundo, siendo las principales la boreal, tropical y templada. El nivel de emisiones de GEI dependen de la edad del cuerpo de agua y la región tropical, boreal y templada donde se encuentre (Tremblay, 2008); asimismo los mecanismos de control de la emisión de GEI están asociados con los ciclos que se llevan a cabo en los cuerpos de agua, como los de carbono, nitrógeno, metano y oxígeno principalmente (Unesco/HIA 2008).

Continuando con el ciclo del carbono en una cuenca está directamente relacionado con el ecosistema terrestre alrededor del acuático, consecuentemente la mayor de CO_2 en el sistema será el atmosférico, el cual se fijará por la fotosíntesis en la producción primaria de materia orgánica (MO), y se incorporará al suelo donde puede ser almacenado o bien se almacena en la biomasa. Cuando se almacenan en el suelo, el CO_2 y el CH_4 pueden oxidarse en ambientes óxicos o anóxicos por bacterias metanotróficas, cuando pasa a la parte óxica del suelo se convierte en el principal emisor de CH_4 a la atmósfera. Lo anterior se puede transportar al sistema acuático, el

CO_2 y CH_4 entran al sistema acuático por escorrentía, o por la disolución de los gases en el agua; de aquí sufrirán procesos de oxidación y se regresarán a la atmósfera o se almacenarán en el cuerpo de agua. Otro recurso es la MO que llega al cuerpo de agua (Liikanen, 2002; figuras 1 y 2).

Figura 1

FUENTES DE ENTRADA DE CO_2 Y CH_4 Y SUS CICLOS (MODIFICADO DE GOLDENFUM, 2010).

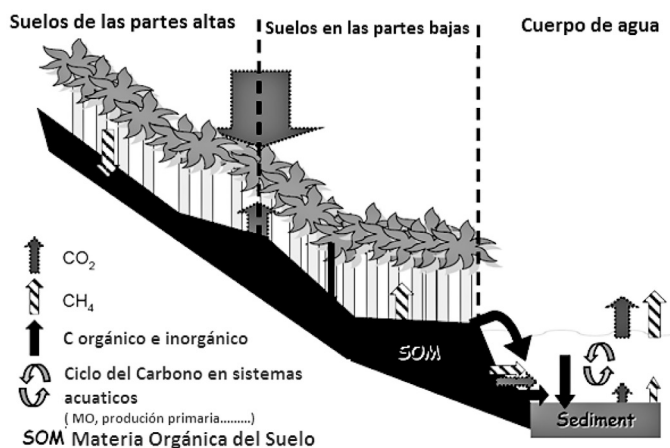
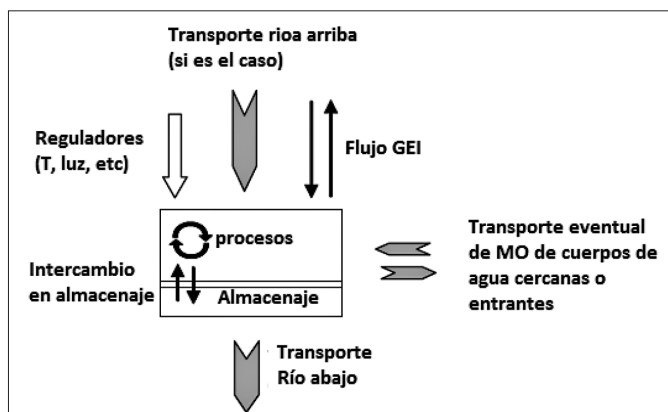


Figura 2

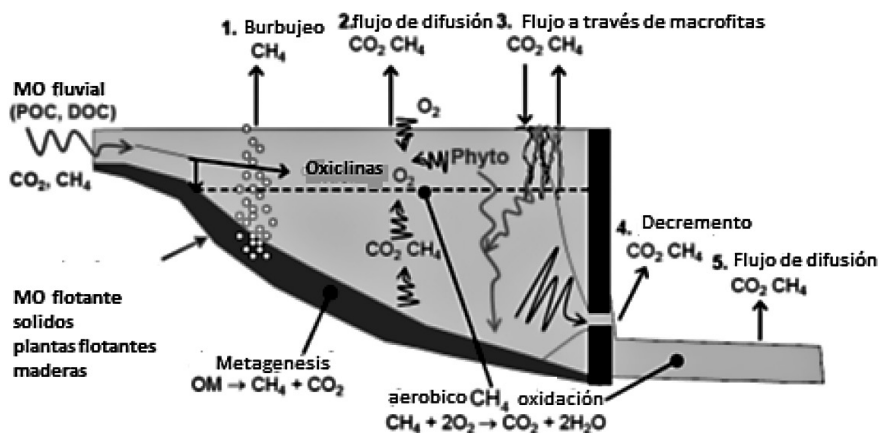
SÍNTESIS DE LOS PROCESOS Y FLUJOS DE CO_2 Y CH_4 (MODIFICADO DE UNESCO/IHA 2008).



En síntesis el CO_2 y el CH_4 provienen de la materia orgánica que aporta la cuenca, la que se produce en el cuerpo de agua y la descomposición de la materia orgánica proveniente del suelo y de las plantas y tiene cinco vías fundamentales: 1) flujo de burbujas de las aguas superficiales, 2) difusión de gases de la superficie del cuerpo de agua, 3) difusión por tallos y raíces de plantas, 4) desgasificación en las salidas río abajo y 5) incremento de la difusión de gas a lo largo del río. (fig. 3) (Goldenfum, 2010).

Figura 3

TOMADO DE GOLDENFUM, 2010, VÍAS DEL CO_2 Y CH_4 EN CUERPOS DE AGUA DULCE CON UN HIPOLIMNION ANÓXICO. PARA CUERPOS DE AGUA BIEN OXIGENADOS LAS EMISIONES DE METANO SIGUEN LAS VÍAS 2, 4 Y 5 EN SU FORMA REDUCIDA



Para el óxido nitroso es diferente en algunos sentidos al ser producido principalmente por actividades humanas: la agricultura, producción de ganado, quema de combustibles fósiles, sin dejar a un lado la producción natural del N_2O de un sinfín de recursos biológicos en suelo y en el agua especialmente por la acción de microorganismos (USEPA, 2009).

Mengis y colaboradores (1997) estipularon que las concentraciones de N_2O están correlacionadas con las concentraciones de O_2 en los lagos, además de que las concentraciones del óxido nitroso aumentaron cuando las de O_2 disminuyen, siempre y cuando sea un ambiente óxico en el caso contrario el N_2O se encontrará poco saturado, ya que éste es consumido por las diferentes partes de la columna de agua anóxica.

Los flujos de óxido nitroso han sido poco estudiados en los humedales pues no son propicios para la producción de éste, ya que hay un nivel de oxígeno muy bajo, poca disponibilidad de nitrógeno y pH no adecuados y bajos niveles de nitrificación (Regina *et al.*, 1996 y Bridgham *et al.*, 2001).

Para Goldenfum (2010) existen cuatro procesos acuáticos fundamentales que producen emisiones de GEI al atmosfera:

1. Suministrar carbono orgánico al reservorio (almacenaje) o a los sedimentos: por las entradas y salidas de materia orgánica entro las conexiones acuáticas y en la cuenca *per se*, la producción primaria en agua que dependen de los nutrientes y la luz del embalse, erosión del suelo como fuentes de MO al cuerpo de agua.
2. Proporcionar las condiciones para la producción de precursores y compuestos de GEI: descomposición de la MO flotante y toda la que entre al sistema dependiente de los organismos, temperatura, oxígeno disuelto y nutrientes, asimismo, la foto-oxidación del carbono orgánico disuelto, la oxidación aeróbica del metano y por último de nitrificación y desnitrificación.
3. Influir en la distribución de GEI dentro del cuerpo de agua: las diferentes formas en las que el CO_2 y CH_4 se mueven en la superficie, al igual que la oxidación del metano en los sedimentos dependientes del oxígeno disuelto, por inhibición de la luz y la temperatura entre otros, y también la producción primaria que consuma CO_2 .
4. Facilitar las vías para que los GEI puedan movilizarse en el embalse y en la atmósfera: la ebullición, intercambio de gases por medio de la difusión en la superficie del embalse, transporte de gases en plantas a través del cuerpo de agua, finalmente la desgasificación con el curso del agua.

Es fundamental identificar los procesos que controlan la emisión de GEI, que coadyuven a predecir la vulnerabilidad de un embalse para elevar o disminuir el flujo de gases, lo que Goldenfum (2010) y Tremblay y colaboradores (2005), dividen dos tipos de parámetros, los primarios que consisten en la creación de un suministro de GEI, los cuales están modulados por las tasas biológicas de la producción de la materia orgánica, respiración y la metalogénesis y oxidación de metano, asociadas a las concentraciones de oxígeno disuelto, la temperatura los almacenes de MO, concentraciones de nitrógeno, carbono entre otros, de igual manera la luz (turbidez del agua), la biomasa de las plantas, algas, bacterias y animales, los sedimentos y la estratificación del embalse, y los parámetros secundarios los cuales están directamente con el intercambio gaseoso entre la atmósfera y las diferentes partes del cuerpo de agua, lo que dependerá directamente de la dirección y velocidad del viento, la forma del embalse, la pluviosidad, las corrientes de agua, la profundidad, las reducciones por temporadas y el incremento de turbulencia. Sin olvidar que todo lo anterior debe adaptarse al contexto geográfico de cada caso.

Metodología para la cuantificación de la emisión de gases

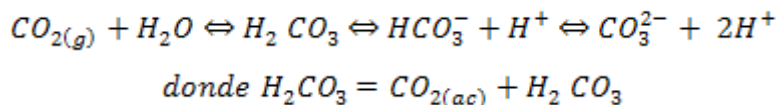
Los GEI especialmente el CH_4 , CO_2 y N_2O , son de gran importancia tanto en el medio acuático como en el terrestre y por ende relevantes para los inventarios globales, siendo que el CO_2 puede estar produciendo 80% de las emisiones de un embalse, mientras que el CH_4 es una emisión natural de baja intensidad o casi nula, pero por influencia humana ésta se puede ver alterada y en aumento. Por su parte, las emisiones del óxido nítrico no han sido completamente estudiadas, pero tienen importancia en los lugares que han sido alterados por el hombre con la creación de presas. (Guérin *et al.*, 2008 y Goldenfum, 2010). Es por tanto, importante hacer estudios sobre los tres gases para aportar la información necesaria para actualizar los inventarios globales.

De acuerdo con Goldenfum (2010) existen tres técnicas básicas para medir la difusión de los gases en la interface agua atmósfera: las cámaras flotantes, las torres de covarianza de Eddy y la delgada capa límite o TBL (por sus siglas en inglés Thin

Boundary Layer), Tremblay y colaboradores adicionan a los métodos mencionados, la cromatografía de gases después de atrapar el gas en cámaras flotantes, también utilizan trampas para atrapar las burbujas de metano. Annick-SPierre (2009) sugiere también los métodos químicos dependientes de la alcalinidad y el pH para encontrar las concentraciones de los diferentes gases, el EGM (Infrared gas analyser) y por último el cálculo de la concentración de CO_2 en el agua. A continuación, se describen brevemente los métodos para medir el flujo y concentración de gases efecto invernadero.

Annick-SPierre (2009) precisa que hay dos técnicas principales para determinar la concentración de gas disuelto en gas y son:

1. Método químico basado en el pH, alcalinidad y temperatura, que consiste en que el carbono inorgánico está compuesto por cuatro tipos de CO_2 disuelto, ácido carbónico H_2CO_3 , bicarbonato HCO_3^- y el carbonato CO_3^{2-} , los que están estrechamente relacionados con la alcalinidad, con la curva de valoración se mide la alcalinidad, es decir, la capacidad de neutralizar los iones H^+ , a partir de esta se infiere la concentración de carbón inorgánico en la ecuación 1 se calculan indirectamente las otras tres compuestos de carbón.
2. Cromatografía de gases, consiste en tomar una muestra de agua, y en el laboratorio es transferida por mezclas mecánicas en volúmenes conocidos de aire, el cual es analizado usando una cromatógrafo (fig. 4) de gases para separar y cuantificar los diferentes gases, Strömberg (1998) también utiliza y recomienda este método, 3).

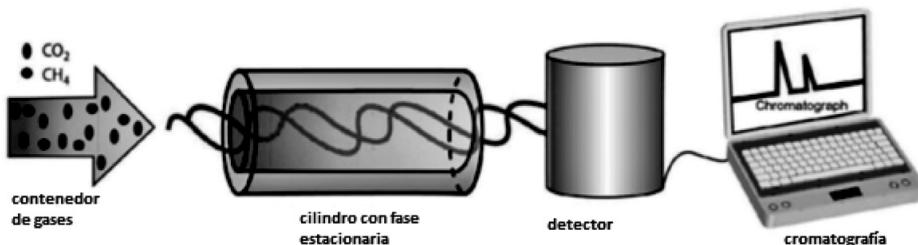


Ecuación 1

Sintetiza las reacciones involucradas del carbono y carbonatos en el agua y de la cual con un balanceo se pueden calcular las concentraciones de estos disueltos en el agua.

Figura 4

DIAGRAMA DE LA CROMATOGRAFÍA DE GASES PARA CUANTIFICAR LOS GEI EN SISTEMAS ACUÁTICOS



Para calcular el intercambio gaseoso. Annick-SPierre (2009) Goldenfum (2010) y Tremblay y colaboradores (2005) proponen los siguientes métodos que se basan en la dinámica de los gases en agua y en tecnologías que se pueden utilizar en las diferentes regiones climáticas del planeta:

1. Cálculo basado en las concentraciones de CO₂ encontradas en el agua: está basado en la primera ley de Fick, donde el flujo es proporcional a la concentración del gradiente a través de la interfaz (presiones parciales), respondiendo a la ecuación 2 :

$$F = k * Kh (pCO_{2\text{ agua}} - pCO_{2\text{ aire}})$$

Ecuación 2

Donde F (flujo) representa la cantidad emitida por superficie y unidad de tiempo.

2. Trazador de gas inerte (SF₆): consiste en medir la evasión biológica inactiva del gas SF₆, de una concentración conocida de dicho gas que es introducida al sistema, arrojando resultados de la velocidad de transferencia del gas en una escala de días o semanas, la desventaja de éste es que es para cuerpos de agua muy pequeños.

3. **Técnica de la covarianza de Eddy:** por medio de complejos instrumentos instalados en lo más alto de una torre que mide precisa y concisamente la presión de CO_2 en el aire, la velocidad del viento en tres dimensiones, bajo un concepto simple donde los vectores ascendentes de la velocidad del viento es pareado con la concentración más alta de dióxido de carbono, así que el medio acuático se convierte en la principal fuente del gas; por ende calcula la velocidad de ascenso del gas; sin embargo este método es mucho más utilizado para sistemas terrestres, por ello los autores sugieren usarlo como un método alternativo para casos acuáticos.

Figura 5

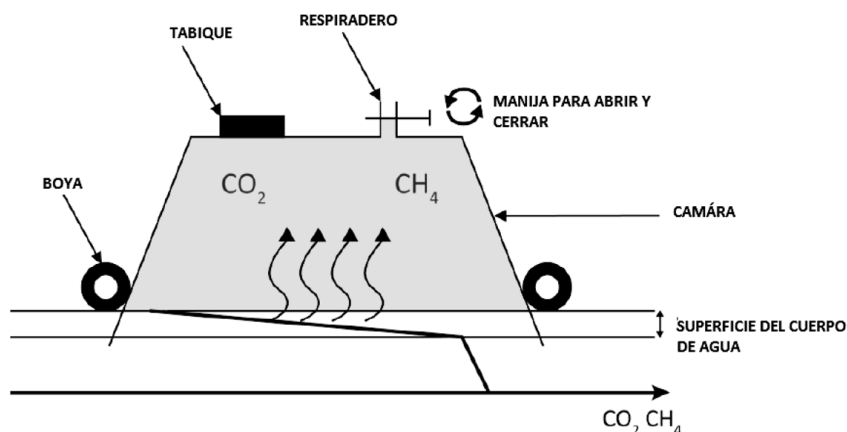
EJEMPLO DE UNA TORRE DE COVARIANZA DE EDDY INSTALADO EN EASTMAN-1 QUEBEC, CANADÁ.



4. La delgada capa límite o TBL (por sus siglas en inglés Thin Boundary Layer): consiste en calcular el flujo usando ecuaciones semiempíricas, aunque existe literatura al respecto, el funcionamiento y entendimiento de esto no es claro, su uso principal es el de predecir el flujo a través de modelaje y es lo que se ha concluido por Benerjee y MacIntyre (2004), otras de las desventajas encontradas a este método son las relaciones sito-específicas y que las ecuaciones teóricas no son válidas para altas y bajas velocidades de viento, sin embargo, los puntos a favor de esta técnica son: su rapidez, las muestras pueden ser conservadas por meses, los cuerpos de agua inestables son medidas a gran velocidad y por el uso de la ecuación de solubilidad se conoce la concentración de gases, las series de tiempo son fáciles de obtener, sin embargo, los autores recomiendan que se use sólo a manera de probar su efectividad para estudios posteriores.
5. Cámaras flotantes: es el método más económico, requiere el mínimo planeamiento logístico, son fáciles de transportar, y permite la localización precisa de las medidas de flujo de gases, su objetivo es medir la tasa de acumulación de gas en un compartimento cerrado (cámara) flotante en la superficie del agua ligado a un analizador de gases que se expande en un lapso de 10 minutos (generalmente), lo que es suficiente para obtener una tasa de acumulación que se determina con un coeficiente R^2 que se espera sea mayor a 0.95, en síntesis, el método consiste en atrapar gas en una cámara flotante para que el flujo de gases sea calculado de acuerdo a la concentración de gas dentro de la cámara, por lo que la difusión del gas dependerá de la concentración de gas que existe entre la superficie del agua y la atmósfera con la interacción de los parámetros físicos como la velocidad del viento y la pluviosidad (Abril *et al.*, 2005, Guérin *et al.* 2007, Tremblay y Bastein, 2009 Fig. 6), algunas de las ventajas de este método son: es barato y fácil de transportar, proporciona medidas exactas y puede ser conectado a sistemas automatizados en tiempo real, aunque tiene la desventaja que sólo es un punto de medida en el espacio y tiempo, no existe un diseño estandarizado, y el viento puede alterar los resultados dando datos exagerados.

Figura 6

DIAGRAMA DE UNA CÁMARA DE GASES



CONCLUSIONES

Los GEI juegan un papel importante dentro de los ciclos naturales que se llevan a cabo en los cuerpos de agua y son importantes para el proceso de cambio climático a nivel mundial, sin embargo, no se han estudiado lo suficiente, por ello existe una discrepancia en el método y la estandarización para obtener datos. Se requiere mayor investigación y desarrollo de tecnologías que faciliten la medición tanto del flujo de gases como de la concentración de éstos en los cuerpos de agua.

La interacción del C, N y O con el agua brinda las características fisicoquímicas de los cuerpos de agua que a su vez generan de manera directa el flujo y concentración de los precursores de GEI en los cuerpos de agua, dependiendo de ésta su existencia y por ende su interacción con el medio.

Para comprender el aporte de los medios acuáticos a los GEI no podemos concebir a los sistemas terrestres y acuáticos como ecosistemas separados, sino como medios que interactúan entre ellos dándole un aporte global al conocimiento y entendimiento del cambio climático, puesto que uno depende directamente del otro y las alteraciones que sufran individualmente tendrán resultados globalmente, afectando los ciclos biogeoquímicos y biológicos que se dan en ellos.

Los cuerpos acuáticos contienen a la mayoría de los precursores de los GEI, por eso es de suma importancia contemplar sus emisiones en los inventarios globales; también se deben contemplar los sedimentos, ya que las emisiones comienzan en ellos.

La diversidad de métodos para calcular el flujo y la concentración de GEI, permite al investigador adecuarlo al sistema acuático al que se enfrente. Es posible usar más de un método para la validación y cotejo de datos, y la intención de ayudar a inferir cuál es el método con mayor universalidad para que los estudios cumplan con una de las premisas del método científico la repetividad o réplica de la experimentación.

BIBLIOGRAFÍA

- Abril, G., F. Guérin, S. Richard, R. Delmas, C. Galy-Lacaux, P. Gosse, A Tremblay, L. Varfalvy, M.A. Dos Santos y B. Matvienko (2005), "Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana)", *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 19, GB4007, doi:10.1029/2005GB002457.
- Abril, G., M.V. Commarieu y F. Guérin (2007), "Enhanced methane oxidation in an estuarine turbidity maximum", *Limnology and Oceanography*, 52(1): 470-475.
- Annick St-Pierre (2009), Measuring greenhouse gas in aquatic environments Eastmain EM1 reservoirs' net greenhouse emissions research project EM1, On line EASTMAIN1.ORG, consultado el 10 de agosto de 2011.
- Bridgham S.D., Updegraff K., Pastor J. (2001), "A Comparison of Nutrient Availability Indices Along Ombrotrophic- Minerotrophic Gradient in Minnesota Wetlands", *Soil Sci Soc Am J*, 65: 259-269.
- Cole, J.J. y N.F. Caraco (1998), "Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆", *Limnology and Oceanography*, vol. 43, no. 4, pp. 647-656.
- Cole, J.J. y N.F. Caraco (2001), "Carbon in catchments: connecting terrestrial carbon losses with aquatic metabolism", *Mar. Freshwater Res*, 52: 101-110.
- Cole, J.J., Y.T. Prairie, N.F. Caraco, W.H. McDowell, L.J. Tranvik, R.R. Striegl, C.M. Duarte, P. Kortelainen, J.A. Downing, J. Middleburg y J.M. Melack (2007), "Plumbing the global

- carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget", *Ecosystems*: 10. 1007/s10021-006-9013-8.
- De la Lanza Espino, Guadalupe (2008), *La importancia de los humedales en México*, Instituto de Biología, UNAM (http://www.smf.mx/C_Global/webHumedales.htm), consulta 14 septiembre, 2011.
- Delmas R., C. Galy-Lacaux y S. Richard (2001), "Emissions of greenhouse gases from the tropical hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) compared with emissions from thermal alternatives", en *Global Biogeochem. Cycles*, 15: 993-1003.
- Dipotet- Barcada P. y G. de la Lanza-Espino (2007), "Humedales y territorio con humedales", en: G. de la Lanza-Espino G., *Las aguas interiores de México, conceptos y casos*, AGT.
- Duchemin, E., M. Lucotte, R. Camuel y A. Chamberland (1995), "Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ by hydroelectric reservoirs in the boreal region", *Global Biogeochem. Cycles*, 9:529-540.
- Guérin, F. Y G. Abril (2007), "Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir", *Journal of Geophysical Research*, 112: G03006, doi: 10.1029/2006JG000393.
- Guérin F., Abril G., Tremblay A. y Delmas R. (2008), "Nitrous oxide emissions from tropical hydroelectric reservoirs", *Geophysical Research Letters* 35, doi: 10.1029/2007GL033057.
- Kelly C.A., J.W. Rudd (1997), "Increases in fluxes of greenhouse gases and methyl mercury following flooding of an experimental reservoir", *Env. Sci. Technol*, 31: 1334-1344.
- Keller M. y R.F. Stallard (1994), "Methane emissions by bubbling from Gatun Lake, Panama", *J. Geophys. Res*, 99, 8307-8319.
- Liikanen, A. (2002), "Greenhouse Gas and Nutrient Dynamics in lake Sediment and Water Column in Changing Environment. Kupio University Publications", *C. Natural and Environmental Sciences*, 147, 50 pp. ISBN 951-781-245-0, ISSN 1235-0486.
- Manahan, S. (2001), *Fundamentals of environmental chemistry*, Lewis Publishers, 1003 pp.
- Mengis M., Gächter R., Wehrli B. (1997), "Sources and Sinks of Nitrous Oxide (N₂O) in Deep Lakes", *Biochemistry*, 38: 281-301.
- Moya, Bárbaro V.; Hernández, A. E.; Elizalde Borrell, H. (2005), "Los humedales ante el cambio climático", *Investigaciones Geográficas*, no. 37, pp. 127-132.

- UNESCO/IHA (2008), *Assessment of the GHG status of freshwater reservoirs: scoping paper*, Working Group on Greenhouse Gas Status of Freshwater Reservoirs, International Hydrological Programme, 28 pp., IHP/GHG-WG/3.
- UNESCO/IHA (2009), *The UNESCO/IHA Measurement Specification Guidance for Evaluating the GHG Status of Man-Made Freshwater Reservoirs*, Edition 1 – June.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1997), *Volunteer stream monitoring: a methods manual*, Office of water (4503F) – EPA 841-B97-003, United States.
- Regina K., Nykänen H., Silvola J., Martikainen P.J., (1996), “Fluxes of Nitrous Oxide from Boreal Peatlands as Affected by Peatland Type, Water Table Level and Nitrification Capacity”, *Biogeochemistry*, 35: 401-418.
- Rodríguez Mellado, J. (1999), *Fisicoquímica de Aguas*, Madrid de Díaz Santos, 466 pp.
- Rosa, L.P. y R. Schaeffer (1994), “Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs”, *Ambio*, 23:164-165.
- Rudd, J.W.M., R. Harris, C.A. Kelly and R.E. Hecky (1993), “Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases?”, *Ambio* 22: 246-248.
- Soumis, N., E. Duchemin, R. Canuel and M. Lucotte (2004), “Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States”, *Global Biogeochem. Cycles* 18:doi:10.1029/2003GB002197.
- Therrien, J., A. Tremblay and R. Jacques (2005), “CO₂ emissions from semi-arid reservoirs and natural aquatic ecosystems, 233-250 pp., in Tremblay, A., L. Varfalvy, C. Roehm and M. Garneau(eds.), “Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments”, *Environmental Science Series*, Springer, New York.
- Tremblay A., Varfalvy L., Roehm C., Garneau M. (2005), *Greenhouse Gas emissions – Fluxes and Processes. Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments*, Springer, Berlin Heidelberg, New York.
- Tremblay, L. Varfalvy, C. Roehm and M. Garneau, (eds.) (2005), “Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environment”, *Environmental Science Series*, Springer, New York, 732 pp.
- Tremblay, A. Y J. Bastien (2009), *Greenhouse Gases Fluxes Water Bodies in Québec, Canada*, Verh. Internat. Verein. Limnol, vol. 30, part 6, pp. 866-869.

EMISIONES DE BIÓXIDO DE CARBONO Y METANO EN SUELOS DE HUMEDALES

Elizabeth Fuentes-Romero¹, Liliana del Carmen Valdez-Arenas¹,

Norma Eugenia García-Calderón¹

¹*Laboratorio de Edafología, UMDI-Facultad de Ciencias-Juriquilla,*

Universidad Nacional Autónoma de México

RESUMEN

El objetivo es conocer las emisiones y la dinámica de CO₂ y CH₄ en suelos de humedales. Las muestras de gases se obtuvieron con cámaras estáticas y fueron analizadas por cromatografía. Las emisiones de CO₂ y CH₄ en los sitios con pastizales siguieron similar tendencia donde la época cálida y húmeda presentó la mayor emisión CO₂, en tanto que la época fría y de menor humedad fue la de mayor emisión de CH₄. Los valores de los flujos estuvieron en un rango de 2.35 a 393 mg m² h⁻¹, en tanto que CH₄ tuvo un rango de 0.11 a 0.53 mg m² h⁻¹. Los suelos de humedales con diferentes usos de suelo pueden ser considerados como fuentes emisoras de GEI, que son reguladas por diferentes periodos de humedad y de secas, por lo que la emisión es un proceso intermitente, en particular la del metano.

Palabras clave: Fuentes de emisión, flujos de GEI, suelos de humedales.

EMISSIONS OF CARBON DIOXIDE AND METHANE IN WETLAND SOILS

ABSTRACT

The aim was to determine emission and dynamics of CO₂ and CH₄ in wetland soils. The gas samples were obtained with static cameras and were analyzed by gas chromatography. Emissions of CO₂ and CH₄ in the grassland sites followed similar trend where warm and wet season has the highest CO₂ emissions, while the cold weather and lower humidity had the largest emission of CH₄. Flow values ranged from 2.35 to 393 mg m⁻² h⁻¹, while CH₄ ranged from 0.11 to 0.53 mg m⁻² h⁻¹. Wetland soils with different management can be considered as GHG emission sources, which are regulated by different periods of moisture and drought so the issue is an intermittent process, including methane.

Key words: GHG's efflux, wetland soil, emission source.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático global se ha atribuido al incremento en la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI) a partir de la Revolución Industrial (Lal, 2001). El aumento de la concentración de GEI se ha asociado al aumento de la temperatura del planeta en los últimos 50 años, en aproximadamente 0.6° C (Le Treut *et al.*, 2007). Esto conlleva modificaciones en los patrones e intensidades de precipitación, cambios en extensión de hielo, en frecuencia, duración e intensidad de heladas, disminución en la frecuencia de temperaturas bajas extremas y aumento en la frecuencia de altas temperaturas extremas (IPCC, 2001; Gorissen *et al.*, 2004; Seip y Wenstop, 2006; Le Treut *et al.*, 2007).

El CO₂ y CH₄ son considerados como unos de los principales GEI (Foster *et al.*, 2007) y sus concentraciones han variado en los últimos años. La concentración del CO₂ en la atmósfera se incrementó cerca de 32% (0.55 gm⁻³ o 280 ppm) en 1700 y de 0.727 g m⁻³ (370 ppm) en 2000, donde las fuentes principales de emisión han sido

atribuidas a los combustibles fósiles, la deforestación, los suelos cultivados, manufactura industrial, cemento y fertilizantes (Lal, 2001). En el caso del metano, en los últimos dos siglos ha incrementado a 29 ppb por volumen (ppbv año⁻¹) (Dlugokencky *et al.*, 1994) y, debido a que tiene una alta capacidad de radiación hasta 21 veces mayor que el CO₂ (Thompson, 1992), por lo que su importancia dentro del proceso del cambio climático es muy importante. Las fuentes generadoras de estos gases están, en general, relacionadas con la producción de rumiantes, un incremento en la producción de arroz bajo inundación y la explotación de fuentes naturales de CH₄ (Powlson *et al.*, 1997).

El suelo es considerado como una fuente importante de CH₄ y CO₂, ya que existe un intercambio de gases neto en función de la actividad biológica al descomponer la materia orgánica (Lekphet *et al.*, 2005). La emisión de los gases, por el suelo, se relaciona con los procesos de producción, consumo, transporte y se encuentra regulada por la temperatura y la humedad ambiental (Alm, 1997, figura 1), así como por las propiedades del suelo, ya que inciden directamente sobre la actividad microbiológica (Merino *et al.*, 2004). Las variables edáficas asociadas al procesos de emisión son el pH, Eh, concentración de NO₃⁻ y NH₄⁺, humedad, textura y estructura; así como las diferentes perturbaciones en el suelo causadas por manejo (Castro-Silva *et al.*, 2008, Merino *et al.*, 2004), por ejemplo, se ha observado que los mayores valores de emisión se presentan de 40 a 80% de humedad, comparado con las muestras a 100% de humedad (WHC) (Castro-Silva *et al.*, 2008).

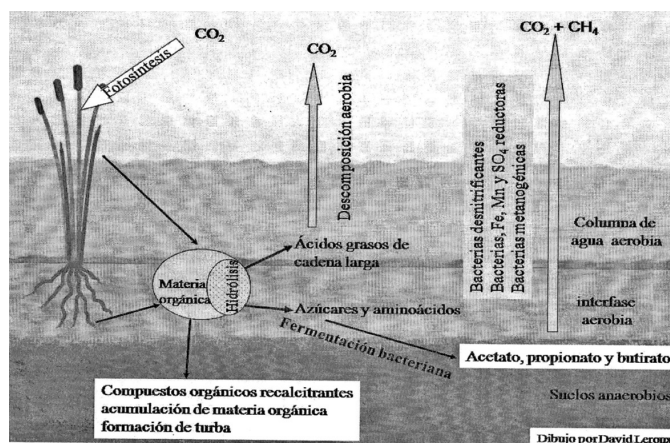
El incremento de la tasa de emisión del GEI por cambio de las propiedades y manejo del suelo afecta de manera directa los almacenes del C y conlleva flujos de GEI (CO₂, CH₄ y N₂O) del suelo a la atmósfera (Lal, 2001, Patiño-Zúñiga *et al.*, 2009). La emisión de CO₂ y CH₄ de suelos cultivados es 1.2 veces mayor que en suelos sin manejo (Patiño-Zúñiga *et al.*, 2009). Otro tipo de manejo como es el drenado artificial del suelo por varios años provoca una emisión significativamente mayor de CO₂ que los suelos sin drenar o drenados por un año (Luna-Guido *et al.*, 2000). También se ha observado que en suelos que se encuentran bajo manejo bajo riego con aguas residuales incrementa la cantidad de CO₂ y CH₄ emitida a la atmósfera (Fernández-Luqueño *et al.*, 2010). Los suelos de humedales han sido reconocidos como unos de los sumideros de carbono más importantes en los ecosistemas, ya que en muchos

de ellos se establecen importantes procesos de acumulación y descomposición de la materia orgánica, que dirigen el proceso de formación del suelo bajo condiciones de anaeróbicas (Collins y Kuehl, 2001, figura 1).

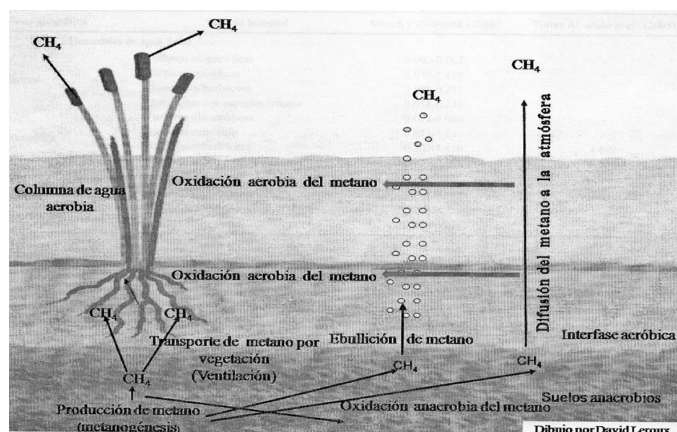
Figura 1

FORMAS DE CARBONO EN SUELOS DE HUMEDALES A) PROCESOS BIOQUÍMICOS INVOLUCRADOS EN LA EMISIÓN DE CO_2 Y CH_4 , B) PROCESO DE EMISIÓN DE METANO DE LOS SUELOS DE HUMEDALES

a)



b)



Imágenes obtenidas de Hernández, 2010.

La acumulación de la materia orgánica del suelo se debe básicamente a la falta de O_2 durante los periodos de inundación por agua, y por la inhibición de los efectos de los ácidos orgánicos y el crecimiento de la materia orgánica (Bohn *et al.*, 1985). La acumulación de materia orgánica en los suelos de humedales, generalmente se establece en la superficie del suelo y disminuye en la profundidad, lo que demuestra la incorporación continua de material orgánico fresco en la superficie; así como la pérdida de carbono en los eventos de la inundación y a la baja descomposición microbiana de los residuos orgánicos en los horizontes profundos, causando bajas concentraciones de materia orgánica (Richardson y Bigler, 1894). La acumulación de carbono es el resultado de la actividad primaria y la deposición y acumulación de sustancias orgánicas autóctonas menos la descomposición de la materia orgánica en el suelo. Este balance determina si el sistema está funcionando como un almacén o una fuente de carbono en el suelo. En diversos suelos de humedales se ha observado que el almacén de carbono oscila entre 470 y 2902 Mg C ha⁻¹ (Hernandez, 2010).

Los humedales son considerados como importantes fuentes de GEI en particular de CH_4 y CO_2 (Keshab *et al.*, 2005) debido a los procesos bioquímicos relacionados con las épocas de inundación y de desecación del suelo (Richardson y Vepraskas, 2000). Esto conlleva procesos de anaerobiosis donde el CH_4 se produce por reducción y es oxidado para su transformación a CO_2 o es asimilado por la biomasa microbiana (Moonley *et al.*, 1987). Estos procesos en los suelos de humedal han llevado a considerar su importante papel funcional en el proceso de mitigación de gases de efecto invernadero. La oxidación del CH_4 es ambientalmente benéfica debido a su actividad radiactiva (Thompson 1992), pero es importante considerar que el proceso de oxidación es muy sensible a las perturbaciones y al cambio de uso de suelo y a las prácticas agrícolas, ya que pueden alterar el potencial oxidativo del suelo (Ojima *et al.*, 1993).

Dentro de los humedales, los pastizales con inundación permanente y temporal son considerados como importantes fuentes de carbono debido a que tienen una alta producción primaria por lo cual incrementan la materia orgánica del suelo (Unger, 2001). Las emisiones encontradas en algunos pastizales han evidenciado una emisión de CO_2 $\mu g\ 206 \pm 20\ m^{-2}\ h^{-1}$ y de $\mu g\ CH_4$ de $14.0 \pm 2\ m^{-2}\ h^{-1}$ (Keshab *et al.*, 2005).

En México son pocos los estudios relacionados con los gases efecto invernadero, y la mayoría de éstos se centran en el sector industrial, mientras que en ecosistemas naturales, la mayoría de estudios se enfoca en bosques y sistemas de cultivo, y los menos se concentran en ecosistemas de humedales (Cerón-Beltrón *et al.*, 2011). En el sector industrial existe, desde 2001, el “Programa Gases Efecto Invernadero México” (GEI México), coordinado por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y la Comisión de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo sustentable (Cespedes), en colaboración con el Instituto Mundial de Recursos (WRI) y el Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sustentable, World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), cuyos objetivos son: preparar inventarios corporativos de gases de efecto invernadero, y cuantificar y documentar proyectos de reducción de emisiones. En este programa actualmente hay inscritas 125 empresas que realizan estimaciones de emisiones de GEI para posteriormente crear estrategias de mitigación (www.geimexico.org). El instituto de Ecología crea el Programa del Cambio Climático. Uno de sus objetivos principales es crear y actualizar el Inventario Nacional de Emisiones Gases Efecto Invernadero (www.ine.gob.mx/cclimatico). La última actualización es para el año 2006, abarcando desde 1996 y en el que se contemplan los siguientes campos de emisión: procesos industriales, agricultura, uso de suelo, cambio de uso de suelo, silvicultura y desechos. Por otro lado, en 2005 se crea el Programa Mexicano del Carbono, cuyo objetivo general consiste en el estudio de la dinámica del carbono en los diferentes ambientes de México y sus interacciones socio-ambientales, en ecosistemas acuáticos, terrestres y la atmósfera (www.pmcarbono.org).

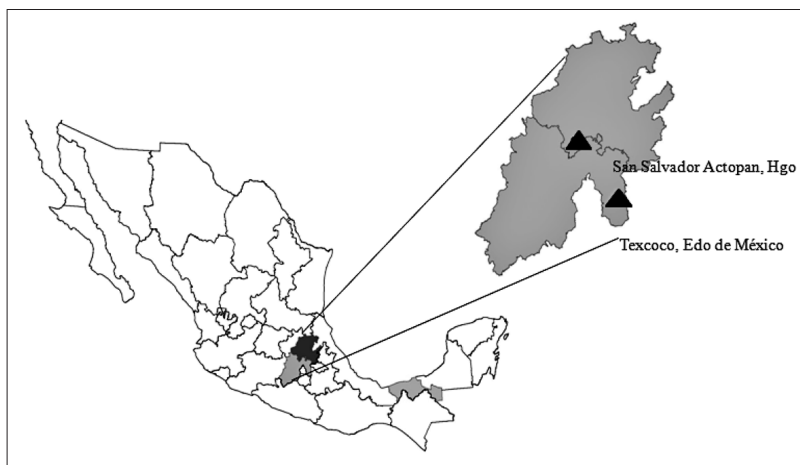
Debido a la importancia que tienen los GEI en la dinámica del calentamiento global en México, a la existencia de un importante porcentaje de zonas de humedales en nuestro país y debido a los pocos estudios detallados sobre los procesos bioquímicos y el intercambio de gases en los humedales mexicanos, es indispensable conocer el papel que juegan como fuentes de emisión de GEI en particular del CO₂ y CH₄. El presente trabajo tiene como objetivo conocer la emisión de CO₂ y CH₄ en diferentes humedales y determinar su importancia como fuentes de gases efecto invernadero.

METODOLOGÍA

Las mediciones de CO_2 y CH_4 se evaluaron en Texcoco, Estado de México, San Salvador Actopan, Hidalgo (figura 2).

Figura 2

LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO CONSIDERADOS COMO HUMEDALES DE CARÁCTER PERMANENTES E INTERMITENTES EN MÉXICO



Los sitios establecidos tuvieron un manejo pastizales con inundación temporal Texcoco (PIT-T), pastizales-plantación forestal Texcoco (P_PF-T) y manejo de pastizales con inundación temporal. San Salvador (PIT-SS) (Cuadro 1).

Cuadro 1

CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO BAJO DIFERENTE MANEJO DE SUELO EN SUELOS DE HUMEDALES DE TEXCOCO EDO. DE MÉXICO Y SAN SALVADOR ACTOPAN, HIDALGO

<i>Sitios</i>	<i>Micrositios uso de suelo</i>	<i>Localización geográfica</i>
Texcoco, Estado de México	Pastizal inundado temporal <i>Distichlis spicata</i>	19°24' y 19°35' LN; 98°41' y 98°52' LO 1941 msnm

	Pastizal-plantación forestal	
	<i>Casuarina sp</i>	
	<i>Eucaliptus sp</i>	
	Pastizal inundado temporal	
San Salvador, Actopan,	<i>Bouteloua eriopoda</i>	20°16'54.9" LN; 99°01'00.01" LO
Hidalgo	<i>B. Scopiodes</i>	1950 m snm

Elaboración propia.

Los sistemas presentan condiciones ambientales heterogéneas. Las condiciones climáticas de Texcoco, Estado de México son templado subhúmedo con una temperatura media anual de 15.6°C y precipitación anual de 551.7 mm. Los suelos de este sitio son considerados como solonchacks, vertisoles y entisoles (Gutiérrez y Ortiz, 1999). San Salvador Actopan es semiseco-templado con una temperatura media anual de 18°C y precipitación anual de 436.3 mm (CNA-SMN, 2010). Los suelos dominantes son los vertisoles, rendzinas con fase pretélica, phaeozem y leptosoles (INEGI, 1992). Los pantanos de Centla tienen condiciones climáticas de cálido húmedo con lluvias en verano con una temperatura media anual de 26.8°C y una precipitación anual de 1647.1mm. Los suelos son aluviales y son considerados como solochaks, histosoles, gleysoles, vertisoles y fluvisoles (INEGI 1989, CONABIO, 2010).

La evolución del CO₂ y CH₄ se llevaron acabo de septiembre de 2008 a noviembre de 2009 en PIT-T y P-PFT, en tanto que para PIT-SS se realizó de septiembre 2008 a mayo 2009. Las mediciones se realizaron en intervalos de 15 días. En cada uno de los sitios se establecieron parcelas permanentes de 2.5 X 10 m para monitorear la evolución de gas, en ésta se colocaron cuatro bases permanentes para la toma de muestras de gases (cuatro réplicas). La concentración de los GEI se obtuvieron de cámaras estáticas de aluminio pre-ensambladas de 30 X 20 X 50 cm durante intervalos de tiempo de 0 a 30 min bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad, en general se realizaron mediciones diurnas de 7 a 12 h del día. Las muestras de gas fueron colectadas en tubos viales sellados con septas de butilo de 20 mm para transferir las muestras de gas dentro de tubos del 20 ml evacuados con vacío.

Las muestras de gas fueron tomadas mediante agujas de dos vías a través de los septas que se colocaron en las cámaras estáticas. El análisis de gases se llevó a cabo en un Cromatógrafo de Gases Agilent 6890 con un detector FID y una columna Porapack Q. Las concentraciones de gases fueron obtenidas mediante la interpolación de datos de una curva de calibración realizada con estándares de concentración conocidas de CO_2 (0, 30.2, 450 ppm) y CH_4 (0, 15 50.3 ppm). Durante el intercambio de gases se midieron la temperatura del aire, del suelo (a 5 cm de profundidad) y de la cámara estática; así como la humedad del suelo (a 5 cm de profundidad) y presión atmosférica.

En general, se realizó una prueba de análisis de varianza (Anova), utilizando una prueba de T de LSD para determinar las diferencias significativas ($P < 0.05$) en la emisión bajo los diferentes usos de suelo, para esto se utilizó Statistic 7 (Soft Statistic). Cálculos básicos y curvas se realizaron con Excell (Microsoft).

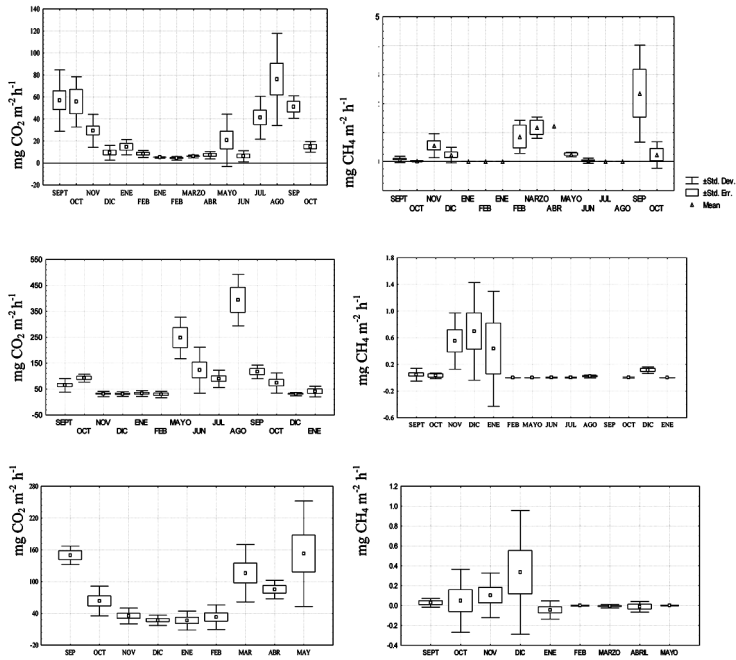
RESULTADOS

Evolución estacional del CO_2

La evolución de CO_2 muestra un marcado patrón estacional en los diferentes usos de suelo (figura 3). La emisión CO_2 se estableció en los tres sitios entre los meses de mayo a septiembre (figura 3a). En el uso de suelo PIT-SS se establecen otras fuentes de emisión en el mes de marzo a mayo y en septiembre-octubre (figura 3c). La tasa de evolución de CO_2 fue mayor en PIT-T que en los otros usos de suelo (cuadro 2). Por lo que el sitio con mayor evolución de CO_2 fue mayor en Texcoco en P-PF-T ($99.4 \pm 103.06 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) y San Salvador en PIT-SS tuvo la tasa más baja ($76.4 \pm 51.9 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). La mayor tasa de emisión en diciembre, excepto para PIT-T donde se estableció en septiembre posiblemente relacionado con la alta temperatura y humedad del sitio (figura 3a). En cuanto a la influencia del tipo de manejo de suelos respecto a la tasa de evolución de CO_2 no se encontraron diferencias ($P < 0.05$) significativas entre los tipos de manejo (cuadro 2 y figura 4).

Figura 3

EVOLUCIÓN DE CO₂ Y CH₄ EN HUMEDALES BAJO MANEJO DE PASTIZAL. A) PIT EN TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, B) P-PF EN TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO; C) PIT EN SAN SALVADOR ACTOPAN, HIDALGO. LAS BARRAS INDICAN LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y LAS CAJAS EL ERROR ESTÁNDAR



Cuadro 2

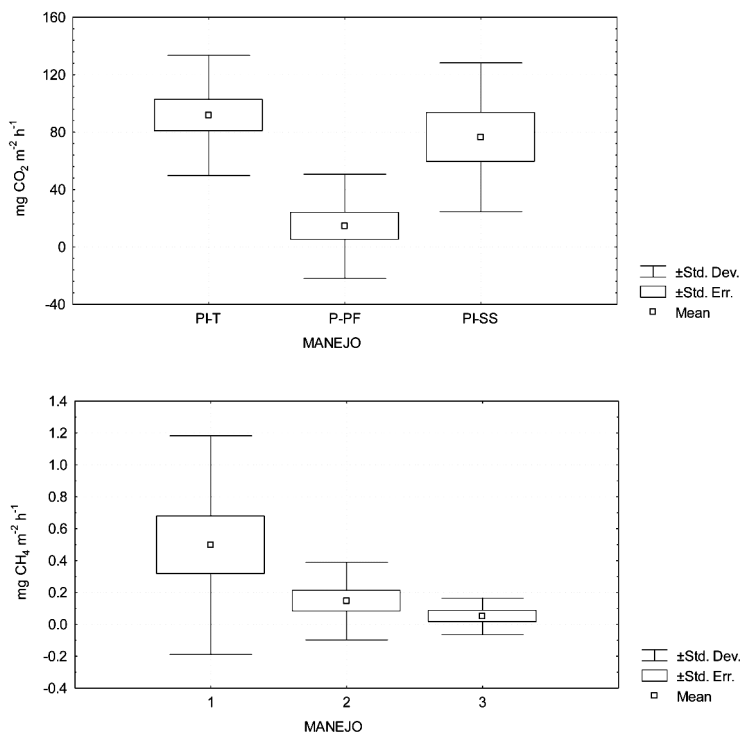
EMISIÓN DE CH₄ Y CO₂ EN SUELOS DE HUMEDALES BAJO MANEJO DE PASTIZAL INUNDABLE. ANÁLISIS DE VARIANZA (DF = 2, F= 12.5; P < 0.05) CON Y PRUEBA DE LSD P<0.05. ANÁLISIS DE ANOVA MOSTRÓ DIFERENCIAS EN LA EVOLUCIÓN DE CO₂ Y DIFERENCIAS RESIDUALES EN CH₄

Uso de suelo		Evolución CO ₂ (mg CO ₂ m ² h ⁻¹)		Flujo de CH ₄ (mg CO ₂ m ² h ⁻¹)	
		Promedio	Rango	Promedio	Emisión
Texcoco, Estado de México	PIT-T	91.6±41.9 a	30.7 – 197.7	0.43±0.66 a	0.01 - 2.35
	P-PF-T	99.4±103.06 b	29.0 – 393.0	0.14±0.23 a	0.002 – 0.69
San Salvador Actopan, Hidalgo	PIT-SS	76.4±51.9 a	26.4 – 152.6	0.05±0.011b	0.001 – 0.33

PIT Pastizal inundación temporal, P-PF-Pastizal asociado a plantación forestal.

Figura 4

EFFECTO DEL USO DE SUELOS EN LA EMISIÓN DE CO_2 Y CH_4 EN SUELOS DE HUMEDALES DE TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO Y SAN SALVADOR HIDALGO



Evolución estacional de CH_4

La evolución de metano del suelo bajo diferente uso de suelo mostró una marcado patrón estacional (figura 3). P-PF-T y PIT-SS fueron fuentes netas de emisión en los meses de de octubre a enero, en la época seca y fría. La emisión de PIT-T presentó mayor variación siendo una mayor fuente en el mes de septiembre (figura 3a). La tasa de emisión se estableció en P-PF-T entre 29 a 339 $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. En cuanto a las diferencias entre el manejo de suelo sobre el flujo de metano no se encontraron

diferencias residuales y al realizar la prueba de LSD ($p < 0.05$) se obtuvieron diferencias entre los manejos que se presentan en Texcoco y PIT-SS en San Salvador (cuadro 2).

DISCUSIONES

La evolución de CO₂

La evolución de CO₂ se diferencia significativamente ($P < 0.05$) entre los tres usos de suelo, siendo mayor en P-PF-T que en PIT-T y PIT-SS (cuadro 2; figura 4). El tipo de vegetación en el manejo del suelo puede influenciar de manera importante el microambiente afectando directamente la actividad microbiana y actividad radicular (Awashi *et al.*, 2005). También se puede considerar que los cambios y los procesos físicos y químicos del suelos contribuyen en el cambio en la tasa de evolución del CO₂, entre éstos se encuentran la salinidad y alcalinidad del suelo, que sobre todo se establece en los usos establecidos en Texcoco (Castro-Silva *et al.*, 2008). Los principales picos de flujo se establecieron en los diferentes usos de suelo entre julio a octubre que puede relacionarse con la época de mayor humedad y temperatura en la zona, lo que puede causar un incremento en la descomposición de la materia orgánica del suelo y un incremento en la tasa de mineralización del carbono orgánico (Yavitt *et al.*, 2005, Mukhopadhyay, 2002); así como la descomposición de materia orgánica fácilmente degradable, ya que se ha visto que los suelos forestales tienen mayor cantidad de carbono orgánico lábil, que otros suelos con otro uso de suelo, por lo que se presentan una mayor emisión (Sjögersten and Wookey, 2002).

La alta respiración en el caso del P-PF-T puede deberse a la presencia de un contenido alto de carbono proporcionado por el pasto, ya que se ha visto que este tipo de vegetación tiene alta producción primaria (Unger, 2001). La variación estacional puede relacionarse con las diferentes condiciones climáticas. La humedad del suelo puede afectar las reacciones biológicas, incluyendo la respiración heterotrófica de los organismos y las raíces de las plantas, ya que se ha visto que una alta cantidad de

agua reduce significativamente la evolución del CO_2 del suelo (Awasthi *et al.*, 2005). Los principales picos de emisión de CO_2 se dieron entre julio y octubre, donde se presenta la mayor época de alta humedad y alta temperatura, en los sitios de estudio, bajo estas condiciones puede haber un incremento en la descomposición de la materia orgánica del suelo y un incremento en la tasa de mineralización del carbono orgánico (Mukhopadhyay, 2002); así como las entradas continuas de material orgánico al sistema (Keshab *et al.*, 2005, Unger, 2001).

LA EVOLUCIÓN DE CH_4

Los sitios de estudio presentaron flujos de metano al ambiente, este proceso es indicativo de las condiciones de óxido-reducción para la emisión y producción de CH_4 (Hernández, 2010), ya que en estos suelos se han registrado evidencias de procesos de gleyización en los horizontes profundos en los suelos (Valdés-Arenas en elaboración). La marcada estacionalidad de la dinámica de emisión puede relacionarse con procesos de incremento y decremento de la producción y oxidación del metano en el sistema, ya que se ha visto hay oxidación del CH_4 relacionado con los cambios de temperatura (Tamai *et al.*, 2003), con la humedad sobre todo en zonas secas (Christensen, 1993) y aireación (Keshab *et al.*, 2005). La presencia de procesos de emisión de CH_4 en dos de los sitios de estudio, en el periodo de octubre a diciembre, puede asociarse con una continua saturación del suelo que permite se desarrolle en proceso de producción de CH_4 (Hernández, 2010). En particular en Texcoco se ha evidenciado que el manto freático se encuentra entre los 80 y 150 cm (Gutiérrez-Castorena, 1997), por lo que su influencia en el suelo permite el desarrollo de procesos de anaerobiosis. Así como la presencia de picos de emisiones de manera temporal el sitio PIT-T puede relacionarse con la fluctuación de la saturación de humedad en la zona.

La diferencias en los flujos de CH_4 en los humedales se asocia con el tipo manejo y de vegetación (Awashi *et al.*, 2005). En este caso observamos ligeras diferencias en los flujos en dos sistemas de pastizales, si bien los procesos de producción se encuentran influenciados por el manejo y condiciones de temperatura humedad

(Keshab *et al.*, 2005, Ali *et al.*, 2006) también hay otros factores como las propiedades y procesos de los suelos que inciden en la dinámica de emisión de metano, visto que la salinidad y la alcalinidad regulan el desarrollo de las comunidades metanogénicas (Baldwin *et al.*, 2006, Castro-Silva *et al.*, 2008); así como factores como la humedad del suelo, la textura de calcio, nitrógeno y manganeso inciden en la producción de CH_4 (Yavitt *et al.*, 2005).

CONCLUSIONES

Los suelos de humedales de los sitios estudiados son fuentes de emisión de CO_2 y CH_4 de manera temporal. El orden de emisión de CO_2 entre los sitios fue P-PF-T > PIT-T > PIT-SS y P, en tanto que para CH_4 los flujos fueron mayores en PIT-T > P-PF-T > PIT-SS. Los flujos de metano dependen del uso del suelo, en tanto que la dependencia para el CO_2 fue clara. La mayor emisión de CO_2 en los sitios de estudio se presentó en la época húmeda y cálida, de mayo a septiembre. La mayor emisión de CH_4 se estableció de octubre a diciembre época fría.

BIBLIOGRAFÍA

- Alm J., Talanov A., Saarnio S., Silvola J., Ikkonen E., Aaltonen H., Nykä Awashi *et al.* (2005), en H, Martikainen PJ. (1997), "Reconstruction of the carbon balance for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland", *Oecología*, 110, 423-431.
- Ali M., Taylor D., Inubusi K. (2006), *Effects of environmental variation on CO_2 efflux from a tropical peatland in eastern Sumatra*, Wetland, 26(2), 612-618.
- Baldwin D.S., Rees G.N., Mitchel A.M., Watson G., Williams J. (2006), *The short-term effects of Salinization on anaerobic nutrient cycling and microbial community structure in sediment from a freshwater wetland*, Wetlands, 26(2), 445-464.
- Bohn H., McNeal B.L., O'Connor G.A., (1985), Soil Chemistry, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.

- Collins M.E., Kuehl, R.J., (2001), "Organic Matter Accumulation and Organic Soil", in *Wetland Soil. Genesis, Hydrology, Landscape and Classification*, Lewis Publisherd, USA.
- Castro-Silva C., Luna-Guido M., Ceballos J.M., Marsch R. y Dendooven L. (2008), "Production of carbon dioxide and nitrous oxide in alkaline soil of Texcoco at different water contents amended with urea: A laboratory study". *Soil Biology & Biochemistry*, 40:1813-1822.
- Cerón-Beltrón J.G., Cerón-Beltrón R.M., Rangel-Marrón M., Muriel-García M., Córdova-Quiróz A.V., Estrella-Cahuich A. (2011), "Determination of carbon sequestration rate in soil of mangrove forest in Campeche, México", *International Journal of Energy and Environment*, 3:328-336.
- Fernández-Luqueño F., Reyes-Varela V., Cervantes-Santiago F., Gómez-Juárez C., Santillán-Arias A., Dendooven L. (2010), "Emissions of carbon dioxide, methane and nitrous oxide from soil receiving urban wastewater for maize (*Zea mays*) cultivation", *Plant Soil*, 331: 203-215.
- INEGI (1984), Carta Edafológica, escala 1:250 000 calve XXXX. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, INEGI, 1992, Síntesis geográfica del estado de Hidalgo, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, pp. 78-81.
- Luna-Guido M.L., Beltrán-Hernández R.I., Solís-Ceballos N.A., Hernández-Chávez N., Mercado-García F., Catt J.A., Olalde-Portugal V. y Dendooven L. (2000), "Chemical and biological characteristics of alkaline saline soils from the former Lake Texcoco as affected by artificial drainage", *Biology and Fertility of Soils*, 32:102-108.
- Merino A, Pérez-Batallón P., Macías F. (2004), "Influencia del suelo y el manejo agrícola sobre la dinámica del CH₄ del suelo en el norte de España", *Edafología* 11(2):207-219.
- Moonley H.A., Votousek P.M., Matson P.A., (1987), "Exchange of material between terrestrial ecosystem and atmosphere", *Science* 238:926-932.
- Mukhopadhyay S.K., Biaswas H., De T.K., Sen B.K., Sen S., Jana T.K., (2002), "Impact of Sundarban Mangrove biosphere on Carbon dioxide and methane mixing ratio at the NE Cost of Bay of Bengal, India", *Atmosphere Environmental*, 36, 629-638.
- Patiño-Zúñiga L., Ceja-Navarro J.A., Govaerts B., Luna-Guido M., Sayre K.D. y Dendooven N. (2009), "The effect of different tillage and residue management practices on soil characteristics, inorganic N dynamics and emissions of N₂O, CO₂ and CH₄ in central highlands of Mexico: a laboratory study", *Plant Soil*, 314:231-241.

- Ojima D.S., V. D. (1993), "Effects of land use change on methane oxidation in temperate forest and grassland soil", *Chemosphere*, 26, 675-685.
- Unger, P.W. (2001), "Total Carbon, Aggregation, bulk density, and penetration resistance of cropland and nearby grassland soil", en L. R, *Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effects* (págs. 77-92), Madison, WI, USA: SSSA Special publication, núm 57.
- Powlson D.S., G. K. (1997), "The effects of agriculture in methane oxidation in soil", *Nutr Cycl Agroecosyst*, 49, 59-70.
- Sjörgersten S, Wookey P.A. (2002), "Climate and resource quality controls on soil respiration across a forest-Tundra ecotone in Swedish Lapland", *Soil Biol Biochem* 34, 1633-1645.
- Thompson A.P. (1992), The Oxidizing Capacity of the Earth's Atmosphere: Probable Past and Future Changes, *Science* 256, 1157-1165.
- Yabith J.B., Williams C.J., Wieder R.K. (2005), Soil Chemistry versus environmental control on production of CH₄ and CO₂ in northern peatlands, *European Journal of Soil Science*, 56, 169-178.

www.geimexico.org

www.ine.gob.mx/cclimatico

www.pmc carbono.org

Ambientes productivos

ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE CULTIVOS ANDINOS

Emmanuel Zapata-Caldas^{1,2}, Andy Jarvis^{1,3}

Julián Ramirez^{1,3,4}, Charlotte Lau³

¹ *Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Colombia*

² *Universidad San Francisco de Quito, Ecuador*

³ *Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS)*

⁴ *Institute for Climatic and Atmospheric Science,
School of Earth and Environment, University of Leeds, United Kingdom*

RESUMEN

El objetivo del estudio es evaluar el impacto del cambio climático (CC) en términos de área afectada, sobre 25 cultivos importantes en los Andes tropicales. Además, estimar los impactos económicos de cinco cultivos que representen diferentes grupos alimentos. Se utilizaron modelos de nicho ecológico para generar proyecciones de distribución potencial actual y futura. Los resultados del cambio en aptitud climática de los cultivos fueron los insumos para estimar los impactos. Para el año 2050 los porcentajes de área potencial con pérdida de aptitud climática, reportados en toda la región, serían: 72.1% para café, 83.2% para frijol, 64% para papa, 79.3% para tomate y 74.3% para trigo, entre otras cifras llamativas. De tomarse las medidas necesarias hoy, la

región podría ser menos vulnerable. Como estrategia a mediano y largo plazo (10 y 40 años, respectivamente), un enfoque multidisciplinar (agronómico, económico, social) en el sector agrícola de los Andes tropicales, contribuiría en los emprendimientos de adaptación a los efectos del cambio climático.

Palabras clave: impacto climático, modelos de nicho ecológico, andes tropicales.

ABSTRACT

To assess the climate change (CC) impact, in terms of area affected, on 25 major crops in the tropical Andes. In addition, to estimate economic impacts of five crops that represents different food groups. Use of ecological niche models to generate projections of current and future potential crop distribution. Climatic suitability crops change results were the inputs to estimate impacts. By 2050, percentage of potential area with loss in climatic aptitude throughout the region are coffee 72.1%, 83.2% for beans, 64% for potato, tomato and 79.3% to 74.3% for wheat, among other striking numbers. If we take the necessary steps today, the region could be less vulnerable. As medium-and long-term strategy (10 and 40, respectively), a multidisciplinary approach (agronomic, economic, social) in the agricultural sector of the tropical Andes would contribute to the adapting efforts to CC effects.

Key words: climatic impact, ecological niche modeling, tropical andes.

INTRODUCCIÓN

El mundo se ha visto sorprendido por el comportamiento del clima en las últimas décadas. Tal comportamiento ha sido consecuencia del incremento y acumulación de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, principalmente durante el siglo XX. Este hecho ha puesto a la humanidad en una encrucijada para la cual no estaba preparada o, más bien, de la cual no era consciente. De allí que el tema del CC se haya convertido en uno de gran relevancia en la actualidad. Según

proyecciones climáticas, el sector agrícola de los Andes tropicales no estaría exento de los posibles cambios en la atmósfera y sería muy probable que la economía ligada del sector se viese golpeada de cara al futuro. Tal situación es preocupante sabiendo que aproximadamente 129 millones de habitantes (22.7% de la población en América Latina) dependen de la agricultura en la región. Por lo tanto, a fin de generar senderos de adaptación, resulta necesario crear proyecciones sobre el probable impacto del clima en cultivos que contribuyen al sustento alimentario y económico de la región para evaluar tanto los efectos negativos como las posibles oportunidades.

Es por eso que el presente trabajo propuso evaluar el impacto probable del CC sobre la distribución potencial (actual y futura) y el área cosechada actual de 25 cultivos importantes en la región. Se usaron dos escenarios de emisiones (SRES, por sus siglas en inglés); A1B y A2, para los periodos 2010-2039 (2020) y 2040-2069 (2050). Los modelos de clima global (GCMs, por sus siglas en inglés) provinieron del Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés); diez para SRES-A1B y ocho para SRES -A2. Las proyecciones de distribución y aptitud climática potencial actual y futura se realizaron con EcoCrop (Hijmans *et al.*, 2005) —un modelo de nicho ecológico orientado a la predicción de un índice de aptitud climática con base en parámetros básicos de crecimiento de la especie en cuestión (temperaturas y precipitaciones óptimas y absolutas)— y MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006) —un modelo de nicho ecológico usado para predecir la distribución de especies (probabilidad de ocurrencia)—. La utilización de los dos modelos permitió cuantificar el porcentaje de área con aptitud climática de los cultivos, los posibles cambios en dicha aptitud, el porcentaje de área impactada positiva y negativamente, entre otros datos.

El proceso llevó consigo diferentes limitaciones, entre las cuales se pueden mencionar carencia de información sobre presencia de cultivos e incertidumbre en las proyecciones de los modelos, entre otros. Como recomendaciones de este análisis se debe mencionar que son necesarias acciones a corto y largo plazo, de esa manera se priorizaría la inversión de recursos y se establecerían senderos de adaptación desde tres posturas: 1) gestión del riesgo (corto plazo), 2) adaptación al cambio climático progresivo (largo plazo), y 3) la mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI).

METODOLOGÍA

Selección de 25 cultivos importantes en los andes tropicales

El cuadro 1 comprende información de los 25 cultivos analizados, describiendo el rango altitudinal en el que por lo general suelen encontrarse. Las premisas para la selección de los cultivos fueron dos; la primera, que se encontraran por encima de 500 metros sobre el nivel del mar (msnm) y, la segunda, que fueran importantes para la región en términos de áreas cosechadas, producción y redimiento, además de ser cultivos importantes para comunidades minoritarias alto-andinas (por ejemplo, comunidades indígenas).

Cuadro 1
SELECCIÓN DE 25 PRINCIPALES SISTEMAS PRODUCTIVOS EN ÁREA DE ESTUDIO

No.	Cultivo	Nombre científico	Rango altitudinal (msnm)
1	Arracacha	<i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.	600 – 3,500
2	Arroz	<i>Oryza sativa</i> L.	0 – 2,500
3	Arveja	<i>Pisum sativum</i> L.	2,700
4	Banano	<i>Musa sp.</i> L.	0 – 1,600
5	Café	<i>Coffea Arabica</i> L.	1,300 – 1,800
6	Camote	<i>Ipomoea batatas</i> L.	0 – 2,800
7	Cebada	<i>Hordeum vulgare</i> L.	0 – 3,250
8	Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	0 – 3,000
9	Lechuga	<i>Lactuca sativa var. capitata</i> L.	3,000
10	Maíz	<i>Zea mays</i> L.	0 – 3,800
11	Naranja	<i>Citrus sinensis</i> Osbeck	0 – 2,100
12	Papa	<i>Solanum tuberosum</i> L.	400 – 4,500
13	Papaya	<i>Carica papaya</i> L.	0 – 2,100
14	Pepino	<i>Cucumis sativus</i> L.	2,000
15	Plátano	<i>Musa balbisiana</i> Colla	1,200
16	Quínoa	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd.	4,000
17	Repollo	<i>Brassica oleracea var. capitata</i> (L.) Alef.	1,000 – 2,000

18	Sorgo	<i>Sorghum bicolor var. sweet</i> (L.) Moench.	0 – 2,500
19	Soya	<i>Glycine max</i> L.	0 – 3,000
20	Tomate	<i>Solanum lycopersicum</i> L.	0 – 2,400
21	Trigo	<i>Triticum Aestivum</i> L.	3,000 – 4,570
22	Ulluco	<i>Ullucus tuberosus</i> Caldas	0 – 4,000
23	Uvas	<i>Vitis vinifera subsp. Vinífera</i> L.	1,200 – 2,000
24	Yuca	<i>Manihot esculenta</i> Crantz	0 – 2,000
25	Zanahoria	<i>Daucus carota</i> L.	0 – 2,600

Elaboración propia.

A partir de la información disponible para las variables área cosechada (ha), producción (toneladas) y rendimiento (hectogramos/hectárea) que reposa en FAOSTAT (disponible en: <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>) para el año 2008 con datos de los países involucrados en el análisis (Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia), se seleccionaron los 21 cultivos más importantes (84%), bajo la condición de encontrarse en al menos cuatro de los países que hacen parte de la región (figura 1). Los cuatro (4) cultivos restantes (16%) fueron seleccionados por su importancia en el consumo de las comunidades indígenas alto-andinas, es el caso de quínoa (*Chenopodium quinoa Willd*), el camote (*Ipomoea batatas*), la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) y el ulluco (*Ullucus tuberosus*).

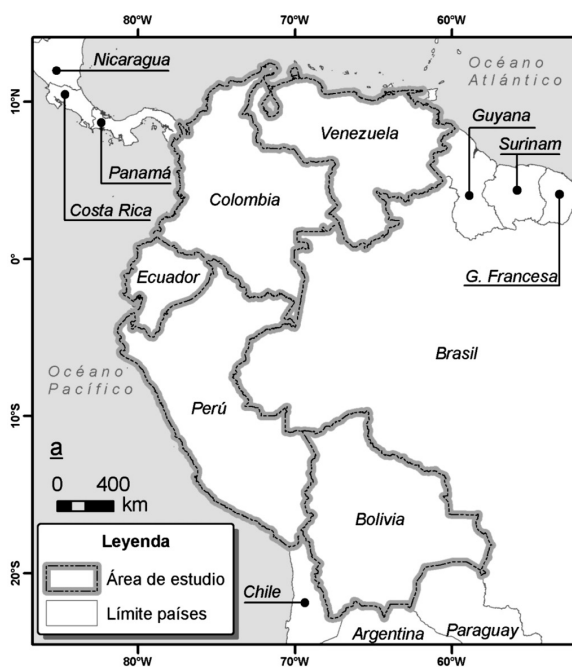
La historia agrícola de las comunidades andinas sustenta la importancia de este tipo de cultivos en los andes tropicales, mismos que también son conocidos como *neglected or underutilized crops* y tienen cualidades nutricionales únicas en la región, las mismas que a su vez pueden llegar a sustituir proteínas animales. Además, estos cultivos crecen en condiciones climáticas extremas (incluso sobre los 4 000 msnm), con muy bajas temperaturas (por debajo de 0 grados centígrados) y algunos son resistentes a la sequía (e.g., la quínoa crece hasta con 62 mm de lluvia durante su estación de crecimiento). Estos cultivos, también llamados sub-explotados han crecido durante miles de años en los andes, principalmente en los sitios elevados de la cordillera, pero también sobre los altiplanos.

Selección de 5 cultivos importantes en los andes tropicales

El cuadro 2 identifica los cinco cultivos seleccionados por su importancia en los andes tropicales. Esta selección se realizó dentro de los 25 cultivos más importantes para la región y seleccionando un cultivo por grupo de alimento. De esta manera se seleccionó: café como cultivo perenne (alto valor), frijol como legumbre, papa como tubérculo, tomate como hortaliza y trigo como cereal. Los rangos de temperatura media y precipitación anual para los cinco cultivos son los siguientes: café: 0 °C a 29.2 °C y 0 mm a 10 131 mm, respectivamente; frijol: -2.5 °C a 29.2 °C y 0 mm a 8,976 mm, respectivamente; papa: -0.2 °C a 23.8 °C y 14 mm a 2 549 mm, respectivamente; tomate: 1.6 °C a 28.8 °C y 20 mm a 7 123 mm, respectivamente; trigo: -4.9 °C a 27.8 °C y 0 mm a 6 221 mm, respectivamente.

Figura 1

ÁREA DE ESTUDIO: ANDES TROPICALES



Fuente: Elaboración propia.

En términos generales, el número de puntos de evidencia registrados fue diferente para cada uno de los cinco cultivos: 14 141 para café, 16 883 para frijol, 2 838 para papa, 1 964 para tomate y 13 080 para trigo. Estos puntos fueron extraídos de la superficie de *Spatial Allocation Production Model* (SPAM) (You *et al.*, 2000). SPAM es un modelo que permite mapear patrones de producción de cultivos usando un número reducido de datos de entrada específicos (e.g., extensión de área cultivada, población, elevación, rendimiento, zonas agroecológicas, entre otros). Los resultados de SPAM se presentan en grillas compuestas por pixeles de 5 km², por lo cual se tomaron los centroides de cada pixel para entrenar el modelo MaxEnt.

Cuadro 2
SELECCIÓN DE 5 PRINCIPALES CULTIVOS EN ÁREA DE ESTUDIO

No.	Cultivo	Nombre científico	Rango altitudinal (msnm)
1	Café	<i>Coffea Arabica</i> L.	1,300 - 1,800
2	Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	0 - 3,000
3	Papa	<i>Solanum tuberosum</i> L.	400 - 4500
4	Tomate	<i>Solanum lycopersicum</i> L.	0 - 2,400
5	Trigo	<i>Triticum Aestivum</i> L.	3,000 - 4,570

Fuente: Elaboración propia.

Datos climáticos. Línea base

Los datos históricos del clima se obtuvieron de la base de datos WorldClim (Hijmans *et al.*, 2005), disponible en www.worldclim.org). Estos datos representan promedios de largo plazo (1950-2000) de precipitación y temperatura máxima, mínima y media mensuales, con una resolución original de 30 arco-segundos (aproximadamente 1 km² en el Ecuador) y posteriormente fueron agregados hasta 5 arco-minutos (aproximadamente

10 km² en el Ecuador) usando *bilinear interpolation*.¹ Hijmans *et al.* (2005) usaron datos de cinco grandes bases de datos climáticos (*Global Historical Climatology Network* [GHCN], FAO, *World Meteorological Organization* [WMO], CIAT y *R-HYdronet*) en adición a otras bases de datos de países como Australia, Nueva Zelanda, Ecuador, Perú, Bolivia, países nórdicos europeos, entre otros. Sumando un total de 47 554 estaciones con datos de precipitación, 24 542 estaciones con temperaturas medias y 14 835 con temperaturas mínimas y máximas, la base de datos que produjeron Hijmans *et al.* (2005) es el conjunto de datos climáticos de mayor resolución espacial disponible a nivel mundial.

Sobre los Andes Tropicales, la base de datos WorldClim presenta 3 958 estaciones para precipitación, 1 847 para temperatura media, 718 para temperatura máxima y 723 para temperatura mínima. A partir de las variables mensuales, es posible derivar una serie de índices bioclimáticos (cuadro 3) que, en su mayoría, se encuentran altamente relacionados con el crecimiento, desarrollo fisiológico y biología de las especies de plantas tanto cultivadas como silvestres. Para tal efecto, se calcularon 19 variables (Busby, 1991) que representan tendencias anuales (i.e., temperatura media anual, precipitación total anual), estacionalidad (i.e., rango de temperatura anual, estacionalidad de precipitación) y factores limitantes o extremos (i.e., temperaturas de los meses fríos o calientes del año y precipitaciones de los meses más secos o húmedos).

Cuadro 3
ÍNDICES BIOCLIMÁTICOS USADOS PARA LA MODELACIÓN

<i>ID</i>	<i>Variable</i>
Bio 1	Temperatura media anual
Bio 2	Rango de temperatura diurno medio (media todos los meses (Temperatura máxima – Temperatura mínima))
Bio 3	Isotermalidad (Bio2 / Bio7) (* 100)

¹ Usa el valor de cuatro centros de celda (centroides) más cercanos para determinar el valor de la celda de salida. El nuevo valor de la celda de salida es la ponderación media de los cuatro valores de entrada.

Bio 4	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar * 100)
Bio 5	Temperatura máxima del mes más caliente
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío
Bio 7	Rango de temperatura anual (Bio5 - Bio6)
Bio 8	Temperatura media del trimestre más húmedo
Bio 9	Temperatura media del trimestre más seco
Bio 10	Temperatura media del trimestre más frío
Bio 11	Temperatura media del trimestre más caliente
Bio 12	Precipitación total anual
Bio 13	Precipitación del mes más húmedo
Bio 14	Precipitación del mes más seco
Bio 15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
Bio 16	Precipitación del trimestre más húmedo
Bio 17	Precipitación del trimestre más seco
Bio 18	Precipitación del trimestre más caliente
Bio 19	Precipitación del trimestre más frío

Elaboración propia.

Datos climáticos futuros

Un modelo de circulación global (GCM) es un modelo computacional que predice cuáles serán los patrones del clima en un número determinado de años en el futuro usando ecuaciones de movimiento como base del modelo de predicción climática (NWP, *Numerical Weather Prediction Model*), con el propósito de modelar numéricamente los cambios en el clima como resultado de cambios lentos en algunas condiciones de frontera y/o límite (tales como la constante solar) o parámetros físicos (como la concentración de gases de efecto invernadero). El modelo se basa en una celda de tres dimensiones y en la transferencia de materia y energía entre celdas. Una vez ejecutada la simulación, se pueden determinar un número de patrones climáticos, desde corrientes oceánicas y de viento hasta patrones en precipitación y tasas de evaporación que afectan, por ejemplo,

niveles de crecimiento de las plantas. En el presente estudio se usaron los resultados de clima futuro correspondientes a realizaciones de diferentes GCMs para dos escenarios de emisiones: SRES-A2 (8 GCMs) y SRES -A1B (10 GCMs), representativos del cuarto reporte de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007). El IPCC (2000) explica que el escenario de emisiones A1B tiene como característica especial involucrar alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía, en este caso la utilización equilibrada² de todo tipo de fuentes. En otras palabras, no existe en este escenario un uso excesivo de combustibles fósiles. Por su parte, el escenario de emisiones A2 (*bussines as usual*) tiene como característica principal describir un mundo muy heterogéneo. Entre sus objetivos están: la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales; las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento; y un desarrollo económico orientado básicamente a las regiones. Los datos climáticos usados para el cálculo de la adaptabilidad y la evaluación del impacto del clima sobre los cinco cultivos provinieron del portal de datos del IPCC. Se trabajó bajo los SRES-A1B y SRES -A2, en los periodos 2010-2039 (“2020”) y 2040-2069 (“2050”), usando datos climáticos de un grupo representativo de GCMs, diez para SRES -A1B y ocho para SRES -A2. El cuadro 4 ilustra el grupo que desarrolló el modelo, el país de donde provienen, el identificador del modelo y el tamaño original del *grid*³ de la simulación climática.

Cuadro 4

MODELOS DE CLIMA USADOS PARA LA PROYECCIÓN DE LA APTITUD CLIMÁTICA
CON EcoCROP Y MAXENT EN LOS PERIODOS 2020 Y 2050 DE LOS SRES A1B Y A2

No.	Grupo que desarrolló el modelo	País	MODEL-ID	GRID
1	Bjerknes Centre for Climate Research	Noruega	BCCR-BCM2.0	128x64
2	CSIRO Atmospheric Research	Australia	CSIRO-Mk2.0	64x32

² El término “equilibrada” indica que no se dependerá excesivamente de un tipo de fuente de energía, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares.

3	CSIRO Atmospheric Research	Australia	CSIRO-Mk3.0	192x96
4	US Dept. of Commerce, NOAA	USA	GFDL-CM2.0	144x90
	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	GFDL-CM2.0	144x90
5	US Dept. of Commerce, NOAA	USA	GFDL-CM2.0	144x90
	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	GFDL-CM2.0	144x90
6	NASA / Goddard Institute for Space Studies	USA	GISS-AOM	90x60
7	Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Science,	Rusia	INM-CM3.0	N/A
8	Center for Climate System Research	Japón	MIROC3.2(hires)	320x160
	National Institute for Environmental Studies	Japón	MIROC3.2(hires)	320x160
	Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	Japón	MIROC3.2(hires)	320x160
	Center for Climate System Research			
9	National Institute for Environmental Studies	Japón	MIROC3.2(medres)	128x64
	Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)			
10	National Center for Atmospheric Research	USA	NCAR-CCSM3.0	N/A

Elaboración propia.

Modelos de nicho ecológico

Se seleccionaron dos modelos para el análisis; EcoCrop, por la posibilidad de involucrar parámetros de crecimiento del cultivo, y MaxEnt, por ser un algoritmo

³ Referente a un archivo en formato ráster, también puede entenderse como grilla.

robusto de ajuste de distribuciones probabilísticas con demostrado buen desempeño bajo un diverso rango de condiciones (Phillips & Dudik, 2008); (Hijmans & Graham, 2006). MaxEnt se considera, generalmente, como el modelo más preciso. Por su parte, EcoCrop (Hijmans *et al.*, 2005a) es un modelo muy útil para situaciones en las que no hay datos de evidencia disponibles para un determinado cultivo y el investigador, por tanto, se ve forzado a usar rangos ambientales en lugar de puntos de evidencia o resultados de pruebas agronómicas. Los resultados, sin embargo, son muy generales y pueden sólo ser usados para describir tendencias generales en tiempo y espacio. El modelo, sin embargo, puede ser calibrado usando puntos de presencia absoluta de un cultivo mediante una metodología específica (CIAT, datos no publicados), aumentando su desempeño considerablemente.

MaxEnt (máxima entropía)

El método de máxima entropía es una metodología general para hacer predicciones o inferencias a partir de información incompleta (Phillips *et al.*, 2006); (Phillips & Dudik, 2008). La idea es estimar una probabilidad objetivo para encontrar la probabilidad de la distribución de máxima entropía, sujeta a un conjunto de restricciones que representan información incompleta sobre la distribución objetivo. Similares a la regresión logística, MaxEnt usa pesos para las variables que explican la distribución objetivo; estos pesos evitan la sobre-estimación de las probabilidades (*overfitting*) cuando hay alta correlación entre los predictores, o cuando el número de predictores es alto (i.e., descarta información redundante) respecto al número de puntos de entrenamiento. La distribución de probabilidad final de MaxEnt es la suma de cada variable de peso dividido por una reducción constante para garantizar que los rangos de probabilidad de valores sean de 0 a 1. El programa se inicia con una distribución de probabilidad uniforme y de forma iterativa altera un peso a la vez para maximizar la probabilidad de llegar a la distribución de probabilidad óptima. En términos prácticos, el modelo usa datos de presencia (o presencia y ausencia) para hallar una distribución probabilística de máxima entropía alrededor de un número de variables

predictoras (generalmente ambientales). Estas distribuciones pueden proyectarse a cualquier escenario temporal y/o espacial diferente al de línea base.

EcoCrop

Es un modelo mecanístico implementado por Hijmans *et al.* (2005a) en el software DIVA-GIS. El modelo trabaja definiendo, en primera instancia, diez parámetros de crecimiento del cultivo: Gmin: duración mínima de la estación de crecimiento (días), Gmax: duración máxima de la estación de crecimiento (días), Tkill: temperatura a la que el cultivo detiene su desarrollo (°C), Tmin: temperatura mínima absoluta en que el cultivo tiene un desarrollo marginal (°C), Topmin: temperatura óptima mínima del cultivo (°C), Topmax: temperatura óptima máxima del cultivo (°C), Tmax: temperatura máxima absoluta en que el cultivo tiene un desarrollo marginal (°C), Rmin: precipitación mínima absoluta en que el cultivo crece (mm), Ropmin: precipitación mínima óptima de crecimiento del cultivo (mm), Ropmax: precipitación máxima óptima de crecimiento del cultivo (mm) y Rmax: precipitación máxima absoluta en que el cultivo crece (mm).

Entre los umbrales absolutos y óptimos hay un rango de condiciones de «aptitud» climática (de 1 a 99), y entre las condiciones óptimas hay condiciones muy aptas para el crecimiento del cultivo («aptitud» climática de 100%). El modelo evalúa por separado precipitación y temperatura, luego las combina multiplicando los resultados. El modelo inicialmente se calibra con información de localización de los sistemas productivos a analizar (para la obtención de parámetros de crecimiento) y luego se usa para establecer una línea base y para proyectar la «aptitud» climática hacia el futuro. Es conceptualmente útil para detectar los cambios en los nichos principales del cultivo y para tomar decisiones regionales de cara al tipo de enfoque y a los lugares específicos en donde los cultivos tienen mayores impactos negativos, de tal manera que puede desarrollarse una aproximación sitio-específico para evaluar impactos. El modelo trabaja definiendo, en primera instancia, diez parámetros de crecimiento del cultivo:

- Gmin: duración mínima de la estación de crecimiento (días).
- Gmax: duración máxima de la estación de crecimiento (días) .
- Tkill: temperatura a la que el cultivo detiene su desarrollo (°C) .
- Tmin: temperatura mínima absoluta en que el cultivo tiene un desarrollo marginal (°C).
- Topmin: temperatura óptima mínima del cultivo (°C) .
- Topmax: temperatura óptima máxima del cultivo (°C) .
- Tmax: temperatura máxima absoluta en que el cultivo tiene un desarrollo marginal (°C).
- Rmin: precipitación mínima absoluta en que el cultivo crece (mm).
- Ropmin: precipitación mínima óptima de crecimiento del cultivo (mm).
- Ropmax: precipitación máxima óptima de crecimiento del cultivo (mm).
- Rmax: precipitación máxima absoluta en que el cultivo crece (mm).

Entre los umbrales absolutos y óptimos hay un rango de condiciones de aptitud climática (de 1 a 99), y entre las condiciones óptimas hay condiciones muy aptas para el crecimiento del cultivo (aptitud climática de 100%). El modelo evalúa por separado precipitación y temperatura, y luego las combina multiplicando los resultados. El modelo inicialmente se calibra con información de localización de los sistemas productivos a analizar (para la obtención de parámetros de crecimiento) y luego se usa para establecer una línea base y para proyectar la aptitud climática hacia el futuro. Es conceptualmente útil para detectar los cambios en los nichos principales del cultivo y para tomar decisiones regionales de cara al tipo de enfoque y a los lugares específicos en donde los cultivos tienen mayores impactos negativos, de tal manera que puede desarrollarse una aproximación sitio-específico para evaluar impactos. Para la obtención de los mapas de aptitud climática actual y futura de los años 2020 y 2050 se realizó un procedimiento basado en la extracción de información climática (temperatura y precipitación) de los puntos de evidencia donde los cultivos bajo análisis estaban ubicados. El proceso seguido para la modelación consistió de cinco pasos:

- Creación de índices bioclimáticos: a partir de los puntos de evidencia de los cultivos de frijol, papa, tomate, trigo y café [cuyas estaciones de crecimiento tienen una duración de tres (frijol), cuatro (papa y tomate), seis (trigo) y doce (café) meses], se extrajo información climática para cada estación de crecimiento: temperatura media de los tres meses más calientes y fríos, y precipitación de los tres meses más húmedos y secos (frijol); temperatura media de los cuatro meses más calientes y fríos, y precipitación de los cuatro meses más húmedos y secos (papa y tomate); temperatura media de los seis meses más calientes y fríos, y precipitación de los seis meses más húmedos y secos (trigo).
- Para café se usaron las variables bio1 (temperatura media anual) y bio12 (precipitación anual) de WorldClim. Estos nuevos índices bioclimáticos fueron calculadas a partir de los promedios mensuales las de temperaturas mínimas, medias y máximas, y de la precipitación de la línea base climática obtenida de WorldClim. Para esto, se utilizó un programa desarrollado en *Arc Macro Language* (AML) que calculó las condiciones de las variables bioclimáticas para cada uno de los cultivos en cuestión. Por su parte, para el análisis del cultivo de café por su condición de cultivo perenne, fueron utilizadas las variables bioclimáticas: Temperatura media anual (bio 1) y Precipitación total anual (bio 12).
- Extracción de datos: consistió en extraer el valor de temperatura y precipitación (bioclimáticos mencionados atrás) correspondiente a cada punto.
- Cálculo de parámetros mediante análisis de frecuencias: se tomó como nicho óptimo el rango de datos de mayor frecuencia. Se calculó el promedio de los valores extraídos para cada variable y a partir de ahí se definió como nicho óptimo el 20% de los datos a cada lado del promedio y el 40% de los datos a cada lado del promedio para el nicho marginal.
- En situaciones donde el número de datos no permitió seleccionar 40 y 80% de datos alrededor del promedio, se procedió a tomar como nicho óptimo el rango de datos que más frecuencias presentara, lo mismo se hizo para calcular el nicho marginal, tomando como límites las clases que más frecuencias presentarán después de los límites óptimos.

- Calibración de parámetros: se ajustaron los parámetros extraídos de los índices bioclimáticos, unicialmente para el clima actual (WorldClim). El procedimiento consistió en realizar algunas corridas iniciales y por inspección visual corregir las predicciones que no se ajustaran bien a los puntos, posteriormente se realizaron correcciones en los parámetros hasta que la predicción se ajustó (cuadro 5).
- Corridas para clima futuro 2020 y 2050: una vez calibrados los parámetros de temperatura y precipitación para el clima actual, se realizaron las corridas para obtener las predicciones de clima futuro.

Cuadro 5

PARÁMETROS DE CRECIMIENTO POR CULTIVO (TEMPERATURAS EN CELSIUS Y PRECIPITACIÓN EN MM)

<i>Parámetro/Cultivo</i>	<i>Café</i>	<i>Frijol</i>	<i>Papa</i>	<i>Tomate</i>	<i>Trigo</i>
Gmin	365	90	120	120	180
Gmax	365	90	120	120	180
Tkill	0	0	-8	0	0
Tmin	11	13.6	3.8	15.7	3.4
TOPmin	15.6	17.5	12.4	21.3	8
TOPmax	24.8	23.1	17.8	24.8	17.2
Tmax	26.4	25.7	24	27	21.7
Rmin	294	200	150	54	383
ROPmin	991	362	251	277	449
ROPmax	2,540	450	327	1,242	1,231
Rmax	3,315	710	786	1,540	1,666

Elaboración propia.

Análisis socioeconómico para los cinco cultivos

Para el análisis socioeconómico de los impactos a 2050, fue necesario acoplar los resultados proyectados por EcoCrop a la información existente de los cultivos bajo

análisis. Por tal razón fueron aplicados dos filtros, uno sobre los datos proyectados por EcoCrop (distribución potencial actual) y otro sobre los datos de SPAM. El primer filtro consistió en determinar las áreas de los cultivos cuya aptitud climática estaba por encima de 50%. El segundo se aplicó sobre los datos de SPAM, en este caso, área cosechada en hectáreas para el año 2000, donde cada pixel tiene una resolución de 10 km.² El filtro consistió en estimar las áreas donde más de 0.5% de la superficie de cada pixel presentaba área cosechada del cultivo. Una vez aplicados los filtros, se superpusieron los resultados de EcoCrop con los de SPAM para identificar las áreas donde coincidiera la distribución real del cultivo (SPAM) con la distribución potencial (EcoCrop) y así tener estimaciones más precisas. Al no existir datos de SPAM para el cultivo de tomate, sólo fue aplicado el primer filtro y no se hicieron los demás cálculos para este cultivo, pues sin datos de SPAM se sobreestimarían las cifras. Después se realizó una actualización de los datos de EcoCrop (actual) al año 2007 con el objetivo de comparar las estimaciones de hectáreas con pérdidas y ganancias de aptitud climática con los datos de FAOSTAT 2007. El cálculo se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Ajuste} = \text{EcoCrop} * \frac{\text{FAOSTAT (2000)}}{\text{SPAM}} * \frac{\text{FAOSTAT (2007)}}{\text{FAOSTAT (2000)}}$$

Luego se multiplicó el ajuste⁴ (al 2007) por las estimaciones de EcoCrop con el objetivo de tener una predicción más real del área cosechada que ganaría o perdería aptitud climática. Utilizando el resultado se pudo llegar a estimaciones de las ganancias y pérdidas de producción (basado en el rendimiento promedio por hectárea en 2005-2007) y del valor de producción (basado en el precio promedio de 2005-2007, expresado en dólares internacionales de 1999-2001, la misma unidad que usa FAOSTAT).⁵

⁴ En los casos de frijol en Ecuador y trigo en Venezuela se usaron datos de FAOSTAT 2006.

⁵ En este documento todas las cifras en dólares usan la misma línea base (1999-2001).

En todos los casos, se decidió usar datos de 2007 o anteriores, en vez de datos más recientes, debido a la crisis de alimentos ocurrida entre 2007-2008 y los choques resultantes en los precios a raíz de tal coyuntura. Después se compararon las ganancias y pérdidas esperadas a 2050 con los datos reales obtenidos de FAOSTAT 2005-2007 para determinar si, a fin de cuentas, los resultados serían positivos o negativos, y finalmente estimar la magnitud del impacto. De nuevo se tuvo en cuenta el área cosechada (ha), producción (t) y valor económico de la producción (dólar estadounidense), se midió el impacto relativo (%) de estas ganancias y se determinó si los cambios proyectados constituirían un impacto sustancial en la situación actual. Se debe anotar que estos impactos potenciales no tomaron en cuenta el valor agregado pos-cosecha, por ejemplo, por secar y tostar café.

Además, se calculó el porcentaje de personas bajo la línea de pobreza (estimada en USD\$2.00 diarios). Esto se hizo a partir información existente a nivel global expresada en una grilla, cuya resolución espacial fue de 5km x 5km. Esta información se derivó de un juego de datos calculados a través de técnicas de Estimación de Área Pequeña de Pobreza e Inequidad. Las medidas son derivadas de la combinación de censos y encuestas usados para mapear la pobreza en varios países alrededor de mundo. La colección de datos fue producida por *Columbia University Center for International Earth Science Information Network* (CIESIN) en colaboración con un número de proveedores externos de datos.⁶

Factores limitantes

Elementos como la incertidumbre de los datos climáticos, carencia de datos de ocurrencia de cultivos, probables inconsistencias en las fuentes de datos de cultivos,

⁶ Información disponible: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/povmap/atlasMedia.jsp>

entre otros, fueron algunos de los limitantes en el análisis y se comentaran brevemente en esta sección. Como se mencionó antes, el número de puntos registrados fue diferente para los cinco cultivos: 14 141 para café, 16 883 para frijol, 2 838 para papa, 1 964 para tomate y 13 080 para trigo. Se observa además que algunos puntos de evidencia están muy concentrados sobre uno o dos países y otros no tienen mucha representatividad sobre el conjunto de países, es el caso de tomate, indicando cierto nivel de sesgo geográfico. Esto podría llevar a una importante auto-correlación espacial, afectando el desempeño de los modelos. Debido a la posibilidad de un sesgo, las conclusiones que de la aplicación de los modelos propuestos se deriven, principalmente para MaxEnt y en el caso del presente estudio, deberían limitarse únicamente a los países que concentran los puntos de evidencia. Los resultados, por tanto, podrían estar subestimando tanto la presencia actual de los cultivos, como el impacto del cambio climático sobre dicha presencia. Por su parte y en relación con los datos climáticos, el cuarto reporte del IPCC se basó en los resultados de 21 GCMs, cuyos datos están disponibles en la página web del IPCC (www.ipcc-data.org), o directamente en las diferentes páginas web de las instituciones que desarrollaron cada uno de los modelos (la página del *World Climate Research Programme (WCRP) CMIP3 multi-model database*, también provee información de los modelos. No obstante, la resolución espacial original de los resultados de cada GCM es inapropiada para analizar los impactos del cambio climático en la agricultura, dado que en casi todos los casos las celdas GCM miden más de 100 km², lo que se convierte en un problema, especialmente en paisajes heterogéneos como los presentados en los Andes Tropicales, donde, en algunos lugares una celda GCM puede cubrir el rango completo de variabilidad de un cultivo.

RESULTADOS

Impactos por región y por país/cultivos

Venezuela (gráfico 1) es el caso más grave de los países de los Andes tropicales, pues 19 de los 25 cultivos presentarían pérdida de aptitud climática a futuro en uno

o ambos escenarios de emisiones. Los cultivos que tendrían condiciones positivas de aptitud climática serían arroz, banano, plátano, sorgo, tomate y yuca en uno o ambos escenarios de emisión. Los cultivos con mayores porcentajes de pérdida de aptitud climática ($< -10\%$) hacia el año 2050 para el SRES-A2 serían arveja, cebada, lechuga, repollo y ulluco.

Colombia por su parte, registra que los cultivos con pérdidas en aptitud climática serían arracacha, arveja, cebada, lechuga, papa (año 2020, SRES -A2) pepino, quínoa, trigo, ulluco y zanahoria (gráfico 2). De entre estos los cultivos más afectados serían arveja, cebada, quínoa, trigo y ulluco, con incluso menos que -5% de pérdida de su aptitud climática en alguno de los escenarios de emisión. Los cultivos con ganancia de aptitud climática serían principalmente arroz, banano, plátano, sorgo, tomate y yuca, con porcentajes que superan el 5% de aptitud climática en alguno de los escenarios de emisión.

Gráfico 1

PORCENTAJE DE PERSONAS BAJO LA LÍNEA DE POBREZA EXTREMA EN VENEZUELA.

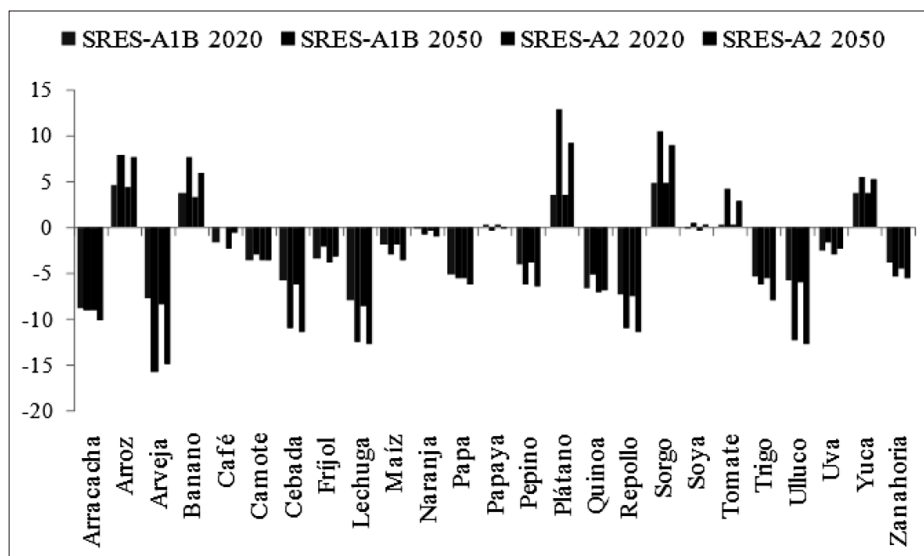


Gráfico 2

PORCENTAJE DE CAMBIO EN APTITUD CLIMÁTICA POR CULTIVO EN COLOMBIA

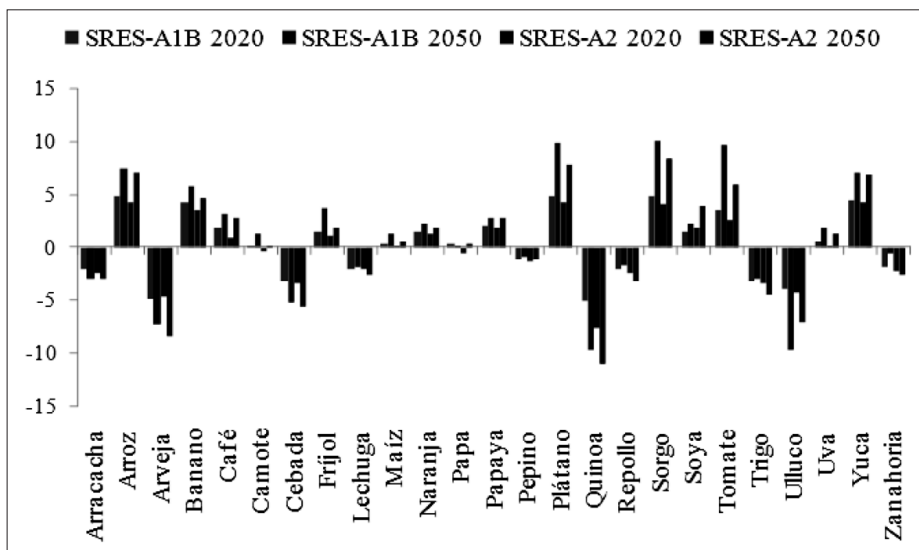
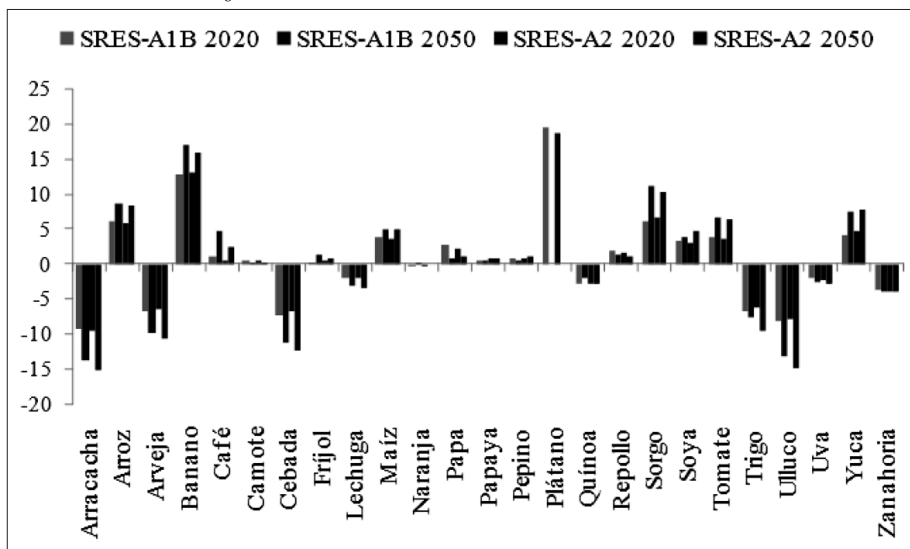


Gráfico 3

PORCENTAJE DE CAMBIO EN APTITUD CLIMÁTICA POR CULTIVO EN BOLIVIA



En Bolivia (gráfico 3) cultivos como arracacha, arveja, cebada, lechuga, naranja, quínoa, trigo, ulluco, uva y zanahoria perderían aptitud climática según los dos escenarios evaluados y en los dos periodos (2020 y 2050). Los demás cultivos, siendo mayoría (15), presentan cambios positivos en su aptitud climática, pero vale la pena resaltar el caso de arroz, banano, plátano, sorgo, soya, tomate y yuca, pues prestarían los porcentajes más altos de cambio positivo en aptitud climática para uno o ambos escenarios de emisión.

En Ecuador la situación tiende a ser más favorable que para los países descritos hasta el momento, pues 17 de los 25 cultivos presentarían cambio en aptitud climática positivo (gráfico 4). Los cultivos con cambios negativos serían arracacha, arveja, cebada, lechuga, quínoa, trigo, ulluco y zanahoria. Cultivos como el arroz, el banano y el plátano tendrían cambios en aptitud por encima del 12% en alguno de los escenarios de emisión. Otros cultivos que sobresaldrían por su cambio en aptitud climática positiva serían soya, sorgo, tomate y yuca.

En Perú se presentaría una situación similar a la de Ecuador, donde serían pocos los cultivos con cambios en aptitud climática negativos, estos serían arracacha, arveja, cebada, lechuga, trigo y ulluco y zanahoria en alguno de los escenarios de emisión (gráfico 5), siendo la lechuga y la zanahoria los cultivos menos afectados del grupo mencionado. Los cultivos con ganancia en aptitud climática por encima del 5% en Perú son arroz, banano, papa, plátano, sorgo, soya, tomate y yuca en alguno de los escenarios de emisión.

ANÁLISIS DE IMPACTO PARA LOS CINCO CULTIVOS

Lo que se pretende en esta sección es mostrar los resultados de ambos modelos en los dos escenarios de emisiones (A1B y A2) y en los dos periodos (2020 y 2050), así se expondrán las principales diferencias y puntos en común de los resultados de MaxEnt y EcoCrop, además de observar el nivel de impacto proyectado por los diferentes escenarios de emisiones. Vale la pena resaltar que al presentar la comparación de los resultados de la modelación de los dos escenarios, se encontrarán importantes

similitudes, por lo que se evitará redundar en la descripción de las tendencias que entreguen cifras muy similares. Esto sucederá principalmente cuando se comparen los resultados de un mismo modelo de nicho ecológico (i.e., EcoCrop o MaxEnt). En otras palabras, los resultados de EcoCrop serán muy similares entre sí, al igual que los resultados de MaxEnt, aun cuando se hable de corridas con datos climáticos pertenecientes a diferentes escenarios de emisiones.

El cuadro 7 muestra la estimación de la contribución relativa de las variables ambientales al modelo MaxEnt para la distribución potencial actual de cada cultivo. Allí se observa cómo para cada cultivo son diferentes las variables que tienen mayor incidencia en la distribución actual del cultivo. Esta información podría ser útil para analizar los mejoramientos tecnológicos que se podría llevar a cabo con el propósito de conservar estos cultivos en el futuro. El total de hectáreas de los países de la región de los Andes tropicales es 472 555 000. De éstas un porcentaje significativo se vería afectado negativamente por los impactos del cambio climático. La intención de la presente sección es estimar el porcentaje de hectáreas afectadas. No obstante, se debe aclarar que las cifras expuestas tienen que ver con el total de hectáreas potencialmente afectadas, ya sea negativa o positivamente. En términos de área potencialmente afectada negativa y positivamente por el cambio climático en la región bajo análisis, el gráfico 6 es un claro ejemplo de la tendencia hacia la pérdida de aptitud climática de los cinco cultivos, dado que en todos los casos es mayor el área perdiendo que el área que se beneficia de los cambios.

Los casos más extremos en SRES-A1B para el año 2020 se observan en café, frijol y trigo, donde el área perdida es del 79.7% (30 millones de hectáreas de un total de 37.7 millones), 76.3% (41 millones de hectáreas de un total de 253.8 millones) y 96.9% (24.5 millones de hectáreas de un tal de 25.4 millones), respectivamente. La tendencia continúa en el año 2050 donde el área que pierde aptitud climática para café, frijol y trigo es de 70.6% (16.9 millones de hectáreas de un total de 24 millones), 70.9% (27.8 millones de hectáreas de un total de 39.3 millones) y 98.8% (18.3 millones de hectáreas de un total de 18.6 millones), respectivamente, lo cual indica que parte de las áreas que perdían aptitud climática en 2020 desaparecerían en 2050.

Gráfico 4

PORCENTAJE DE CAMBIO EN APTITUD CLIMÁTICA POR CULTIVO EN ECUADOR

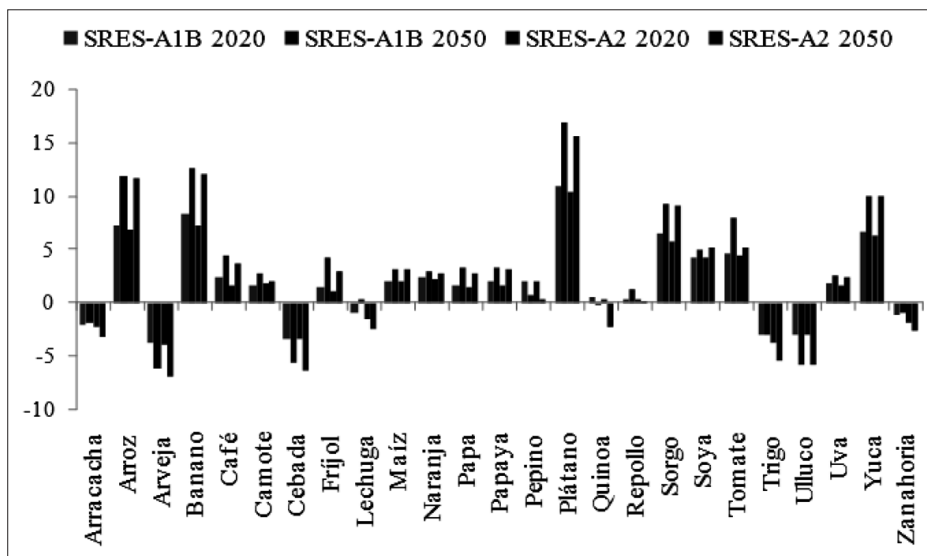


Gráfico 5

PORCENTAJE DE CAMBIO EN APTITUD CLIMÁTICA POR CULTIVO EN PERÚ

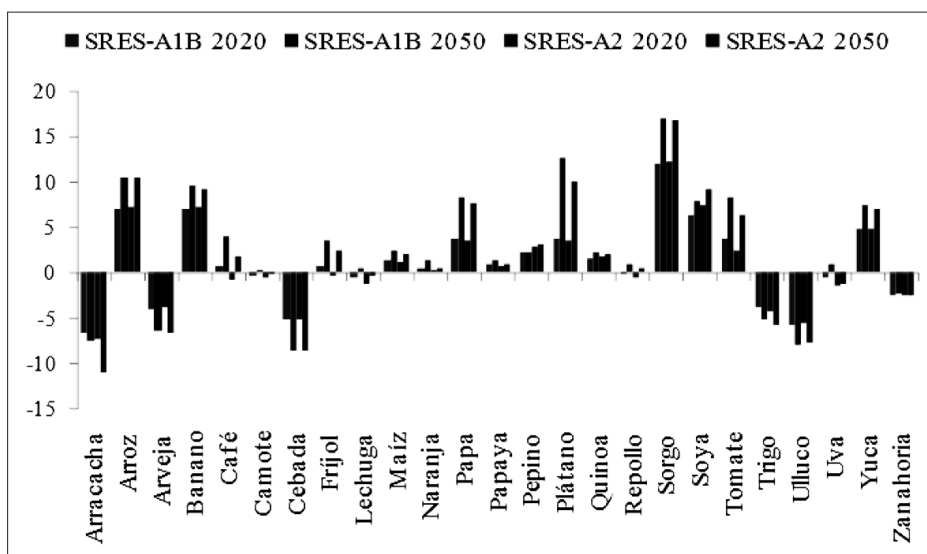
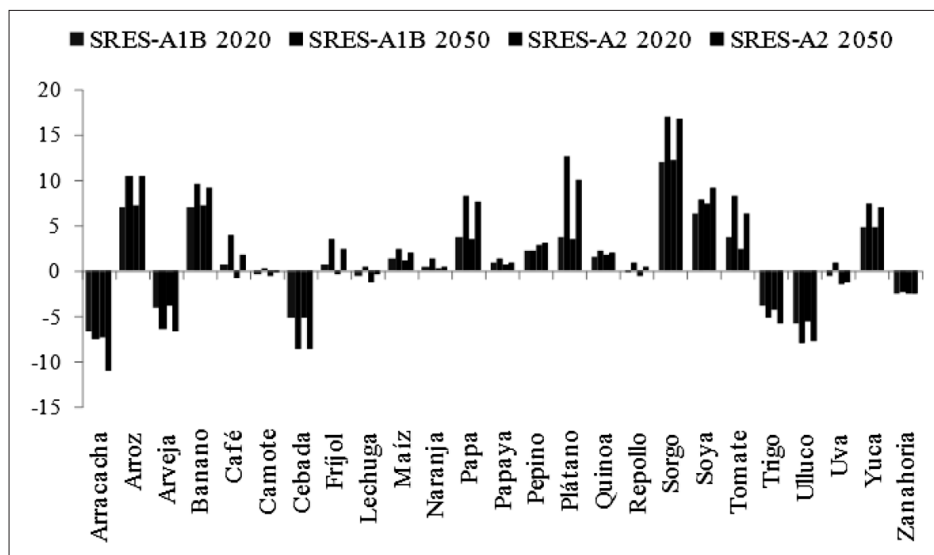


Gráfico 6

PORCENTAJE DE ÁREA PERDIENDO Y GANANDO APTITUD CLIMÁTICA POR CULTIVO. EcoCROP - SRES-A1B



Cuadro 7

CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LAS VARIABLES (%)

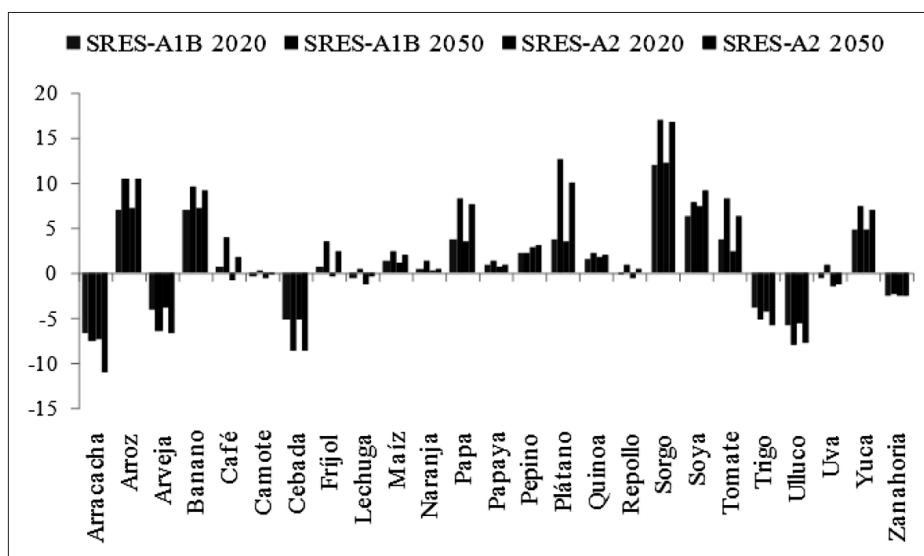
Variable	Café	Frijol	Papa	tomate
Bio 1 - Temperatura media anual	2.8	0.5	18.5	0.7
Bio 2 - Rango medio diario [media(max-min)]	0.4	0.2	0.1	1
Bio 3 - Isotermalidad (Bio 2/ Bio 7)	3.9	7.2	0.5	1.8
Bio 4 - Estacionalidad de la temperatura (coeficiente de variación)	3.2	19.4	1.3	26.5
Bio 5 - Temperatura máxima anual	24.2	22.5	6.9	0.2
Bio 6 - Temperatura mínima anual	7.9	0.3	4.8	0.1
Bio 7 - Rango de temperatura anual (Bio 5 - Bio 6)	18.1	27.2	0.1	24.2
Bio 8 - Temperatura media del trimestre más húmedo	0	0.6	25.4	5.4
Bio 9 - Temperatura media del trimestre más seco	14.5	3.4	0.4	0.2
Bio 10 - Temperatura media del trimestre más cálido	0.2	0.1	12.3	18
Bio 11 - Temperatura media del trimestre más frío	1.5	1.4	18.6	0.3
Bio 12 - Precipitación anual	1.9	1.9	5.4	7.8
Bio 13 - Precipitación del mes más húmedo	0.4	0	0.2	2.6
Bio 14 - Precipitación del mes más seco	1.8	3.9	0.2	2.8

Bio 15 - Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)	14.3	4	3.3	2.6
Bio 16 - Precipitación del trimestre más húmedo	1	0.6	0.4	3.2
Bio 17 - Precipitación del trimestre más seco	0.2	1.1	0.4	1
Bio 18 - Precipitación del trimestre más cálido	0.5	3.3	1	0.5
Bio 19 - Precipitación del trimestre más frío	3.2	1.6	0.2	1.1

Por su parte, el gráfico 7 describe la situación para el SRES-A2 según los resultados de EcoCrop. La afectación en este caso tiende a ser un más fuerte, y eso se plasma en las los porcentajes de pérdida y ganancia de aptitud climática para el año 2020: café (81.7% de un total de 38.8 millones de hectáreas), frijol (76% de un total de 55.7 millones de hectáreas) y trigo (97.2% de un total de 25.6 millones de hectáreas) son los cultivos más afectados. En 2050 la situación mantiene la tendencia negativa, es así como en café, frijol y trigo 74.4%, 71.2% y 98.8%, respectivamente, del área apta se vería afectada negativamente. En hectáreas, estos porcentajes harían parte de un total 27, 43.5 y 20.2 millones, respectivamente.

Gráfico 7

PORCENTAJE DE ÁREA PERDIENDO Y GANANDO APTITUD CLIMÁTICA POR CULTIVO. EcoCROP - SRES-A2.



En cuanto a los resultados generados con MaxEnt para el SRES-A1B en el año 2020 (gráfico 8), se observa que todos los cultivos se verían seriamente afectados por los cambios negativos; café 69% (de un total de 31.6 millones de hectáreas), frijol 74.2 (de un total de 46.7 millones de hectáreas), papa 61.7% (de un total de 63 millones de hectáreas), tomate 75.9% (de un total de 37.2 millones de hectáreas) y trigo 69.8% (de un total de 11 millones de hectáreas). En el año 2050 las condiciones empeorarían, pues se reportarían porcentajes de pérdida de aptitud climática aún mayores: café 72.1% (de un total de 24.9 millones de hectáreas), frijol 83.2% (de un total de 41.1 millones de hectáreas), papa 64% (de un total de 59 millones de hectáreas), tomate 79.3% (de un total de 32.8 millones de hectáreas), trigo 74.3% (de un total de 9.9 millones de hectáreas).

Para el SRES-A2, MaxEnt reporta resultados igualmente graves para los cultivos (gráfico 8). En el año 2020 los porcentajes de área afectada negativamente serían los siguientes: café 65.8% (de un total de 32.2 millones de hectáreas), frijol 73.5% (de un total de 46.2 millones de hectáreas), papa 62.3% (de un total de 62.6 millones de hectáreas), tomate 73.9% (de un total de 36.7 millones de hectáreas) y trigo 69.2% (de un total de 10.9 millones de hectáreas). En cuanto a las cifras para el año 2050 se encontraría lo siguiente: café 71.2% (de un total de 25.5 millones de hectáreas), 84% (de un total de 40 millones de hectáreas), 60.8% (de un total de 59.3 millones de hectáreas), 77.9% (de un total de 32.7 millones de hectáreas) y 71.4% (de un total de 9.9 millones de hectáreas), respectivamente.

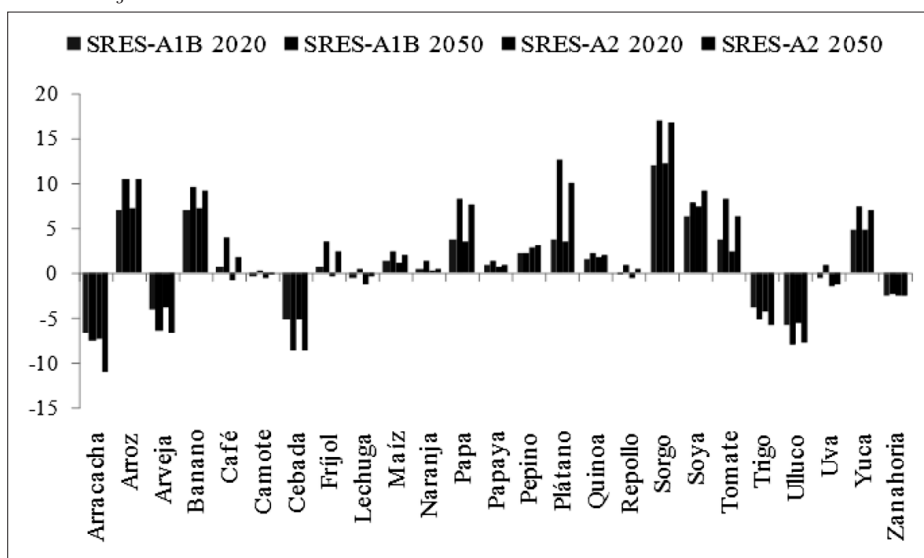
A grosso modo, la situación de los cinco cultivos analizados en los Andes tropicales es considerablemente grave, lo cual indica que debería pensarse en la implementación de tecnologías que permitan al sector agrícola de la región hacer frente a los cambios inevitables que el clima tendrá para ellos. Esta afirmación toma sustento en los resultados expuestos hasta el momento y los que se presentarán en las siguientes páginas.

Existe un grado importante de congruencia entre los resultados de los modelos usados en este análisis, mismos que dan peso a la tesis de que estos cinco cultivos se encuentran bajo una fuerte presión del clima hacia el futuro y que de no tomar acciones ahora, las pérdidas podrían llegar a cifras gigantescas. Las siguientes páginas

harán una descripción más detallada de lo que podría suceder en la región de los Andes tropicales desde la perspectiva climática.⁷ Por tanto, se ilustrarán a continuación los resultados de los dos modelos de nicho ecológico implementados para describir la situación de los cinco cultivos seleccionados, tratando de dar una mirada desde los cultivos que enfrentarían condiciones más graves hasta llegar a los que el clima no afectaría de manera tan grave su aptitud climática de cara al futuro.

Gráfico 8

PORCENTAJE DE ÁREA PERDIENDO Y GANANDO APTITUD CLIMÁTICA POR CULTIVO. MAXENT - SRES-A2



Impacto económico - situación a escala regional

En términos de área cosechada, los cultivos que se verían más afectados por los efectos del cambio climático de aquí al año 2050 serían papa (645 474 hectáreas;

⁷ Los resultados de los mapas se limitan a zonas cuyas altitud supera los 500 msnm.

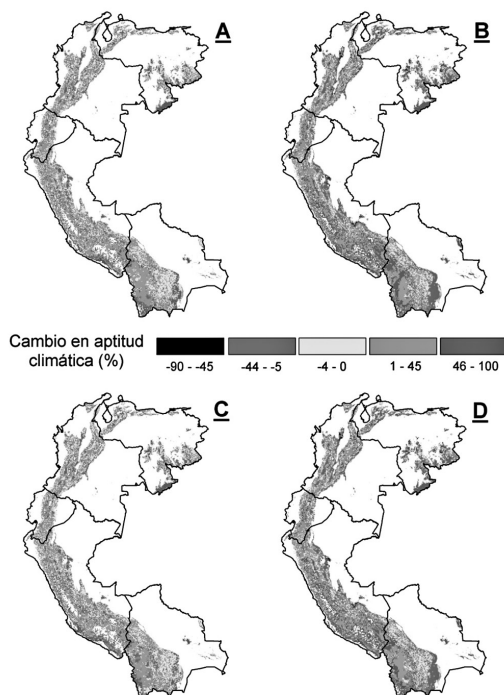
⁸ Todas las cifras económicas en dólares americanos se refieren a los años 1999-2001.

representa 14.7% de la cosecha actual) y café (1.5 millones de hectáreas, o 5.5% del área cosechada actual). Por el lado de la producción, la situación de la papa también sería la más grave, con una pérdida proyectada de más de 1.3 millones de toneladas. El segundo cultivo más afectado según las estimaciones de producción sería el café, con una pérdida proyectada de casi 57 mil toneladas. En cuanto al valor económico de la producción, el café tiene la pérdida proyectada más grande—USD⁸ \$1.93 billones—no obstante, esta cifra representa solamente 4.8% del valor actual del cultivo. En cambio, los impactos económicos para trigo serían menores en números crudos —USD\$1.57 billones— lo que representa más de un cuarto (25.5%) del valor actual.

Figura 2

CAMBIO EN APTITUD CLIMÁTICA DE 25 CULTIVOS SELECCIONADOS EN CINCO PAÍSES ANDINOS

A) SRES A1B - 2020, B) SRES A1B - 2020, C) SRES A2 - 2020, D) SRES A2 - 2050



Fuente: Elaboración propia.

La figura 2 deja claro que a futuro existiría un porcentaje significativo de área donde la aptitud climática de los cultivos variaría de -4 a 45% en el año 2020. Las áreas con porcentajes de cambio inferior a los mencionados son relativamente pocos y se ubican en las zonas más bajas de los países andinos, para ser más precisos sobre las zonas de piedemonte.

Son fácilmente identificables zonas con una disminución entre -5\$ y -44\$ en el sur de Venezuela, piedemonte de la cordillera oriental y valles interandinos de Colombia, y sobre zona central y sur occidental de Perú, además del sur occidente y centro de Bolivia (figuras A y C) para el año 2020 y en los SRES A1B y A2. En el año 2050 las zonas afectadas en 2020 aumentan su superficie y sólo los lugares más altos de la cordillera reflejan cambios positivos (46% - 100%) en su aptitud climática (figuras B y D). Lo anterior se observa principalmente en el sur de Perú y occidente de Bolivia (sobre los 3.800 msnm), así como en lo más alto de los Andes ecuatorianos y colombianos (sobre los 3.300 msnm). Cabe anotar que la situación expuesta por el SRES-A1B en 2050, es comparativamente mejor a la mostrada por el SRES-A2 para el mismo año, tal situación puede ser consecuencia de que SRES-A2 supone mayores cantidades de gases efecto invernadero emitidos a la atmósfera. A continuación se presentarán un par de ejemplos de la modelación con EcoCrop y MaxEnt para los cultivos de café y papa en el año 2050.

Según la figura 3, la situación hacia el año 2050 deja claro que los impactos negativos sobre el cultivo aumentarían (B y E), haciéndose aún más evidentes la pérdida de áreas con condiciones idóneas para el crecimiento del cultivo, además de que el cambio en aptitud climática (C y F) se agravaría, encontrándose cada vez más áreas donde el rango de cambio estaría entre -20 y 0% de aptitud climática. Por su parte, la incertidumbre (D y G) continua siendo baja, pues la mayoría de áreas dentro de las proyecciones se mantendrían en el rango 0 a 5%. Estos resultados son muy similares en los dos escenarios de emisiones, sin embargo, el SRES-A2 tiende a ser levemente más drástico que SRES-A1B.

Figura 3

APTITUD CLIMÁTICA DE CAFÉ USANDO EcoCROP: (A) APTITUD CLIMÁTICA ACTUAL, (B) APTITUD CLIMÁTICA EN 2020-A1B, (C) CAMBIO EN APTITUD CLIMÁTICA EN 2020-A1B, (D) INCERTIDUMBRE EN 2020-A1B, (E) APTITUD CLIMÁTICA EN 2020-A2, (F) CAMBIO EN APTITUD CLIMÁTICA 2020-A2, (G) INCERTIDUMBRE EN 2020-A2

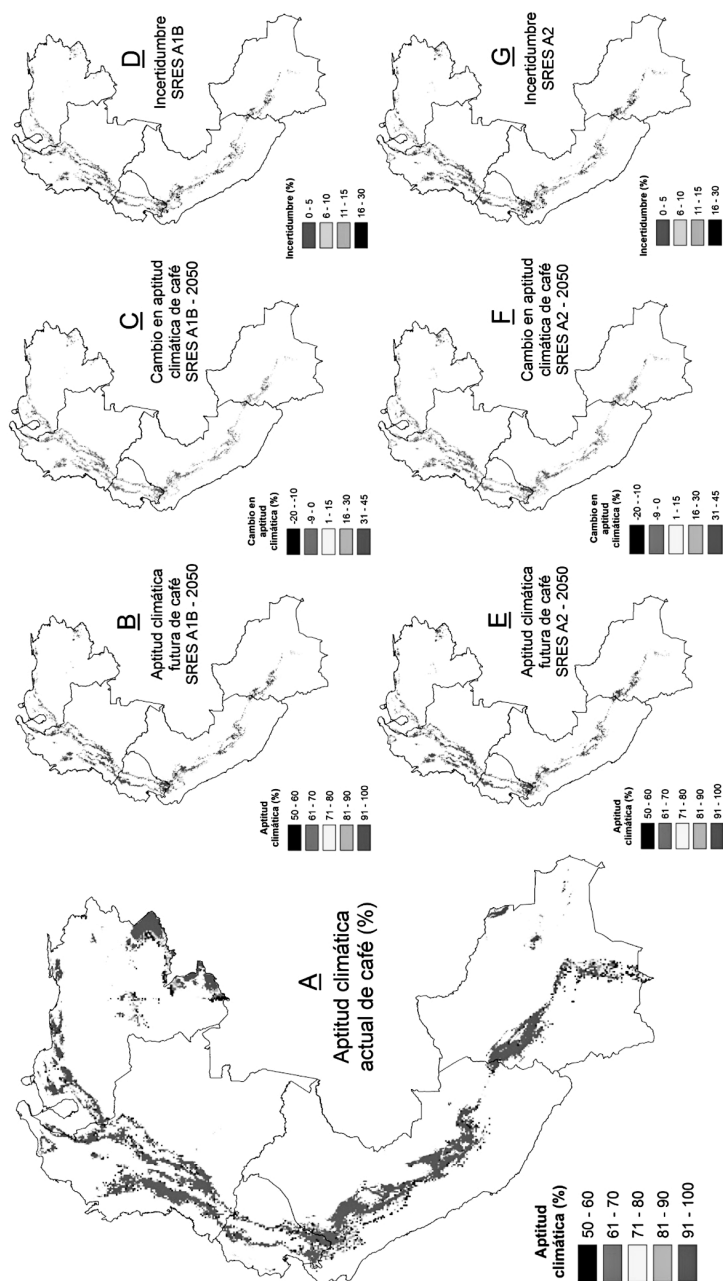
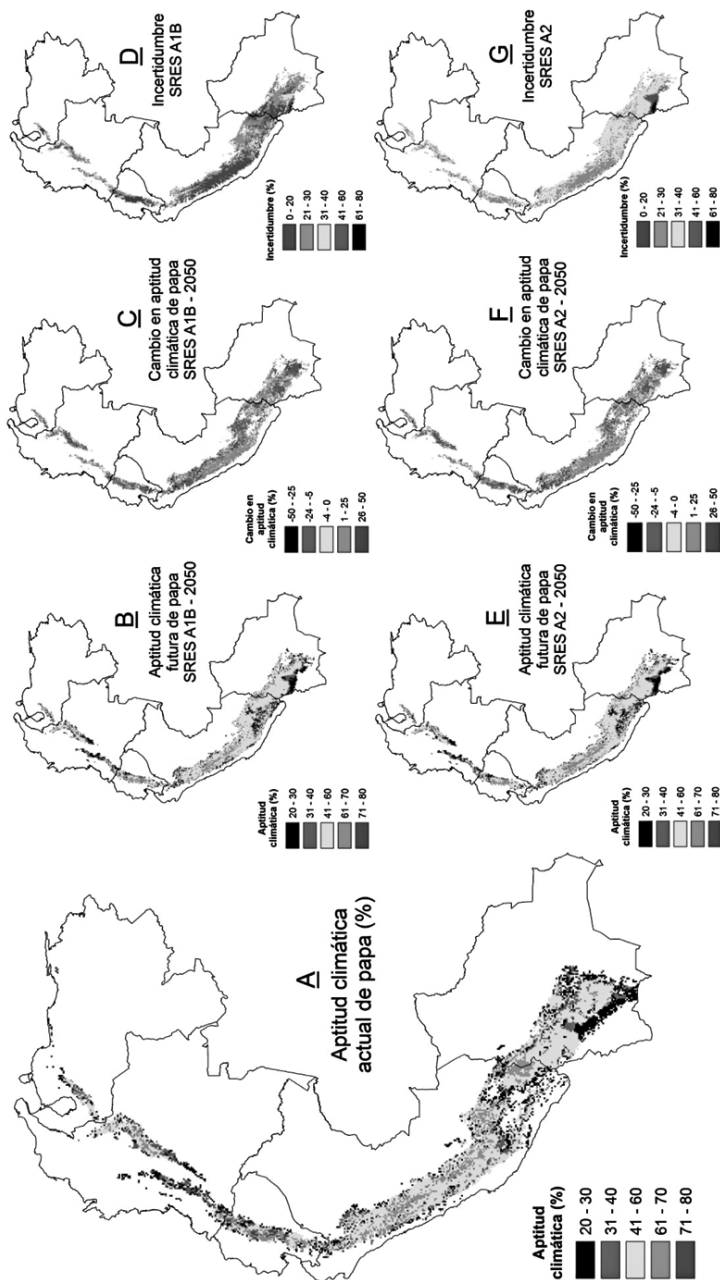


Figura 4

APTITUD CLIMÁTICA DE CAFÉ USANDO MaxEnt: (A) APTITUD CLIMÁTICA ACTUAL, (B) APTITUD CLIMÁTICA EN 2020-A1B, (C) CAMBIO EN APTITUD CLIMÁTICA EN 2020-A1B, (D) INCERTIDUMBRE EN 2020-A1B, (E) APTITUD CLIMÁTICA EN 2020-A2, (F) CAMBIO EN APTITUD CLIMÁTICA 2020-A2, (G) INCERTIDUMBRE EN 2020-A2



Por otro lado, en la figura 4 el panorama del año 2050 lo describen las figuras B y E, ahí se expone una situación donde se acentúan los efectos negativos y positivos, es decir, áreas que perdían aptitud climática continuarían haciéndolo y las áreas que ganaban aptitud climática harían lo mismo. Los mapas de cambio así lo reflejan, pues muestran ganancias en las zonas comprendidas desde el centro de Perú hacia el sur, incluso hasta llegar a Bolivia. Sin embargo, son también significativas las áreas que se ven impactadas negativamente, probablemente áreas más bajas. La incertidumbre sería menor para las proyecciones del SRES-A1B, donde gran parte del área involucrada se encuentra en el rango 0% - 20%. El SRES-A2 presenta mayor tasa de incertidumbre (21% y 40% para la mayoría de sus áreas).

Estimación de número de personas viviendo bajo la línea de pobreza en áreas afectadas positiva y negativamente

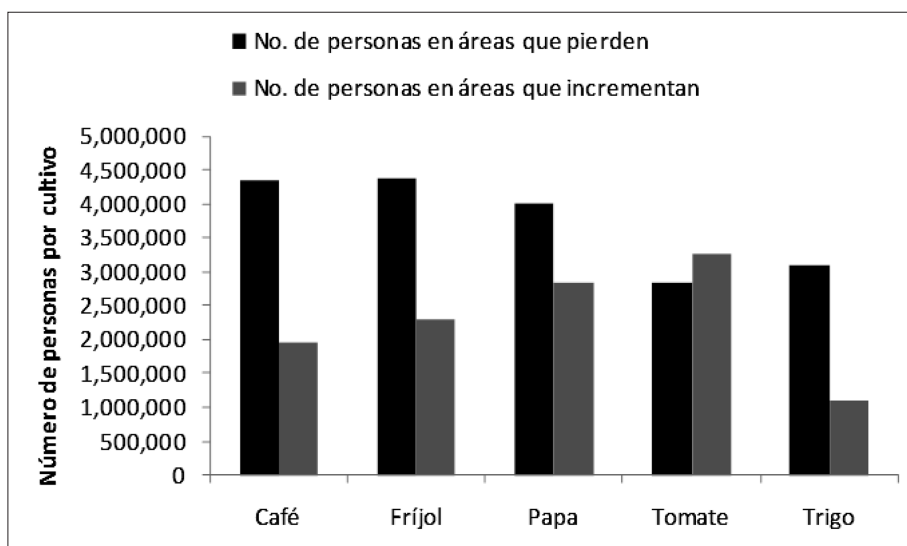
Las proyecciones de número de pobres involucrados en áreas que perderían o incrementarían su aptitud climática únicamente fueron realizadas para el periodo 2050 para el escenario de emisiones A1B (gráfico 9). Se usaron los resultados del modelo de nicho EcoCrop: el total de personas bajo la línea de pobreza en los países de los Andes tropicales es 24.9 millones. Teniendo en cuenta dicha cifra, y considerando que este número se mantendría constante hacia futuro, fueron estimados el número de personas en tal condición viviendo en áreas donde existiría un incremento o pérdida potencial de aptitud climática hacia el año 2050. Es por tal razón que se quiso mostrar de manera sintética cuál sería la situación para la región, sólo a manera de ejemplo.

En este sentido, el gráfico 9 resume la situación en la que se verían los países de los Andes tropicales, pues se verían involucradas un importante número de personas que viven bajo la línea pobreza (menos dos dólares americanos diarios - US\$ 2.00). La situación para el cultivo de café que el número de personas en áreas con pérdida de aptitud climática sería 4.3 millones y en áreas que incrementan su aptitud climática 2 millones de personas, en términos porcentuales 68.9% y 31.1%, respectivamente. El cultivo de frijol presentaría cifras similares 4.4 (65.6%) y 2.2 (34.4%) millones de

personas en áreas que pierden e incrementan su aptitud climática, respectivamente. Las cifras para el cultivo de papa son 4 (58.4%) y 2.8 (41.6%) millones de personas en áreas que pierden e incrementan su aptitud climática, respectivamente. El cultivo de tomate reportaría 2.8 (46.5%) y 3.3 (53.5%) millones de personas en áreas que pierden e incrementan su aptitud climática, respectivamente, demostrando particularmente que habría más personas en la condición de pobreza en áreas con incremento en aptitud climática. Y finalmente el cultivo de trigo reportaría las siguientes cifras: 3 (73.9%) y 1.1 (26.1%) millones de personas en áreas que pierden e incrementan su aptitud climática, respectivamente.

Gráfico 9

NÚMERO DE PERSONAS BAJO LA LÍNEA DE POBREZA EN ÁREAS QUE PIERDEN E INCREMENTAN
APTITUD CLIMÁTICA POR CULTIVO SEGÚN EcoCROP – SRES-A1B 2050



CONCLUSIONES

En el análisis de los 25 cultivos se identificaron los países con situaciones más críticas y se describió desde la peor situación hasta la mejor, obteniendo como resultado el

siguiente orden: Venezuela, Colombia, Bolivia, Ecuador y Perú. Sin embargo, los casos de Ecuador y Perú podrían verse como positivos dado que en ambos casos 17 de los 25 cultivos analizados presentarían cambios en aptitud climática positivos en uno o ambos escenarios de emisiones (A1B o A2) en el año 2050. Por el lado de la modelación de los cinco cultivos, cabe anotar que el tomate sería el caso más crítico por sus pérdidas en aptitud climática, seguido del trigo, el frijol, el café y la papa. Este último tendría muchas posibilidades de mantenerse en países como Ecuador y Perú.

En términos económicos se debe mencionar que Colombia y Venezuela son los países mayormente afectados, siendo los cultivos de café y papa los protagonistas de las peores situaciones. El país con la peor situación económica después de los antes mencionados es Bolivia. De otro lado, Ecuador y Perú tendrían beneficios al menos para uno de los cultivos en análisis. En el caso de Ecuador sería la papa con una ganancia USD\$3.7 millones y en Perú sería de nuevo la papa y el frijol, cada uno con USD\$87.9 y USD\$2.2 millones, respectivamente.

Los resultados generados por EcoCrop son muy generales y pueden sólo ser usados para describir tendencias generales en tiempo y espacio. Mientras que los resultados de MaxEnt se limitan únicamente a los países que concentran los puntos de evidencia. Por tal razón tales resultados podrían sub-estimar tanto la presencia actual de los cultivos, como el impacto del cambio climático sobre dicha presencia. Los valores de área afectada negativamente en toda la región serían significativamente mayores a los de área afectada positivamente. El sustento de tal aseveración lo registran todas las tablas y figuras que recogen la complejidad del análisis.

En el caso del café, al comparar los resultados de los dos modelos (EcoCrop y MaxEnt) es evidente que ambos apuntan al sur de Ecuador como una de las áreas que presentan (en la actualidad) y presentarían (2020 y 2050) condiciones óptimas para el crecimiento del cultivo. No obstante, es en esta misma zona donde los cambios serían significativamente negativos. Además, la tendencia a la pérdida de aptitud climática es innegable, ambos modelos coinciden que el nicho óptimo del cultivo se encuentra aproximadamente entre los 1 200 y 1 850 msnm, pero a la vez, describen una baja progresiva en la aptitud climática en los periodos 2020 y 2050. Por otra parte, el cultivo de café estaría en gran peligro de desaparecer en algunas áreas bajas si las

condiciones del clima mantienen la tendencia registrada por los dos modelos usados en el análisis, sería prudente pensar en algunas medidas de mitigación (tales como sombrero o migración) que influyeran directamente en el control de la temperatura. De otro lado, el cultivo de frijol registra una evidente tendencia a la disminución de su aptitud climática, principalmente en las zonas donde hubo ausencia de puntos de evidencia. Las proyecciones de EcoCrop son mucho más amplias que las presentadas por MaxEnt. Las proyecciones de ambos modelos apuntan a que las áreas con mejor aptitud climática están por encima de los 1 100 msnm. Mientras que EcoCrop se restringe a zonas entre 1 100 y 1 800 msnm, MaxEnt estima que las zonas con mejor aptitud climática están entre 1 800 y 2 600 msnm.

Para el cultivo de papa, tanto MaxEnt como EcoCrop describen buenas condiciones hacia el futuro. Ambos modelos coinciden en señalar las áreas de los Andes tropicales encima de los 3 000 msnm como aptas para el crecimiento del cultivo. Tal como con los demás cultivos, EcoCrop demuestra que el tomate puede ser cultivado en la actualidad a través de los Andes entre los 500 y los 1 200 msnm. En términos generales, la incertidumbre frente a las proyecciones de ambos modelos es baja, principalmente para EcoCrop. En el caso MaxEnt los valores más altos están por el orden del 40%. Es evidente el descenso en la aptitud climática del cultivo de trigo entre la situación actual y la futura (2050). Es claro además, que a futuro no sobresaldrían áreas alternas con condiciones de idoneidad para el crecimiento del cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Busby, J.R. (1991), BIOCLIM – a Bioclimatic Analysis and Prediction System, “Margules”, *C.R. & M.P.*, pp.64-68.
- Hijmans, R.J. *et al.* (2005), “Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas”, *International Journal of Climatology*, 25, pp.65-78.
- Hijmans, R.J. & Graham, C.H. (2006), “The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions”, *Global Change Biology*, 12, pp. 72-81.

- Hijmans, R.J. *et al.*, 2005a. DIVA-GIS Version 5.2. Manual.
- IPCC (2000), *IPCC special report. Emissions scenarios: summary for policymakers*, Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2007), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK: Cambridge University Press Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. & Schapire, R.E. (2006), "Maximum entropy modeling of species geographic distributions", *Ecological Modelling*, 190, pp.231-59.
- Phillips, S.J. & Dudík, M. (2008), "Modeling of Species Distributions with Maxent: New Extensions and Comprehensive Evaluation", *Ecography*, 31, pp.161-75.
- You, L. *et al.* (2000), Spatial Production Allocation Model (SPAM) 2000 Version 3 Release 2, Disponible en: <http://MapSPAM.info> (consultado en septiembre de 2010).

VARIACIÓN ESPACIAL DE LOS INDICADORES AGROCLIMÁTICOS: HISTÓRICO Y POR EFECTOS DEL ENOS (HORAS FRÍO)

Rebeca Granados Ramírez,¹

Stacy Hernández Millán,²

¹ *Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía,* ²

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza,

Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM

RESUMEN

Los cambios en los elementos del clima afectan la actividad económica en el sector rural, particularmente en las zonas de temporal, ya que las variaciones en la precipitación y temperatura influyen en la producción y en los rendimientos, situación que afecta todos los eslabones de la cadena productiva hasta el proceso de comercialización poniendo en riesgo la estabilidad de los mercados locales y regionales; además de influir negativamente en los ingresos y bienestar de los agentes económicos involucrados. Se ha puesto mucha atención sobre el impacto que El Niño ejerce en el aumento o disminución de la precipitación, sin embargo, poco se ha tratado acerca del efecto de dicho fenómeno en la temperatura; por tanto, el objetivo es analizar la distribución y el comportamiento del indicador derivado de la

temperatura (horas frío) a escala regional y estatal, que en los últimos años han sido motivo de mayor preocupación, dado que ha variado en su distribución espacial e impactado en los rendimientos de los frutales caducifolios ampliamente distribuidos en el Estado de México.

Palabras clave: fenómeno El Niño, indicadores agroclimáticos, horas frío, Estado de México.

SPATIAL VARIATION OF AGROCLIMATE INDICATORS: HISTORICAL AND EFFECT OF ENOS (CHILLING HOURS)

ABSTRACT

Changes in weather elements affect economic activity in rural areas, particularly in rainfed areas, as variations in precipitation and temperature influence the production and yields, which affects all stages of the supply chain to the marketing process endangering the stability of local and regional markets, in addition to adversely affect the income and welfare of economic agents involved. Much attention has been paid to the impact that El Niño exerts on the increase or decrease of precipitation, however, little has been tried on the effect of this phenomenon in temperature, so the goal is to analyze the distribution and behavior of the indicator derived from temperature (chilling hours) at regional and state level, that in recent years have been of greater concern, as varied in their spatial distribution and impacted deciduous fruit widely distributed in the State of Mexico.

Keywords: The Niño Southern Oscillations (ENSO), agroclimatic indicators, chilling hours, State of Mexico.

INTRODUCCIÓN

El clima es el componente del medio físico, cuya influencia se deja sentir en la actividad agrícola, los elementos que lo integran están sometidos a variaciones

en el tiempo y sus efectos son más visibles a corto plazo. El recurso clima ha pasado de estable a cambiante en los últimos años; la temperatura y precipitación han presentado variaciones importantes en el tiempo y en el espacio y causan preocupación, ya que sus efectos se traducen en pérdidas de alimento, entre otros problemas. Por tanto, se debe insistir en el conocimiento profundo del medio climático para que las especies se puedan desarrollar óptimamente, sin invertir grandes sumas de dinero en insumos.

La ciencia que se ha desarrollado como una necesidad de conocer las relaciones intrínsecas que existen entre la agricultura y el clima es la agroclimatología, misma que estudia el potencial climático de las regiones y las necesidades de los organismos vivos. El actual conocimiento del clima en el tiempo y espacio conllevará a una mejor planeación y aprovechamiento de los recursos agrícolas.

Entre los elementos meteorológicos y climáticos a considerar se tienen: radiación, temperatura, viento, precipitación, evaporación, etc.; cuya medición se realiza con equipo meteorológico, mismos que al ser monitoreados y registrados permiten analizar su comportamiento, ocurrencia, frecuencia, duración y predicción.

La cuantificación de los recursos climáticos tradicionalmente se ha hecho usando los promedios anuales o mensuales de los elementos, comúnmente registrados en las estaciones meteorológicas. Los resultados son importantes para conocer su distribución y finalmente el clima en una región; este conocimiento no es suficiente, es necesario investigar además de la información climatológica convencional, índices que puedan relacionarse directamente con el potencial productivo y desarrollo de cultivos. La evaluación de los recursos climáticos en forma de índices agroclimáticos permite hacer una planificación de la agricultura, así estos estudios cobran un gran significado dentro del campo de la planeación agrícola, su aplicación contribuye a asegurar la eficiencia de las áreas agrícolas, minimizando riesgos y maximizando la cantidad y calidad de las cosechas.

A raíz de los impactos que se han presentado en diversos ecosistemas y actividades productivas por los cambios regionales y/o globales del clima, la aplicación de los estudios agroclimáticos ha tomado un fuerte impulso.

Los indicadores agroclimáticos

Son las expresiones cuantitativas que establecen la relación entre el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos con los elementos climáticos. Los indicadores agroclimáticos son diversos, algunos pueden proceder de un sólo elemento del clima como las horas frío, constante térmica, etc., derivados de la temperatura; sequía, porcentaje de lluvia invernal, precipitación total anual, etc., derivados de la precipitación. Existen también de evaluación compleja, las cuales combinan ambos elementos del clima: P/T, evapotranspiración, duración del periodo de crecimiento y otros.

De acuerdo con la escala de aplicación los indicadores pueden ser a nivel nacional, regional y local. Mediante herramientas de análisis espacial los indicadores son cartografiados y así poder conocer la distribución en el espacio, a su vez relacionarlos con otros elementos físico-geográficos y sugerir propuestas de adaptación y ordenación del espacio agrícola. Los indicadores se listan en tres grupos: indicadores térmicos, derivados de la precipitación y de fenómenos meteorológicos (cuadro 1).

Cuadro 1
INDICADORES AGROCLIMÁTICOS

<i>Elementos</i>	<i>Indicadores</i>	<i>Índices</i>
Temperatura		Precipitación
Temperatura ambiente	Media	Precipitación total anual
Temperatura máxima	máxima extrema	Precipitación total mensual
Temperatura mínima	mínima extrema	Precipitación total de verano
Temperatura diurna		Porcentaje de precipitación de verano
Temperatura nocturna		Probabilidad de lluvia
		Días con precipitación apreciable
Índices		
Fototemperatura		Índice de humedad
Nictotemperatura		Evaporación total
Fluctuación entre foto y nictotemperatura		Evaporación potencial
Unidades calor		Evapotranspiración potencial

Constante térmica	Inicio de estación de crecimiento
Horas frío	Término de estación de crecimiento
Amplitud térmica	Duración de la estación de crecimiento
Unidades fototérmicas	Inicio del periodo húmedo
	Terminación del periodo húmedo
Fenómenos meteorológicos	
Fecha de la primera helada	Fecha de la última helada
Periodo de heladas	Probabilidad de heladas
Probabilidad de granizadas	Número de días nublados
Número de días soleados	Sequía relativa

Indicadores propuestos para una investigación agroclimática (Mosíño y García, 1966; Wilsie 1966; Villalpando 1985).

La producción hortofrutícola en México se mantiene como una industria competitiva a nivel mundial (Calderón, 1993; Siller, 1999). El durazno está considerado entre los 50 cultivos de mayor importancia a nivel nacional. Se trata de un frutal caducifolio que presenta la condición de requerir una etapa de dormancia durante el invierno como medio para sobrevivir ante las condiciones climáticas adversas, y que necesita cumplir cierto número de horas-frío para poder prosperar cuando las condiciones se vuelvan favorables.

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta el cultivo de durazno es la falta de conocimiento de las horas-frío que se presentan en diferentes regiones del país, por lo que en muchas ocasiones, la producción se ve afectada cuando se establece un huerto en una zona en donde no se cumplen los requerimientos de frío de la variedad sembrada.

Variación climática y efectos de El Niño en la ocurrencia de horas-frío

Las contribuciones de la variación climática son dadas por diferentes fenómenos atmosféricos: El Niño/ Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés), la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO por sus siglas en inglés) y la Oscilación Decadal del

Pacífico (PDO por sus siglas en inglés), que se manifiestan en el territorio con lluvias torrenciales y sequías severas que inducen en general a pérdidas económicas.

Uno de los fenómenos que ampliamente se ha estudiado es el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), se presenta cuando ocurre un calentamiento anómalo de las aguas superficiales del Este del Pacífico Ecuatorial que se extiende hasta la línea internacional del tiempo (180 W) (Jaimes, 1999; Pereyra-Díaz *et al.*, 2004; Magaña (Editor), 2004). Históricamente, el ENSO se ha presentado a intervalos irregulares de 2 a 7 años con una duración de 1 a 2 años, aunque recientemente ha ocurrido con mayor frecuencia de 3 a 4 años con una duración de 12 a 18 meses (Magaña, Editor, 2004; Silva, 2008).

En México, El Niño tiene serias repercusiones, de manera general se puede decir que las lluvias de invierno se intensifican y las de verano se debilitan. En la zona centro y norte del país se incrementan los frentes fríos en invierno, mientras que en verano aparece la sequía y disminuye el número de huracanes en el Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México (Magaña *et al.*, 1998).

En los últimos 50 años han ocurrido 12 eventos El Niño (Magaña, editor, 2004), siendo el de 1997-1998 el más intenso con anomalías positivas de temperatura superficial del mar en el extremo oriental del Océano Pacífico Ecuatorial de hasta 5-6°C (Jaimes, 1999; Magaña, editor, 2004).

En la región del centro y sureste mexicano, el impacto de El Niño en el clima invernal está fuertemente relacionado con la actividad de los Nortes, cuyo número e intensidad al parecer se ve afectado por los cambios en la circulación atmosférica media. En invierno El Niño, la corriente de chorro de latitudes medias, que es en donde se encuentran inmersos los ciclones, se desplaza hacia el sur, provocando una mayor incidencia de frentes fríos y lluvia en el norte y centro del País (Magaña *et al.* 1997). La anómala presencia de frentes fríos de manera continua durante inviernos es causada por El Niño, provocando que las temperaturas en gran parte del país se presenten por debajo de lo habitual, llegando en ocasiones a producirse nevadas en lugares en donde esto no ocurre en condiciones normales, como las ocurridas en 1997 en Jalisco, Guanajuato y el Distrito Federal como resultado de El Niño (Magaña, editor, 2004).

La elección del cultivar para una explotación comercial es el paso inicial más importante del que depende el éxito o fracaso de una empresa (Rodríguez-Alcázar, En Jiménez, 1991). Debido a que la elección de la o las variedades por plantar está íntimamente ligada a sus requerimientos de frío invernal, es necesario conocer éstos para tomar una decisión correcta. Muñoz-Santamaría y Rodríguez-Alcázar (1999), hicieron una recomendación de las variedades de durazno para el Altiplano Nacional (cuadro 2), éstas se presentan a continuación:

Cuadro 2
VARIETADES DE DURAZNO RECOMENDADAS PARA EL ALTIPLANO CENTRAL

<i>Variedad</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>	<i>Patente</i>
Diamante mejorado CP 88-2C	110	Mayo-junio	110	2	0	10	250	Resistencia a cenicilla Susceptible a monilinia	C.P.
Diamante especial CP 88-8C	120-125	Junio	120	1	9	9	250	Resistente a cenicilla y monilinia	C.P.
Oro-B F1 88-25C	105	Mayo	135	2	10	9	275	Medianamente resistente a cenicilla	C.P.
Oro Azteca F1 86-31C	130	Julio	140	2	10	10	275	Medianamente resistente a cenicilla	C.P.
CP 87-9	140	Julio	160	1	10	10	350	Susceptible a monilinia	C.P.
Oro C	120	Mayo-junio	120	3	10	10	300	Resistente a monilinia	C.P.
CP 90-5C	105	Junio	120	1	10	9	250	Resistente monilinia	C.P.
CP 90-2	90	Mayo	90	3	10	8	300	Resistente a cenicilla y monilinia	C.P.
Diamante CP 91-15	120	Junio	110	1	3	8	250	Resistente cenicilla	Brasil
	135	Temporal	130	1	10	41	375	Floración tardía, zonas con heladas	C.P.

A: Días de flor a fruto, B: Mes de cosecha, C: Peso del fruto en gramos, D: Color exterior del fruto (1=100% amarillo / 10=rojo), E: Forma del fruto (1=peor forma / 10=mejor forma —redondo—), F: Firmeza del fruto (1=menos firme / 10=mejor firmeza), G: Requerimientos unidades frío, H: Resistencia a enfermedades.

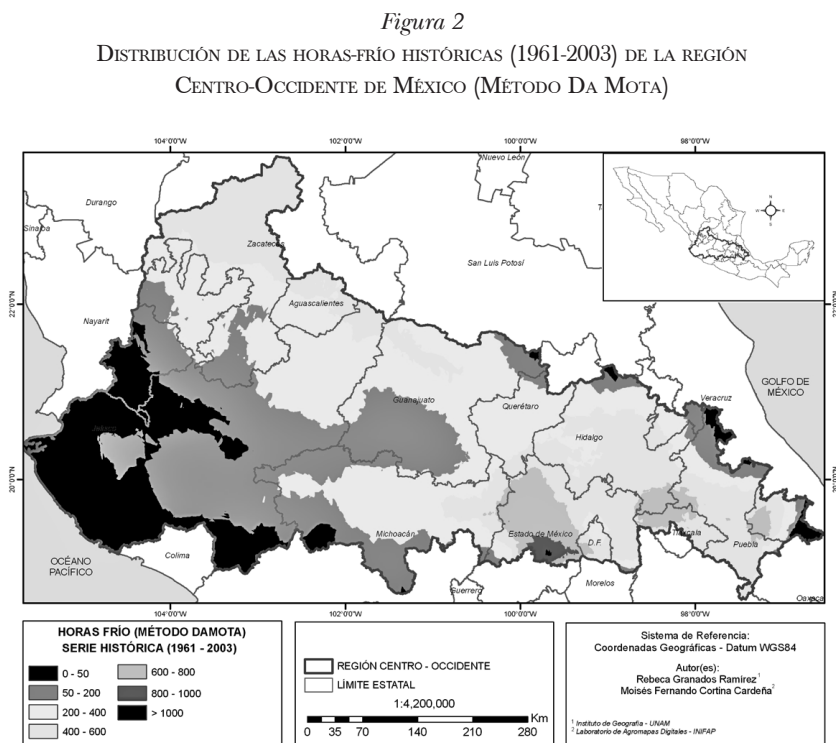
Metodología

Se obtuvieron los datos de horas-frío históricas para el periodo 1961-2003 presentes en 640 estaciones (zona Centro occidente) y 120 estaciones climatológicas del estado de México, se recopilaron y analizaron los datos de temperatura media mensual de noviembre, diciembre, enero y febrero mediante el uso de la fórmula propuesta por Da Mota.

Se obtuvieron mapas con los datos históricos y de años El Niño 1997 y 1998. Se analizaron las diferencias o similitudes presentes en los mapas de los años El Niño con respecto al histórico. Además, se hizo una revisión de las variedades de durazno con requerimientos de frío conocidos para determinar cuáles se pueden cultivar en el estado conforme al frío presente en cada zona. La mayoría de las plantas, principalmente aquellas de regiones templadas, experimentan en algún momento de su ciclo vital; periodos durante los cuales su crecimiento queda temporalmente suspendido o al menos retardado, es entonces cuando se dice que las plantas se encuentran en dormancia, lo cual representa un medio de defensa ante los factores climáticos adversos (Devlin, 1982; Hopkins y Hüner, 2009; Calderón 1993). El concepto de horas-frío es de particular importancia en la fruticultura, debido a que en México se cultivan una gran variedad de caducifolios de importancia económica y alimentaria para el país. Las horas-frío se refieren al número de horas que pasa la planta, durante el periodo de reposo invernal, a temperaturas iguales o inferiores a un umbral, siendo frecuente que esta temperatura umbral se fije en 7°C. El conocimiento de dichos requerimientos es vital en la planeación frutícola de una zona en particular. Cuando se pretende lograr el establecimiento de un cultivo caducifolio, lo primero que se debe conocer es la cantidad de horas-frío que se presentan en la zona elegida, ya que de no cumplirse los requerimientos de la variedad escogida, los árboles no florecerán o no lo harán en tiempo y forma, lo que implica daños importantes a la producción o incluso la necesidad de aplicar técnicas que compensen la falta de frío, como productos químicos, lo que si bien tiene buenos resultados, genera un gasto mayor para sacar adelante la producción.

Resultados

En la región Centro-Occidente de México, se encuentran zonas desde 0 horas frío, hasta zonas superiores a las 1000 (figura 2).



Se habla mucho del impacto que El Niño ejerce en el aumento o disminución de la precipitación, sin embargo, poco se ha tratado del efecto de dicho fenómeno en la temperatura.

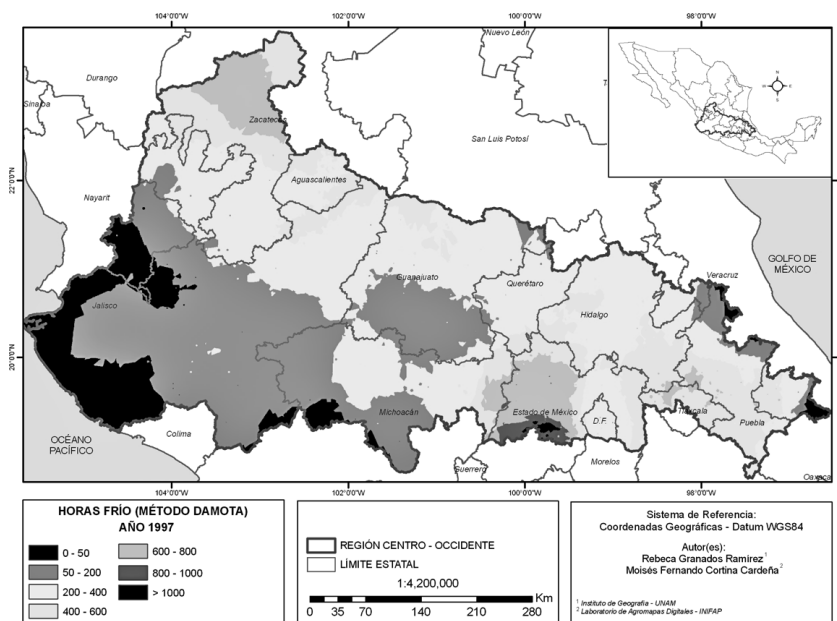
Como ya se mencionó, en México durante el verano El Niño provoca que las lluvias de la mayor parte del país disminuyan, principalmente en el centro del país. La disminución de nubes permite que una mayor cantidad de radiación entre a la

atmósfera y llegue a la superficie, lo que ocasiona que se registren temperaturas por encima de lo normal en gran parte del territorio nacional. Por el contrario, durante los inviernos El Niño, presenta temperaturas menores a lo normal (Conde, 2009). Además, la disminución en la cantidad de humedad sobre el altiplano central, resulta en un mayor enfriamiento radiactivo y heladas inesperadas sobre el centro de México.

De esta forma, se presenta una mayor ocurrencia de horas-frío en el centro de México (figura 3) en comparación con las horas-frío históricas para la misma zona. Las zonas de 0-50 horas-frío disminuyen, así como también lo hace la zona de 400-600 horas-frío, ya que más regiones son ocupadas por los intervalos de 200-400 y 600-800 horas-frío.

Figura 3

DISTRIBUCIÓN DE LAS HORAS-FRÍO EN LA REGIÓN CENTRO-OCCIDENTE EN EL AÑO 1997
(MÉTODO DA MOTA)



La información a nivel regional fue manipulada mediante sistemas de información geográfica con el objetivo de obtener a mayor detalle la distribución de horas-frío en el Estado de México (figura 4). La distribución histórica se presenta de la siguiente forma:

0-200 Se presentan al suroeste del estado, en la región cálida y semicálida, ocupando la mayor parte de la Cuenca del Balsas hasta el límite sur del Sistema Volcánico Transversal, comprende la mayor parte del la región de Tejupilco y parte de la región Coatepec Harinas. Al sureste se presentan en parte de los municipios de Ecatezingo, Atlautla, Ozumba y Tepetlixpa.

200-400 Ocupan una franja al oeste del estado, desde Malinalco y Zacualpan, hasta Oztolapan y Donato Guerra en donde predominan los climas semicálidos y templados. Al norte del Distrito Federal en los municipios de Nezahualcóyotl y parte de Ecatepec en donde el clima es semiseco templado y Tlalnepantla, Tultitlán

Figura 4

ACUMULACIÓN DE HORAS-FRÍO EN EL ESTADO DE MÉXICO EN EL PERIODO 1961-2003

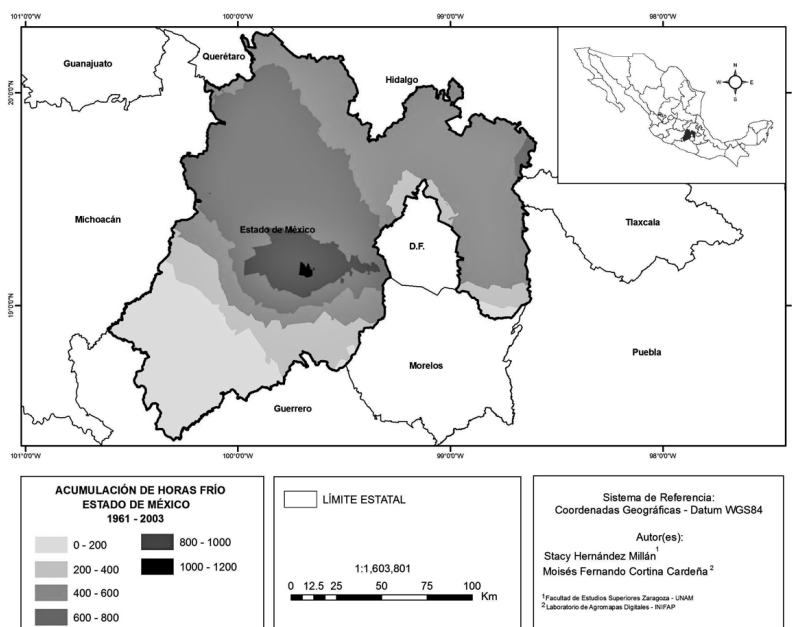
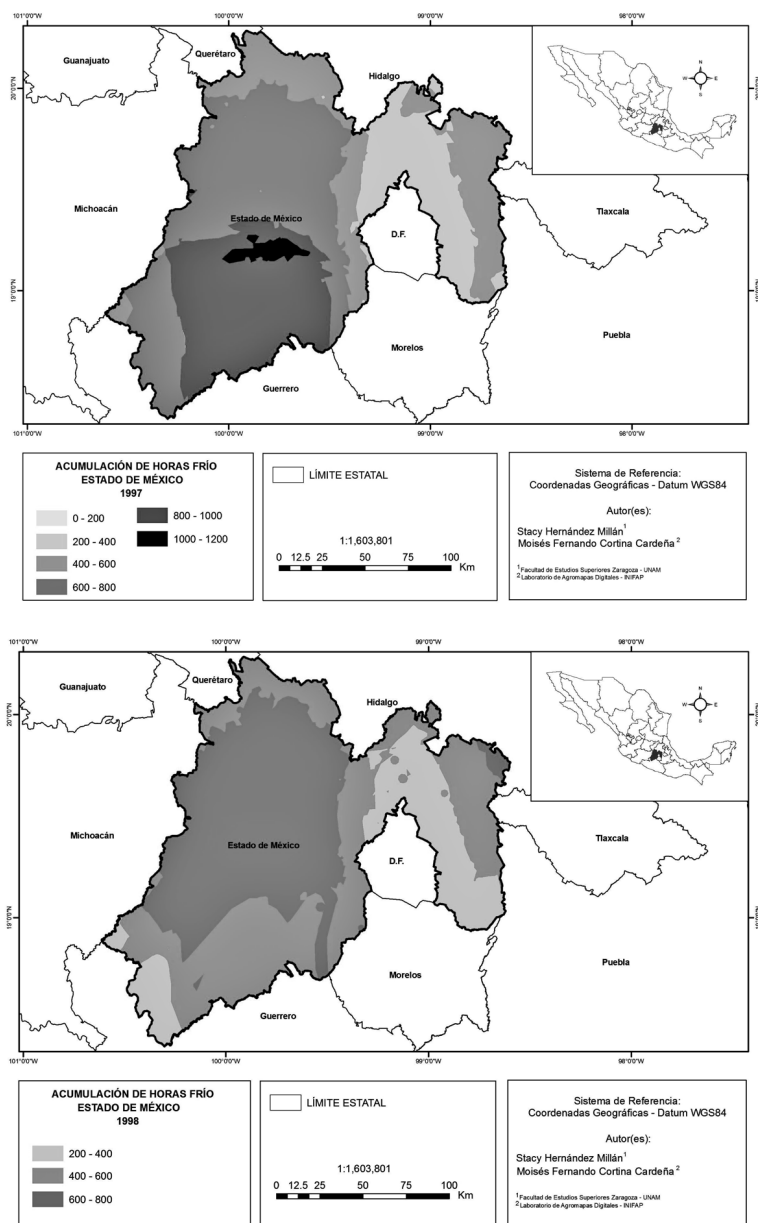


Figura 5

ACUMULACIÓN DE HORAS-FRÍO EN EL ESTADO DE MÉXICO A) 1997 B) 1998



y Naucalpan, con clima templado. Al este del estado se localiza una pequeña zona en los municipios de Juchitepec, la parte norte de Ozumba y Atlautla y sur de Amecameca.

400-600 En el suroeste se manifiestan desde Ocuilan hasta Villa de Allende, en una franja que rodea al distrito de Toluca. Al norte, en una pequeña parte de los municipios de Acambay y Temascalcingo, en los límites con Querétaro y Michoacán y desde Aculco pasando por casi toda la región Jilotepec y la mayor parte de la región Zumpango y Texcoco en el este. Dicha región coincide casi en su totalidad con la región hidrológica Pánuco.

600-800 Al oeste del estado en la mayor parte de la región Atlacomulco y hasta Ocoyoacac en el norte del distrito Toluca y al sur de esta región hasta Tianguistenco. Esta zona corresponde a la región Hidrológica Lerma Santiago y a la parte norte de la cuenca del Balsas. Además de una pequeña parte de los municipios de Axapusco y Nopaltepec al noreste del estado.

800-1000 Se presentan en la zona centro de la región Toluca, y en una parte de los municipios de Xalatlaco, Tianguistenco y Capulhuac al este de dicha región. Ocupa la parte sur de la Cuenca del Lerma Santiago. El clima predominante en la zona es Templado y semifrío conforme se acerca al centro de la región.

1000-1200 En los alrededores del Nevado de Toluca.

Respecto a la producción de durazno en estos años, en primer lugar en los inviernos se presentan temperaturas menores a lo normal, como pudo observarse en los mapas, sin embargo, la disminución en la cantidad de humedad sobre el centro del país ocasionada por la disminución de las lluvias en verano, resulta en un mayor enfriamiento radiactivo y heladas inesperadas sobre el centro de México, lo que resulta muy perjudicial para la producción. Las estadísticas agrícolas de 1997-1998, no reportan alteraciones provocadas por pérdidas de cosechas, se mantuvo estable en el rango de las 2000 a 2500 hectáreas. Sin embargo, con referencia a la producción, en 1996 se produjeron casi 25 mil toneladas de durazno, pero al presentarse el fenómeno El Niño en 1997, la producción disminuyó en cerca de ocho toneladas y el rendimiento cayó de 12 ton/ha a 7.3 y hasta 6.4 en 1999 (cuadro 3).

Cuadro 3
 SUPERFICIE SEMBRADA Y COSECHADA, PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO DE DURAZNO EN EL
 ESTADO DE MÉXICO EN LOS AÑOS 1996, 1997, 1998 Y 1999 (SIAP, 2010)

<i>Año</i>	<i>Superficie sembrada (Ha)</i>	<i>Superficie cosechada (Ha)</i>	<i>Producción (Ton)</i>	<i>Rendimiento (Ton/Ha)</i>
1996	2 089	2 089	24 892	11.92
1997	2 322	2 322	17 082	7.36
1998	2 268	2 268	16 902	7.45
1999	2 550	2 550	16 353	6.41

Elaboración propia.

Parte de la disminución en la producción pudo deberse a la presencia de heladas inesperadas consecuencia de El Niño en el territorio nacional, ya que al originarse una mayor cantidad de frío, los requerimientos de los caducifolios se cumplen más rápidamente, y de presentarse algunos días con temperaturas favorables, las yemas pueden comenzar a brotar de manera temprana. De presentarse nuevamente las bajas temperaturas, los resultados pueden ser devastadores sobre éstas, provocando daños importantes o incluso matándolas por completo.

Cabe hacer mención que El Estado de México inició su producción comercial de durazno en la década de los setenta. La superficie establecida en el 2009 fue de 3 282 hectáreas y se cosecharon 3 090 con una producción de 28 529 toneladas y un rendimiento promedio de 9.23 toneladas/hectárea (SIAP, 2010).

El valor de la producción en el estado es de 200 millones de pesos y genera alrededor de 150 mil empleos al año. El estado se encuentra dividido en ocho Distritos de Desarrollo Rural (DDR). Por superficie tanto de riego como de temporal, destaca el DDR 078, Coatepec Harinas, ya que ocupa el nivel más alto en superficie sembrada de durazno (cuadro 4) (Larqué-Saavedra *et al.*, 2009). La mayor superficie de producción del Estado de México se localiza al sur en los municipios de Sultepec,

Almoloya de Alquisiras, Amatepec y Coatepec Harinas, donde predomina un solo cultivar de maduración temprana (“Diamante”) (Espíndola *et al.*, 2009). Existen otras zonas productoras, en el norte del estado en el municipio de Villa del Carbón, así como en el noreste, en Amecameca y Atlautla, en donde se introdujo el cultivo de durazno como alternativa ante el bajo rendimiento obtenido en el cultivo de maíz. La variedad predominante también es Diamante (Rivera-Amaro Comunicación personal, 2010).

Cuadro 4

SUPERFICIE SEMBRADA, RENDIMIENTO Y VOLUMEN DE PRODUCCIÓN EN RIEGO Y TEMPORAL DE DURAZNO DIAMANTE, ESTADO DE MÉXICO, 2007 (LARQUÉ-SAAVEDRA *ET AL.*, 2009)

DDR	Riego			Temporal		
	Superficie sembrada (ha)	Volumen de producción (ton)	Rendimiento (t/ha)	Superficie sembrada (ha)	Volumen de producción (ton)	Rendimiento (t/ha)
Atlacomulco	3	8	2.7	9	36.5	4.1
Coatepec Harinas	1 988	29 350	14.8	236	2 360	10
Jilotepec	50	389.5	7.8	17	130.6	7.7
Tejupulco	16	165	10.3	0.5	1	2
Valle de Bravo	28	214	7.6	11	102	9.3
Zumpango	5	2.5	0.5	8	0	0

Elaboración propia.

Efectos por la falta de frío en durazno

La deficiente acumulación de frío durante el periodo de reposo invernal es un factor perjudicial y en muchas ocasiones limitante para el buen funcionamiento vegetativo y productivo de los frutales caducifolios (Valentini *et al.*, 2002).

Cuando la exigencia de frío invernal no es satisfecha, se presentarán en la siguiente primavera síntomas adversos en alguna parte del árbol o incluso en todo en los casos más graves. Las consecuencias más importantes se presentan a continuación (INIFAP, 2009):

- El retraso en la apertura de yemas
- Brotación irregular y dispersa de yemas
- Bajo porcentaje de brotación de yemas florales
- Anticipación en la apertura de las yemas terminales
- Fuerte dominancia apical que ocasiona atraso en el inicio de la producción en las plantas jóvenes
- Caída de yemas: que es el efecto más grave que puede provocar una reducción en rendimientos
- Aborto del estilo
- Alteraciones en el desarrollo del polen
- Deformaciones de hojas
- Aparición de pistilos múltiples que originan frutos dobles
- “Chamuscado” de yemas que mueren antes de desarrollarse el brote

La intensidad del daño estará en función del déficit de frío que la planta haya sufrido, así como de la etapa fenológica en que se encuentre la planta (Calderón, 1993; Valentini *et al.*, 2002).

La elección de la variedad adecuada para una plantación es quizás el factor más importante que se debe considerar al establecer un huerto comercial, ya que a pesar de que existen otros factores como el suelo y las técnicas de manejo, si la variedad no está adaptada al clima de la zona, el sistema de producción estará destinado al fracaso. De acuerdo con los resultados obtenidos acerca de la distribución de frío en el Estado de México, las zonas aptas para el cultivo de durazno de acuerdo con sus requerimientos, son aquellas que van desde 200 hasta 1000 horas-frío. Por la ubicación de la zona con más de 1000 horas-frío, ésta queda descartada, ya que aunque existen variedades con tales necesidades de frío, la orografía de esta región no permite el establecimiento de este tipo de cultivos.

CONCLUSIONES

Los índices agroclimáticos son importantes en la toma de decisiones operativas regionales para establecer fechas de siembra, introducción de cultivos de menor periodo de desarrollo, variedades resistentes a sequía, a las bajas temperaturas, cambiar la ubicación de los cultivos de zonas susceptibles a granizada, entre otros.

La acumulación de frío para los frutales caducifolios es un factor limitante para la floración y en consecuencia, para la obtención de frutos para el consumo humano. Dicha acumulación de frío se ve afectada por diversos factores. El fenómeno de El Niño trae como consecuencia una serie de alteraciones en el clima a escala global tanto en los patrones normales de lluvia como de temperatura. Uno de estos cambios es la variación en la presencia de frío, teniéndose para México que éste tiene un aumento, y por consiguiente se presenta una mayor acumulación de horas-frío. Sin embargo, la presencia de heladas inesperadas provocadas por el mismo fenómeno, representa un gran peligro para la producción. Esta situación ha generado que actualmente se realicen más investigaciones con la finalidad de entender y hasta cierto punto, predecir este fenómeno, con base en esto se ha comenzado a emitir pronósticos sobre la ocurrencia y evolución de El Niño, situación que resulta de gran importancia para la planeación agrícola.

La utilidad de conocer la distribución del indicador es no sólo poder prepararse para contrarrestar los impactos negativos del fenómeno, sino también para conocer cuáles serán las condiciones climáticas imperantes y de esta forma considerarlas como un elemento adicional de planeación.

BIBLIOGRAFÍA

- Calderón, E. (1993), *Fruticultura general. El esfuerzo del hombre*, México, Limusa.
- Devlin, R. (1982), *Fisiología vegetal*, 4ª edición, Ediciones Omega, Barcelona, 517 pp.
- Espíndola, M. C., R. D. Elías, J. J. Aguilar, E. Campos (2009), *Guía técnica para la producción de durazno en la región sur del Estado de México*, Fundación Salvador Sánchez Colín, CICTAMEX, S. C., Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, 77 pp.

- Hopkins, W. y N. Hüner (2009), *Introduction to plant physiology*, 4^a edition, John Wiley & Sons, Inc., United States of America, 503 pp.
- Jaimes, E. (1999), "Condiciones meteorológicas a nivel global y local, Cambio Climático y El Niño 1997-1998", en Tarazona, J. y E. Castillo (editores), *El Niño 1997-1998 y su impacto sobre los Ecosistemas Marino y Terrestre*, Rev. Perú. Biol, vol. extraordinario: 1-8, Facultad de Ciencias Biológicas UNMSM, 1-8 pp.
- Larqué-Saavedra, B.S., D. Sangerman-Jarquín, B. Ramírez-Valverde, A. Navarro-Bravo, M.E. Serrano-Flores (2009), "Aspectos técnicos y caracterización del productor de durazno en el Estado de México, México", *Agríc. Téc. Méx.*, vol.35, no.3 305-313 pp. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000300007&lng=es&nrm=iso>.
- Magaña, V. (editor), (2004), *Los impactos de El Niño en México*, Centro de Ciencias de la Atmósfera, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación, 229 pp.
- Magaña, V. J.L. Pérez y C. Conde (1998), "El fenómeno de El Niño y la Oscilación del sur y sus impactos en México", *Revista Ciencias*, julio-septiembre 51, 14-18 pp.
- Mosiño, P y E. García (1966), "Evaluación de la sequía intraestival en la República Mexicana", *Conferencia Regional Latinoamericana*, Unión Geográfica Internacional, tomo III, pp. 500-615.
- Muñoz-Santamaría G. y J. Rodríguez-Alcázar (1999), "Establecimiento de un huerto de durazno", Sistema de Agronegocios Agrícolas, ficha 2, SAGARPA, Subsecretaría de Desarrollo Rural, Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural.
- Pereyra-Díaz, D., U. Bando, M. A. Natividad (2004), "Influencia de La Niña y El Niño sobre la precipitación de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, México", Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz 20(39): pp. 33-38 <http://www.ujat.mx/publicaciones/uciencia>
- Rodríguez-Alcázar, J., *Elección de cultivares de durazno*, en Jiménez, P. (1991), *El cultivo de durazno. Curso teórico-práctico*, Colegio de Postgraduados. Centro de Fruticultura, Uruapan, Michoacán, México, 146 pp.
- SIAP (2010), <http://www.siap.gob.mx>

- Siller, J. (1999), "Situación actual de la industria hortofrutícola en México", Conferencia del 3^{er} Simposio Nacional de Horticultura, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C., México.
- Silva, E. (2008), Efectos del cambio y variabilidad climáticos en el cultivo de soya (*Glycine max* (L.) en el municipio de González, Tamaulipas, tesis de licenciatura en Geografía, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 142 pp.
- Valentini, G., L. Arroyo y R. Uviedo (2002), "Déficit de frío en duraznero", Frutales de carozo, INTA San Pedro, Buenos Aires, Argentina, 85-89 pp.
- Villalpando, I. F. (1985), *Metodología de la investigación en agroclimatología*, Curso de Orientación para Aspirantes a Investigadores del INIFAP, SARH, México, 183 pp.
- Wilsie, C. P. (1966), *Cultivos, aclimatación y distribución*, Acribia, Zaragoza, España, 490 pp.

GASES CON EFECTO INVERNADERO (GEI) EN MAÍZ *ZEA MAYS* L. CON FERTILIZACIÓN ORGÁNICA *VERSUS* CONVENCIONAL

Rodolfo Correa Yotengo, Marina Sánchez de Prager
Universidad Nacional de Colombia-Sede Palmira

RESUMEN

En un suelo *Humic Dystrudepts* del Valle del Cauca (Colombia) se evaluaron dos abonos verdes (AV): *Mucuna pruriens* y *Axonopus scoparius*, y compost (C) sobre la emisión de GEI. En un arreglo de bloques completos al azar se establecieron cinco tratamientos con tres repeticiones: Testigo Absoluto, Fertilización de síntesis industrial, Abono verde (AV), Compost (C) y, Abono verde + Compost (AV + C). Los AV se sembraron intercalados, cosecharon en prefloración de la leguminosa, mezclaron, incorporaron y se sembró el cultivo. Para estimar las emisiones CH_4 , N_2O y CO_2 se utilizó un sistema cerrado de cámaras estáticas (Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT, 2010, p. 112), con lecturas en seis etapas del cultivo.

El análisis de varianza (software SAS versión 9.13, 2007) mostró diferencias altamente significativas entre etapas, explicables en términos de precipitación en la zona y estado fenológico del cultivo y entre bloques, por cambios en la pendiente del terreno. Hubo diferencias altamente significativas entre tratamientos. La práctica que

más influyó sobre GEI, fue el disturbio del suelo por la incorporación de los AV y C. En varias investigaciones se ha encontrado un efecto similar, dado que se incrementa la actividad microbiana sobre la materia orgánica adicionada e incorporada, mediada por las propiedades del suelo. El orden de aporte fue: CO₂ (66%), N₂O (29.6%) y CH₄ (4.4%). El menor potencial de calentamiento global (PCG), representado en equivalentes de CO₂ correspondió a testigo y c; en cuanto a etapas, al momento inicial, sin disturbio del suelo. Por el contrario, el PCG se incrementó con el fertilizante de síntesis, AV, individuales y/o con C e incorporados.

Palabras clave: abonos verdes, compost y maíz (*Zea Mays L.*)

GREENHOUSE GASES (GHG) IN MAIZE *ZEa MAYS L.* WITH CONVENTIONAL *VERSUS* ORGANIC FERTILIZATION

ABSTRACT

In a soil *Humic Dystrudepts* In Valle del Cauca (Colombia) two green manures (GM) *Mucuna pruriens* and *Axonopus scoparius*, and compost (C) were evaluated over GHG emissions. In an arrangement of randomized complete blocks with five treatments, three repetitions were established: Absolute witness, Industrial synthesis fertilization, green manure (GM), Compost (C) and green manure + compost (GM + C). The AV interspersed seeded, harvested in the pre-flowering legume, mixed, joined and the crop was planted. To estimate CH₄, N₂O and CO₂ emissions, a closed static cameras system (International Center for Tropical Agriculture, CIAT, 2010, p. 112), was used with readings in six stages of the crop.

The analysis of variance (SAS software version 9.13, 2007) showed highly significant differences between stages, explicable in terms of precipitation in the area and crop growth stage and between blocks, by changes in the slope. There were highly significant differences between treatments. The most influential practice over GHG was the soil disturbance due to the incorporation of GM and C. In several studies a similar effect has been found, since the microbial activity over the added

and incorporated organic matter is increased, mediated by soil properties. The order of contribution was: CO₂ (66%), N₂O (29.6%) and CH₄ (4.4%). The lower global warming potential (GWP), represented in CO₂ equivalents corresponded to witness and C; in terms of stages, at the initial moment, without soil disturbance. By contrast, the PCG was increased with synthetic fertilizer, GM, individual and / or with C and incorporated.

Keywords: green manures, compost y maize (*Zea Mays L.*)

INTRODUCCIÓN

Según la Sociedad Española de la Agricultura Ecológica (SEAE, 2007, p. 8) “los fenómenos en el planeta implicados en el calentamiento global o cambio climático son causados, en su mayor parte, por las actividades antropogénicas”. Sin embargo, los procesos naturales en los ecosistemas, también son emisores de gases con efecto invernadero (GEI), especialmente cuando ocurren disturbios en ellos. El desarrollo industrial progresivo que se aceleró a partir del siglo XX y el incremento en las actividades agrícolas, ha llevado a aumentos considerables en las concentraciones de GEI en la atmósfera. Por ejemplo, el metano CH₄ incrementó su concentración casi en 150% desde 1750 a la fecha. (SEAE, 2007, p. 9).

Las actividades agrícolas contribuyen con las emisiones a la atmósfera de algunos de los denominados GEI el Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O) y Dióxido de Carbono (CO₂) (Hesen, 2005, p.147). El CH₄ se produce cuando hay una fuente disponible de hidratos de carbono y condiciones anaeróbicas. Algunos ejemplos especiales los constituyen el metabolismo de los animales rumiantes y almacenamientos anaeróbicos de las aguas residuales o humedales con procesos de eutroficación. Sin embargo, también se registran emisiones de CH₄ en los campos dedicados a la agricultura, directamente desde el suelo, especialmente en épocas de invierno. El N₂O se forma en condiciones anaeróbicas a partir de abonos minerales aplicados al suelo y como resultado de la descomposición de materiales orgánicos (Hesen, 2005). El CO₂ se produce a partir de la respiración. La otra fuente importante de CO₂ es la quema de combustibles fósiles y la agricultura intensiva.

Si bien el CO_2 se presenta como el más problemático, no es cierto, dado que su potencial de calentamiento global (PCG) es uno (1), el CH_4 representa mayor riesgo, ya que su PCG es 62 veces mayor que el CO_2 , en 20 años. Es decir, una molécula de CH_4 equivale a 62 moléculas de CO_2 . Según el Panel Intergubernamental de expertos para el Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC, 2001) “el PCG se refiere a un calentamiento integrado a lo largo del tiempo donde la liberación instantánea de 1kg de un GEI, es comparado con el daño causado por el CO_2 ”. Lo que es igual a que la capacidad de retención de calor de una molécula de CH_4 es de 62 veces la del CO_2 y, para el N_2O , producto del ciclo del nitrógeno, en la agricultura es de 275 veces en un periodo de 20 años (IPCC, 2001).

Dentro de las alternativas para mitigar los GEI, se ha planteado la captura o secuestro de C, mediante la fotosíntesis, teniendo en cuenta que a través de este proceso, el CO_2 generado en las actividades industriales, agropecuarias y humanas, se acompleja y guarda como biomasa y así, permanece dentro del ecosistema, donde el C se puede almacenar y/o circular en forma escalonada. Este secuestro de C se plantea dentro de prácticas agrícolas que a su vez hagan uso eficiente del N y disminuyan los GEI liberados, es decir, dentro de sistemas de agricultura ecológica como alternativa a la agricultura convencional.

Las prácticas de agricultura convencional son generadoras importantes de GEI, directa e indirectamente, dada la simplificación que se hace de los agroecosistemas, el uso intensivo del suelo y de insumos de síntesis química industrial, cuya producción normalmente está ligada al petróleo, las prácticas de manejo en monocultivos con predominancia de suelos desnudos, desprovistos de vegetación acompañante para el cultivo objeto. La agricultura ecológica, por el contrario, trata de imitar la complejidad de los ecosistemas, lo cual se refleja en biodiversidad y ciclaje de nutrientes que pueden remediar estos efectos, con un manejo adecuado del suelo.

Autores como Ketunen, Saarnio y Pertti (2004, p. 740) sostienen que “el aumento del CO_2 en la atmósfera afecta los ciclos del C y del N en el sistema planta-suelo-atmósfera, lo cual indica que estas actividades influyen en la mayoría de los procesos naturales”. Pero si se logra que este sistema planta-suelo permanezca

estable, la captura y la retención de C y N serán más eficientes contribuyendo a la mitigación de GEI. Los abonos verdes (AV) han sido considerados como alternativa viable.

Los AV son plantas que se siembran en rotación y/o asocio con otros cultivos con el fin de ser incorporadas al suelo *in situ*, como alternativa para mejorar y/o conservar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Costa, Calegari, Mondardo, Bulisani, Wildner, Alcántara, Miyasaka y Amado 1992, p. 346). Estas plantas pueden convertirse en fuente alimentaria para los agricultores y sus animales.

Dadas las ventajas de las leguminosas sobre otras plantas, al fijar N_2 en simbiosis con bacterias (rizobios), éstas se pueden combinar con gramíneas de rápido crecimiento y con alta producción de biomasa, con baja relación C/N, utilizando esta mezcla como AV. En diferentes sistemas agrícolas productivos, como resultado de su uso, se han registrado incrementos en indicadores físicos de la calidad del suelo: estructura, densidad aparente, capacidad de retención de agua, regulación de la temperatura. Además, en propiedades químicas como CIC, porcentaje de materia orgánica (MO), disponibilidad de nutrientes, entre otros, unido a cambios favorables en algunas propiedades biológicas de los suelos, que, a su vez, han correlacionado con incrementos en la productividad de los cultivos cuando se han utilizado como AV. (Prager, Victoria y Sánchez de P., 2002).

Además de la búsqueda de indicadores que reflejen la influencia de los AV sobre las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo, quedan pendientes por resolver preguntas respecto a la práctica de AV y emisión de GEI en comparación con otros sistemas de manejo. Existen algunas metodologías para analizar GEI, entre otra se encuentra el método de la cámara dinámica, cámara aérea (técnicas meteorológicas) y el método de la cámara estática (CIAT, 2010).

Este trabajo busca contribuir con el conocimiento de GEI desprendidos del suelo y la influencia que tienen los AV sobre su presencia. Para ello se efectuaron mediciones temporales de las emisiones de CH_4 , N_2O y CO_2 durante algunas etapas de un ciclo de cultivo de Maíz *Zea mays* L. (años 2009-2010), sujeto a la práctica de AV, compost y fertilización con productos de síntesis química industrial.

Se seleccionó el maíz como cultivo objeto teniendo en cuenta su importancia en la seguridad alimentaria del país, especialmente para agricultores de economía campesina como los que habitan la región de la Buitrera, en el municipio de Palmira (Colombia), cuyas pequeñas fincas se encuentran en terrenos escarpados, zona donde se efectuó este estudio.

Metodología

Este trabajo es parte del proyecto “Los abonos verdes como estrategia agroecológica y ambiental en agroecosistemas del Valle del Cauca” (Grupo de Investigación en Agroecología, 2009, p. 35) y corresponde a una primera fase del proyecto. Se organizó en tres etapas:

Etapas de socialización y logística

Con la idea que la tecnología de los AV se pueda aplicar en diferentes zonas del país; se seleccionó una finca en zona de ladera donde se implementó una serie de ajustes y mediciones que permitieran el manejo de la tecnología y cambios a implementar, para luego aplicarla dentro de las particularidades propias de diferentes condiciones geoespaciales, socioeconómicas y ambientales del territorio colombiano.

También se tuvo en cuenta que la población campesina en esta zona dispone de escasos recursos económicos y por lo tanto, están abiertos a aquellas prácticas de agricultura ecológica que sean fáciles de manejar y no necesiten demasiada inversión de capital. La finca se seleccionó previas visitas y diálogo con los propietarios, señores Adolfo Carvajal y Gladys Pomeo, quienes poseen (9) nueve hectáreas (ha), manejadas con prácticas de agricultura ecológica desde hace aproximadamente diez años, pero no han incursionado en los AV. Son agricultores de amplia credibilidad dentro de su comunidad.

Fase de establecimiento del ensayo en campo

Una vez seleccionado el suelo, se preparó y procedió al establecimiento de los AV (*Mucuna pruriens* y *Axonopus scoparius*), su posterior incorporación y siembra del cultivo principal (*Zea mays* L.), con sus respectivos tratamientos. En todas las parcelas se ubicaron los cilindros de muestreo de los GEI y se estableció como línea base de lectura, transcurridos 10 días después de la incorporación del AV, coincidente con el momento de siembra del maíz.

Fase de análisis de laboratorio y análisis de la información

Las lecturas correspondientes a los GEI se hicieron en el laboratorio de Isótopos estables de CIAT a cargo de la doctora María del Pilar Hurtado.¹ A la información arrojada para CH₄, N₂O y CO₂, condiciones de suelo y épocas determinadas, se le hizo el análisis estadístico según el diseño experimental previamente definido, como se verá más adelante. La estimación de las emisiones de CH₄, N₂O y CO₂ se hizo con el método de la cámara cerrada estática (CIAT, 2010).

Localización

La Finca Las Flores está ubicada en la Vereda El Mesón, corregimiento de Chontaduro, Municipio de Palmira, Departamento del Valle del Cauca, Colombia, con una altura de 1 713 msnm “La temperatura media anual de la zona es de 21°C, la precipitación media anual de 1 396 mm.año⁻¹ y la humedad relativa media anual es del 74.4%”, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC, 2006). El experimento se

¹ Directora del Laboratorio de Isotopos estables. CIAT, 2010. María del Pilar Hurtado.

llevó a cabo durante 14 meses, de agosto a diciembre de 2009 y enero a septiembre de 2010.

Según caracterización taxonómica efectuada por la doctora Yolanda Rubiano,² el suelo predominante es un *Humic Dystrudepts* (USDA, 2010). La saturación de bases es mayor del 50%, el régimen de humedad es údico influenciado por una precipitación media anual. La textura del suelo dentro de sus primeros 30 cm es arcillo limosa y contiene fragmentos de grava fina. Presenta una pendiente del 30% clasificada como escarpada.

Para efectos del ensayo se evaluaron algunas propiedades fisico-químicas del suelo donde se estableció el ensayo. Las características evaluadas y metodologías empleadas se resumen en el (cuadro 1).

Cuadro 1

METODOLOGÍAS USADAS PARA EL ANÁLISIS QUÍMICO DEL SUELO ESTUDIADO

<i>Parámetro Evaluado</i>	<i>Método analítico (*)</i>
pH agua 1:1 CIC	Potenciómetro Amonio acetato
Elementos	
Materia orgánica	Espectrometría
Fósforo Bray II	Espectrometría
Potasio inter.	Aa
Calcio inter.	Aa
Magnesio inter.	Aa
Aluminio cambiante	(KCl 1M)
Sodio inter.	Aa
Azufre extractable	(Fosfato Ca)
Boro	Espectrometría
Hierro	DA, Aa
Manganeso	DA, Aa
Cobre	DA, Aa
Zinc	DA, Aa

DA (Doble ácido), Aa (Absorción atómica)

*Fuente de información: Mackean, 1993.

² Profesora asociada de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Diseño y establecimiento del experimento

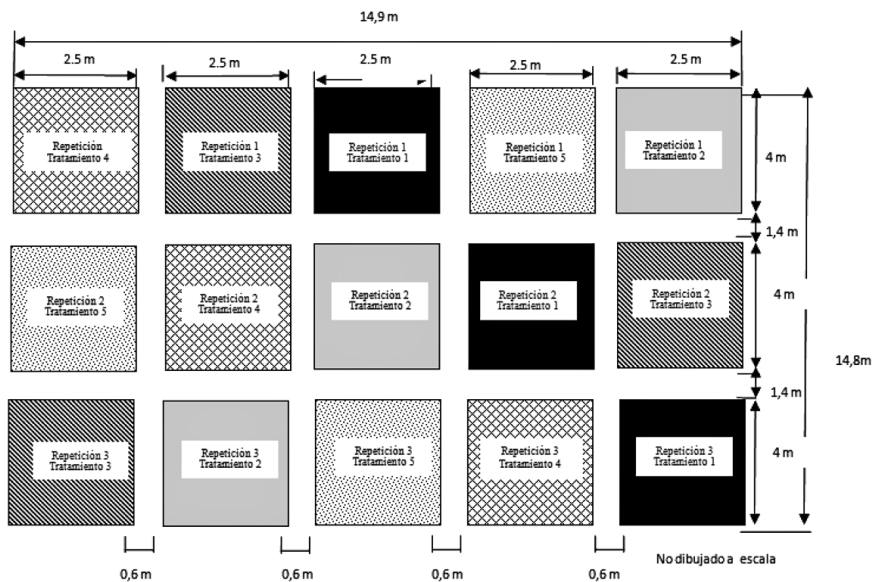
Para cumplir con los objetivos propuestos, se diseñaron cinco tratamientos:

- T1. Testigo: cultivo de maíz con manejo local, sin adición de fertilizantes, abonos verdes o cualquier tipo de compost o enmienda (T).
- T2. Sistema de cultivo de maíz con fertilización química (FQ).
- T3. Sistema de cultivo de maíz con incorporación de AV (AV).
- T4. Sistema de cultivo de maíz con incorporación de compost (C).
- T5. Sistema de cultivo de maíz con incorporación de AV y compost (AV+ C).

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar BCA, con cinco tratamientos y tres repeticiones. La unidad experimental del ensayo correspondió a una parcela de 2.5 m de ancho por 4 m de largo, con un área total de 10 m².

Figura 1

DISTRIBUCIÓN DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES EN EL CAMPO



Antes de la siembra del ensayo se procedió a tomar muestras con el fin de establecer las características físico-químicas más relevantes del suelo bajo estudio (cuadro 1). Los AV se sembraron en las unidades experimentales correspondientes y se dejaron desarrollar por un periodo aproximado de 2.5 meses hasta la época de prefloración de la leguminosa, después se procedió a su corte e incorporación dentro de las parcelas correspondientes (figura 1).

La siembra de los AV se efectuó con distancias de 0.5 m entre surcos para ambas especies. Para *C. ensiformis* la distancia entre plantas fue de 0.15 m con densidad de siembra de 133.332 plantas/ha. Para *A. scoparius* la distancia entre plantas fue de 0.20 m con una densidad de 100.000 plantas/ha, en los tratamientos que llevaron esta práctica.

A los 10 días de incorporados los AV (10 DDI) se sembró el maíz. El material vegetal que se utilizó fue la variedad ICA V-354, de color blanco, de la casa comercial Semillas La Calidad. Según indicaciones del productor obtenidas en el rótulo del empaque, este material vegetal puede alcanzar rendimientos de 4.500 a 5.500 kg/ha, con un rango de adaptación de 0 a 1.600 msnm y un periodo vegetativo de 160 a 170 días (seis meses aproximadamente) en zonas de ladera.

El maíz se sembró por el método de siembra directa con semilla pregerminada durante 48 horas para asegurar su germinación, a razón de dos semillas por sitio. Se utilizó una distancia de 0.80 m entre surcos y 0.25 m entre plantas, con una densidad de 50.000 plantas/ha, empleada comúnmente por los agricultores en esta zona, según indicaciones del propietario de la finca. Cada unidad experimental comprendió cinco surcos. Cada una de las unidades experimentales fueron separadas entre ellas por una distancia de 0.6 m y cada bloque o repetición se separó por una distancia de 1.4 m. El área total que ocupó el ensayo fue de aproximadamente 225 m².

La aplicación de AV se efectuó antes de la etapa de floración de la leguminosa, se recolectó, mezcló, pesó y distribuyó en partes iguales en las tres parcelas bajo este tratamiento. El análisis químico del AV mostró una relación C/N de 17,2, considerada óptima para un suministro rápido de nutrientes (Prager *et al.*, 2002). El compost se obtuvo de una finca de la localidad de El Bolo (Palmira),

caracterizado por una relación C/N de 24,9, considerado adecuado para ser aplicado como enmienda o acondicionador.

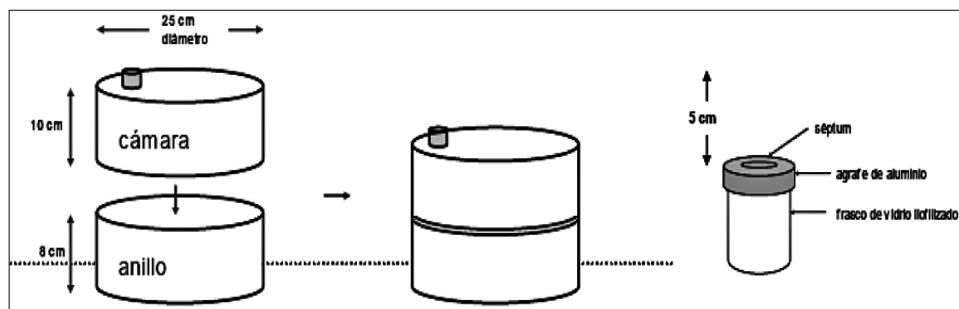
En cuanto a la fertilización con insumos de síntesis química, la aplicación se hizo localizada y fraccionada, así: la primera, con 250 g.parcela⁻¹ de NPK (10-30-10), la segunda (urea 5g+KCl 5g).planta⁻¹, la tercera 5g urea. planta⁻¹. Antes del inicio de floración, todo el cultivo se suplementó con elementos menores.

Evaluación de GEI

Para analizar los GEI se acudió al método de la cámara estática (CIAT, 2010). Este último se utilizó debido a que el muestreo se hizo directamente desde el suelo. Para ello se montó un dispositivo que consta de tres partes: un anillo de material PVC de 6 pulgadas de diámetro, que se instaló directamente en el suelo a una profundidad de 8 cm, una cámara hermética de 10 cm de largo con dos válvulas para la toma de muestra y lectura de temperatura, finalmente una banda de látex que aseguró el anillo a la cámara (figura 2).

Figura 2

CÁMARA ESTÁTICA INSTALADA EN EL CAMPO DE CULTIVO



Fuente: Centro internacional para la Agricultura Tropical (CIAT, 2010).

Las 15 cámaras cerradas estáticas se instalaron, inmediatamente se incorporó el AV al suelo. A los 10 días se hizo la primera evaluación de GEI (línea base) y se sembró el maíz. Para los siguientes muestreos se empleó como referente la aplicación de la práctica de fertilización con insumos de síntesis química industrial (FQ) y el momento de prefloración (PREF) del maíz (cuadro 2).

Cuadro 2
DESCRIPCIÓN DEL MUESTREO DE GEI

<i>Muestra Tomada</i>	<i>Etapas</i>	<i>Fecha</i>	<i>Variables evaluadas</i>	<i>Tiempo (días)</i>
AF1	Línea base	26/03/2010		10
DF1	Después de primera fertilización	30/03/2010		14
AF2	Antes de segunda fertilización	19/04/2010	CH ₄ , N ₂ O y CO ₂	34
DF2	Después de segunda fertilización	21/04/2010		36
PREF	Prefloración	7/07/2010		77

El muestreo de GEI en campo consistió en extraer, en momentos previamente establecidos, los gases acumulados en la cámara instalada en el suelo. Para la toma de muestras se utilizó una jeringa de 20 ml y un recipiente o frasco de vidrio liofilizado,³ en el cual se capturaron los GEI y trasladaron al laboratorio de isotopos estables en CIAT (figura 3), donde se procedió a su análisis por medio de técnicas cromatográficas.⁴

³ Sublimación de agua a partir de hielo operando a vacío elevado y a temperaturas inferiores a 0°C. Esto se realiza en secaderos especiales para separar el agua del aire. Operaciones unitarias en ingeniería química. (Warren, 1998, p. 848).

⁴ Método físico de separación para la caracterización de mezclas complejas como los gases. Es un conjunto de técnicas basadas en el principio de retención selectiva, cuyo objetivo es separar los distintos componentes de una mezcla, permitiendo identificar y determinar las cantidades de dichos componentes. Operaciones unitarias en ingeniería química (Warren, 1998, p. 700).

Para decidir el momento de lectura a adoptar para el análisis estadístico, se tomaron muestras en intervalos de tiempo diferentes: 0 , 20 , 40 y 60 min. La importancia de repetir el muestreo en diferentes tiempos buscaba analizar la tendencia en la acumulación de los gases, hasta establecer el momento en que su flujo se tornara constante, considerado ideal para hacer la lectura. Esto sucedió al final, es decir, al cabo de una hora.

Figura 3

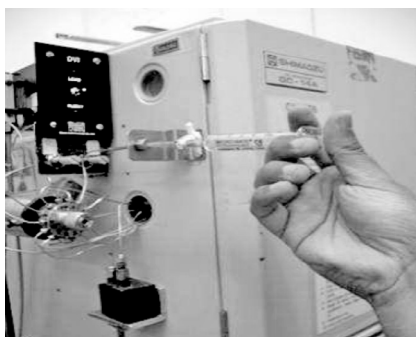
MÉTODO DE MUESTREO E INSTRUMENTOS UTILIZADOS



A) Cámara estática establecida en el campo.



B) Instrumentos para el muestreo: recipientes liofilizados, termómetro y jeringa extractora.



C) Inyección de muestra de gases al cromatógrafo.



D) Analizador.

Fuente: Elaboración propia.

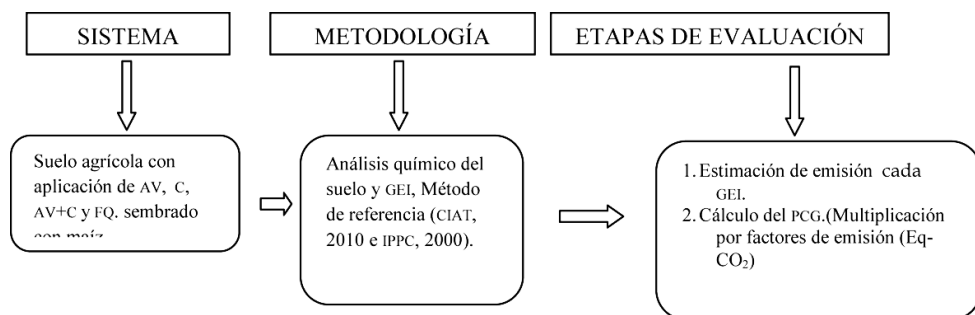
Análisis de la información

Los GEI se analizaron individualmente y también se obtuvo su PCG con base en su aporte calórico. Es de recordar que el PCG hace referencia al calentamiento integrado a lo largo del tiempo, en que el CO_2 tiene una capacidad de retención de calor de 1, mientras que una molécula de CH_4 es de 62 veces la del CO_2 y el N_2O , corresponde a 275 veces la del CO_2 en un periodo de 20 años (IPCC, 2001). Este valor se presenta como PCG (eq-CO_2) y en esta forma se integran los tres GEI analizados en una sola variable.

Se obtuvo un total de 300 lecturas de los tres GEI, de las cuales se sometieron a análisis estadístico, 75 correspondientes a 1 h de lectura. Para el análisis de varianza se usó el programa SAS versión 9.13 (2007) y en aquellas variables donde se detectaron diferencias estadísticas se hizo comparación de medias (Tukey). En síntesis el experimento consistió en interrogar un suelo agrícola específico sembrado con maíz, a la aplicación de AV en comparación con otras prácticas agronómicas como compost individual y/o mezclado con AV y fertilización de síntesis química industrial. Las variables de respuesta seleccionadas fueron los GEI CO_2 , CH_4 y N_2O en diferentes momentos del cultivo y de aplicación de las prácticas agronómicas, al igual que su valor integrado como PCG (figura 4).

Figura 4

ESTRUCTURA DEL EXPERIMENTO Y CÁLCULOS DE GEI



Fuente: IPCC, 2000. Guidelines for national greenhouse gas inventories.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características físicoquímicas del suelo estudiado

El suelo estudiado (*Humic Dystrudepts*) tiene textura arcillo-arenosa, presenta pH moderadamente ácido (5.6), con altos contenidos de materia orgánica para este piso térmico (7.4%), normales a altos de P (11.4 mg.kg⁻¹), K (0.8 cm.kg⁻¹), Ca y Mg (10.6 y 6.1 cmol.kg⁻¹, respectivamente). La CIC también es alta (34.3 cmol.kg⁻¹) y no presenta problemas de aluminio, ni de sodio.

La relación K/Mg de 0.1 está por debajo de lo normal y puede provocar carencia inducida de K en estos suelos por exceso del Mg, especialmente para algunos cultivos exigentes en este elemento como el maíz. Sin embargo, los valores altos de K pudieron contrarrestar la baja relación anterior, pues no se apreciaron deficiencias en el cultivo sembrado. En cuanto a elementos menores, el boro se encontró alto (0.7 mg.kg⁻¹), el cobre medio (1.9 mg.kg⁻¹), el hierro bajo (5.1 mg.kg⁻¹) y el zinc alto (5.4 mg.kg⁻¹). El Mn extremadamente alto (174 mg.kg⁻¹), probablemente originado por materiales parentales con presencia de rocas que aportan cantidades importantes del mineral turmalina, principal fuente de boro y manganeso en los suelos.⁵ Son suelos franco arcillo-arenosos (22% de arcillas, 24% de limo y 54% arena) que permiten adecuada retención del agua, con mayor razón si se tiene en cuenta el alto contenido de materia orgánica.

Efecto de las fuentes de variación analizadas sobre emisión de GEI

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas coincidentes en emisiones de CH₄ y CO₂ por efecto de tratamientos, etapas de muestreo e interacciones

⁵ Juan Carlos Menjivar (2010), *Comunicación personal*, profesor asociado, Universidad Nacional de Colombia Palmira.

entre factores (cuadro 3). El N_2O tuvo diferencias altamente significativas, por efecto de etapas, y significativas, entre bloques y la interacción tratamiento/etapa. Las diferencias entre bloques presentadas en las variables CO_2 y N_2O son explicables por la topografía montañosa de la finca.

Cuadro 3
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA CH_4 , N_2O Y CO_2 .

<i>Fuente</i>	<i>GL</i>	<i>Emisión de CH_4 (ppm)</i>			<i>Emisión de N_2O (ppm)</i>			<i>Emisión de CO_2 (ppm)</i>		
		CM	Pr>F	α	CM	Pr>F	α	CM	Pr>F	α
Bloque	2	0.708	0.3518	ns	0.141	0.0101	*	1122531.1	0.0001	**
Trata	4	0.501	0.0001	**	0.055	0.1103	ns	4791069.6	<.0001	**
Etapa	4	1.398	<.0001	**	0.186	0.0003	**	16857968.4	<.0001	**
Etapa x trata	16	0.313	<.0001	**	0.078	0.0035	*	1840718.1	<.0001	**
Promedio			1.49			2.24			1394.16	
Coeficiente de Variación			17.25			19.41			22.51	

Nota: ** (Significativo al 1%), * Significativo al 5%), ns (No significativo).

Tratamientos

Se encontró como punto en común que las mayores emisiones de los tres GEI evaluados se presentaron 14 días después de incorporado el AV (DDI), etapa distinguida como después de fertilización 1 (DF1). Como se dijo con anterioridad, el punto de referencia, en este caso, DF1, caracteriza la realización previa o posterior de la práctica de fertilización con insumos de síntesis química industrial en el tratamiento FQ (cuadro 4).

El CH_4 sufrió los mayores incrementos en la etapa DF1 (14 DDI) y antes de fertilización 2 (AF 2), correspondiente a 34 DDI, las cuales no variaron significativamente entre ellas. Le siguió la etapa antes de fertilización 1 (AF1) – 10 DDI. En el cuarto y quinto muestreo (36 DDI y 77 DDI), correspondientes a después de fertilización 2 (DF2) y prefloración (PREF), ocurrieron las menores emisiones de este GEI.

El flujo de N_2O tuvo los mayores incrementos en DF1 y PREF sin diferencias entre etapas, seguidos por un grupo de AF2 y DF2. Los menores valores correspondieron a AF1 (10 DDI).

Cuadro 4

PRUEBA DE AGRUPACIÓN DE EMISIONES DE CH_4 , N_2O Y CO_2 POR EFECTO DE TRATAMIENTOS

TRAT	Emisión de CH_4 (ppm)		Emisión de N_2O (ppm)		Emisión de CO_2 (ppm)	
	Promedio		Promedio		Promedio	
TA	1.695	a	1.07	a	813.51	d
FQ	1.339	c	1.612	a	1172.57	c
AV	1.602	b	3.413	a	1550.1	b
C	1.552	b	1.891	a	1143.1	c
AV+C	1.261	c	3.307	a	2290.68	a

Nota: Dentro de una misma columna, promedios con la misma letra no difieren significativamente.

Etapas de muestreo

El CO_2 presentó diferencias altamente significativas entre etapas de muestreo (cuadro 5) y correspondió a las mayores emisiones de los tres gases. El mayor flujo de CO_2 ocurrió en DF1, seguido de PREF; AF2 ocupó el tercer lugar. Las etapas AF1 y DF2 fueron las de menor emisión, sin diferir entre ellas.

Cuadro 5

PRUEBA DE AGRUPACIÓN DE EMISIONES DE: CH_4 , N_2O Y CO_2 EN LAS ETAPAS EVALUADAS

Etapas	Emisión de CH_4 (ppm)		Emisión de N_2O (ppm)		Emisión de CO_2 (ppm)	
	Promedio		Promedio		Promedio	
AF1	1.52	bc	1.19	c	442	d
DF1	1.85	a	5.25	a	3102.61	a
AF2	1.68	ba	1.28	bc	1244.71	c
DF2	1.31	dc	1.85	bc	609.32	d
PREF	1.07	d	3.15	ab	1572.11	b

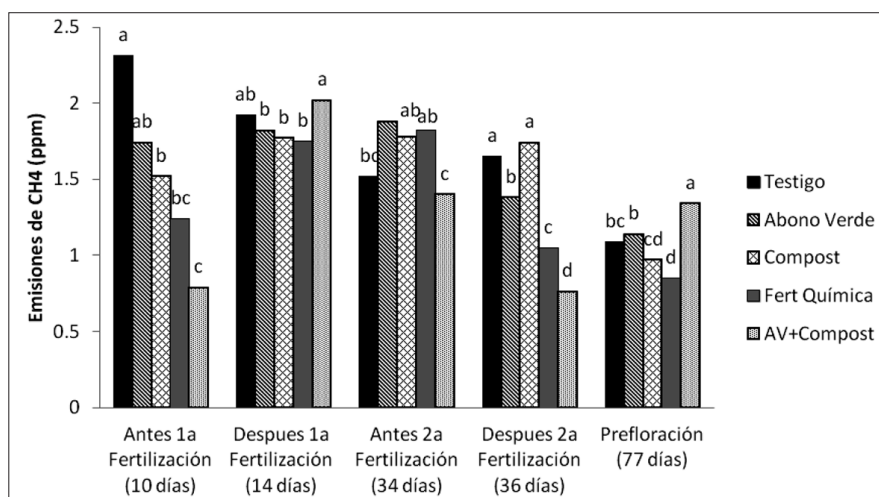
Nota: Dentro de una misma columna, promedios con la misma letra no difieren significativamente.

Interacciones tratamientos/etapas

La mayor producción de CH_4 (figura 5) ocurrió en T durante los dos primeros muestreos, hasta los 14 DDI (DF1) seguido por el grupo donde se aplicó la mezcla de los materiales orgánicos (AV +C). A los 34 DDI (DF2), cambió el orden y dominaron los materiales orgánicos individuales (AV Y C) y FQ. A partir de los 36 DDI las emisiones de este gas tendieron a disminuir y sólo se mantuvieron en C. A los 77 DDI (PREF) la mayor emisión volvió a corresponder a AV+C, seguido de T y materiales orgánicos individuales, sin que se encontraran diferencias entre C y FQ.

Figura 5

INTERACCIONES TRATAMIENTO/ETAPA EN LA EMISIÓN DE CH_4

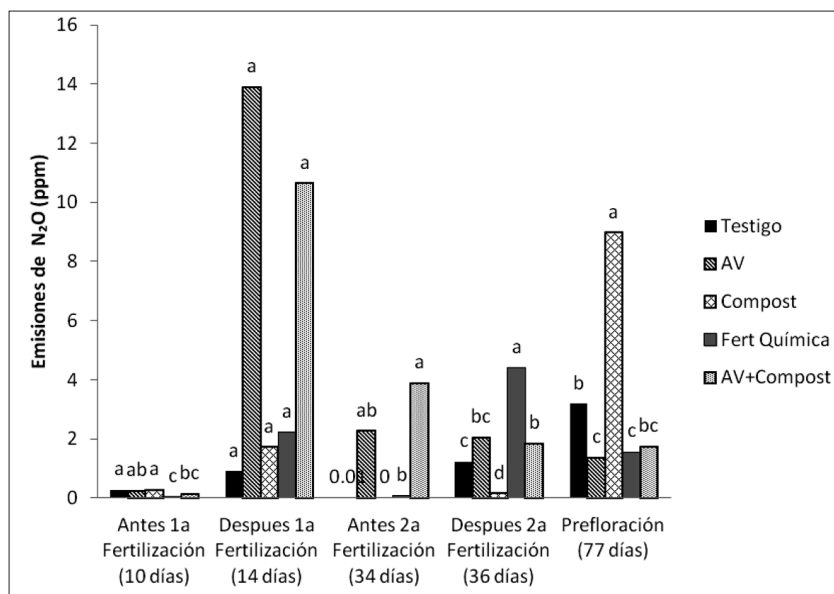


Elaboración propia.

Igual que en CH_4 , el flujo de N_2O se incrementó en la etapa DF1 y representó 45% de todo el N_2O emitido por el suelo durante el ensayo, seguido por PREF con 26% (figura 6). El momento de menor emisión de N_2O fue AF1. En el periodo posterior a DF1 disminuyeron las emisiones hasta el final de los muestreos. Como eventos importantes en los últimos muestreos, se observó que, como era de esperarse FQ tuvo

la mayor emisión después de la segunda fertilización (36 DDI) y luego disminuyó a los 77 DDI, mientras que en esta última etapa, C presentó la mayor emisión, difiriendo significativamente del resto de tratamientos.

Figura 6
INTERACCIONES TRATAMIENTO/ETAPA SOBRE EMISIÓN DE N_2O



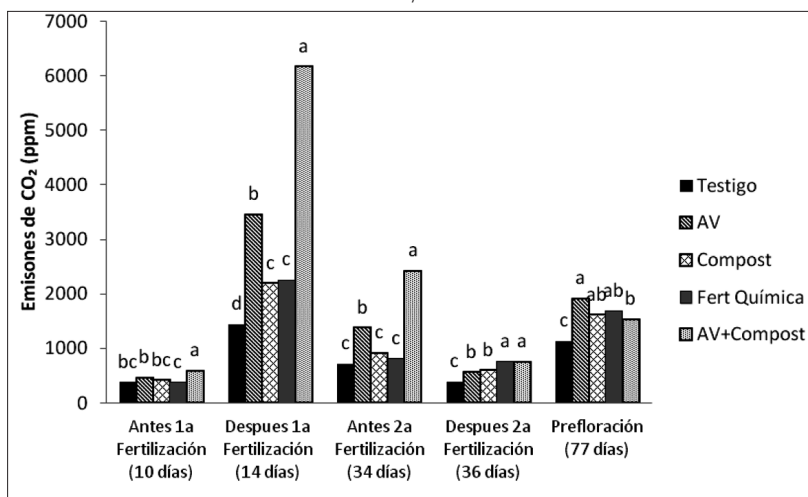
Elaboración propia.

En comparación con los otros gases evaluados el CO_2 fue el de mayor emisión, superó al N_2O en casi 500 veces. Al igual que en los demás casos la mayor emisión (44%) se dio en la etapa DF1 (3102.64 ppm), donde hubo diferencias altamente significativas entre los tratamientos AV+C, AV y T, el C y FQ no se diferenciaron (figura 7). En la etapa de PREF, el grupo AV, FQ y C se diferenció de AV + C y T. En la época AF2 hubo grupos con diferencias altamente significativas C, FQ y T con AV + C que, a su vez, se diferenció con AV. Las menores emisiones se presentaron en AF 1 donde hubo diferencias entre AV + C y los demás tratamientos, también entre FQ y AV siendo esta la etapa en que el suelo emitió menos CO_2 . En DF2, los AV + C y FQ difirieron de AV

y c, T se diferenció de todos los tratamientos. Los rangos de emisión estuvieron entre 442 ppm y 3102.64 ppm de CO₂. También se observó en común que las mayores emisiones de CO₂ se presentaron en el tratamiento AV y AV y AV + C.

Figura 7

INTERACCIONES TRATAMIENTO/ETAPA SOBRE EMISIÓN DE CO₂



Elaboración propia.

Potencial de calentamiento global PCG

Fue necesario transformar la información correspondiente a PCG para efectos de facilitar el análisis de la información (cuadro 6). Se encontró que hubo diferencias altamente significativas por efecto de tratamientos, etapas de muestreo y significativas por efecto de bloque e interacción etapa/tratamiento.

Tratamientos

El análisis por grupos mostró que el mayor PCG se concentró en los tratamientos con aplicación de material orgánicos (AV, AV+C) y FQ que no difirieron entre sí. c y

T formaron un grupo de menores emisiones, sin diferir entre ellos. Los rangos de emisión estuvieron entre 875.5 y 2251.1 ppm Eq-CO₂.

Cuadro 6
ANÁLISIS DE VARIANZA DEL PCG

<i>Fuente</i>	<i>GL</i>	<i>PCG Eq-CO₂ (ppm)</i>		
		<i>CM</i>	<i>Pr>F</i>	<i>α</i>
Bloque	2	0.275	0.005	*
Trat	4	0.377	<.0001	**
Etapas	4	1.392	<.0001	**
Etapas x trat	16	0.133	0.0033	*
Promedio			1475	
Coeficiente de variación			6,783	

Nota: ** (Significativo al 1%), * (Significativo al 5 %), ns (No significativo).

Cuadro 7
PRUEBA DE AGRUPACIÓN DE PCG POR EFECTO DE TRATAMIENTOS

<i>PCG Eq-CO₂ (ppm)</i>		
<i>Tratamientos</i>	<i>Promedio</i>	
T	878.5	c
FQ	1410.2	abc
AV	1916.8	ab
C	1306	bc
AV+C	2251.1	a

Nota: Dentro de una misma columna, promedios con la misma letra no difieren significativamente.

Etapas

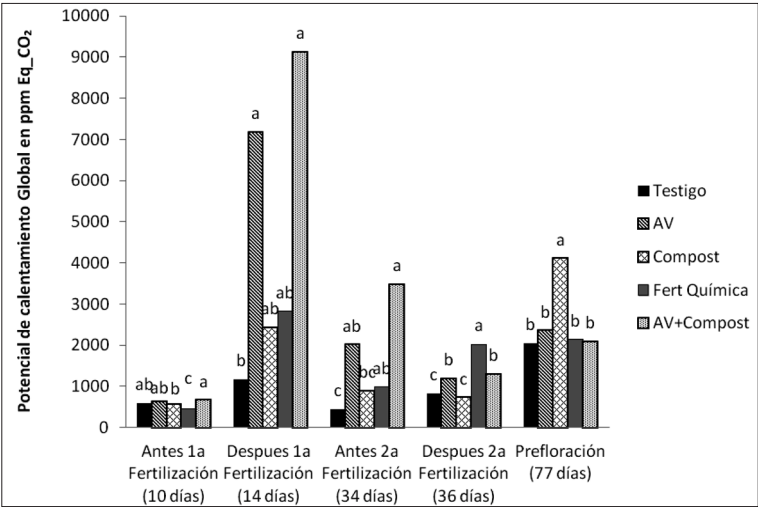
En DF1 se encontró la mayor producción de GEI y por ende en el ajuste el mayor PCG, con diferencias altamente significativas entre las etapas DF1, PREF Y AF2, DF2. AF1 se diferenció de las demás y fue la que menos PCG generó (cuadro 8).

Cuadro 8
PRUEBA DE AGRUPACIÓN DE PCG POR EFECTO DE ETAPAS

<i>Etapas</i>	<i>PCG Eq-CO₂ (ppm)</i>	
	<i>Promedio</i>	
AF1	583.52	c
DF1	3497.31	a
AF2	1224.33	b
DF2	1137.21	b
PREF	2456.85	a

Nota: Dentro de una misma columna, promedios con la misma letra no difieren significativamente.

Figura 8
INTERACCIONES TRATAMIENTO/ETAPA SOBRE PCG (EQUIVALENTES DE CO₂ PPM)



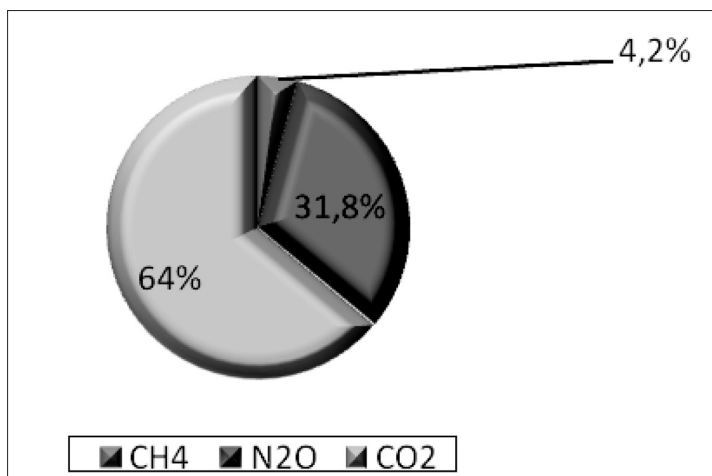
Elaboración propia.

Interacciones tratamiento/etapa sobre pcg

En la interacción tratamiento/etapa (figura 8) se observó que las mayores emisiones correspondieron a DF1 y en los tratamientos con adición de materiales orgánicos y fertilización química, los cuales sólo difirieron de T. El menor valor correspondió a AF1 sin fertilización química. Dado que el PCG se relacionó proporcionalmente a la emisión de GEI, se reflejó la influencia de la primera fertilización por lo que fue en esta etapa del ensayo donde se presentaron los mayores picos de emisión de GEI.

En resumen, el mayor aporte de GEI en términos de PCG lo hizo el CO_2 (64%), seguido por N_2O (31.8%), el menor correspondió a CH_4 (figura 9), distribución porcentual que se ajustó a la distribución de emisiones registrada en otras investigaciones (SEAE, 2007).

Figura 9
PARTICIPACIÓN PORCENTUAL (%) DE LOS GEI EN EL PCG DEL ENSAYO



Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Los contenidos de materia orgánica (7.4%) para este piso térmico fueron considerados altos. Esto es debido al manejo agroecológico de los suelos dado por el agricultor

desde hace diez años. La utilización de diferentes técnicas como manejo de vegetación acompañante, adición de C, coberturas nobles, etc., ha redundado en el mejoramiento de este parámetro en el tiempo. Sin embargo, la materia orgánica además de mejorar la textura de los suelos, aumentar la capacidad de retención de agua, aumentar la capacidad de intercambio catiónico y servir como fuente de nutrientes, también es una fuente de CO_2 en los suelos, como resultado del incremento en la actividad metabólica por parte de todos los organismos que residen en él.

Los valores de la CIC de estos suelos $34.3 \text{ cmol.Kg}^{-1}$, clasificados como franco arcilloarenosos, se consideraron altos y teniendo en cuenta sus contenidos de arcillas que no superaron el 22%, podrían ser atribuibles en mayor proporción a la parte orgánica que a la parte mineral de esta fase del suelo. Los valores de sodio se encontraron dentro del rango normal, por debajo de la unidad y no se presentaron problemas de aluminio. La relación Ca/Mg (1.76) se encontró dentro del rango normal y la relación Ca+Mg/K (19.8) también se encontró dentro de los rangos considerados normales.

En general, se observó que hubo cambios en la emisión de GEI a través de los cuatro tiempos de muestreo (0, 20, 40 y 60 minutos). La mayor correspondió a 60 minutos, tiempo adoptado para las evaluaciones efectuadas.

Los diferentes factores evaluados: bloques, tratamientos, etapas de muestreo e interacciones arrojaron diferencias en los GEI analizados, las cuales oscilaron desde altamente significativas hasta significativas. El efecto de bloques se explicó con base en los cambios en la pendiente del terreno utilizado para el ensayo.

El análisis de esta información mostró que la metodología fue sensible y detectó variaciones en la emisión de CH_4 . Hasta el punto que una práctica efectuada con dos días de diferencia: 34 días (AF2) y 36 días (DF2) arrojó cambios en los análisis. Igualmente marcó la influencia de la precipitación. El periodo más lluvioso de la época evaluada correspondió a DF1 y AF2, donde se obtuvieron los mayores valores de los GEI. La precipitación combinada al volteo del suelo durante la incorporación de los materiales orgánicos llevó a que este gas predominara hasta los 34 días en los tratamientos donde ellos se incorporaron. Esta etapa representó las mayores emisiones

de GEI porque se consideró que fue un momento en el cual los procesos del suelo (químicos, biológicos y físicos) se desarrollaron con mayor intensidad (Salamanca, 2006). A los 36 días (DF2) donde sólo se manipuló FQ, aunque en forma sectorizada, aplicar el fertilizante de síntesis química, llevó a que se igualaran las emisiones entre los tratamientos con materiales orgánicos y FQ. A partir de esta época las emisiones disminuyeron en todos los tratamientos.

En T, en AF1 se concentraron las mayores emisiones de CH_4 . Al indagar sobre la historia del lote, se encontró que en el sitio específico donde se llevó a cabo el ensayo se había incorporado materia orgánica (porquinaza) durante varios meses.

Como se dijo con anterioridad, el CH_4 fue el GEI de menor aporte entre los tres evaluados, en términos relativos y su mayor emisión se concentro al tratamiento T y la etapa AF1, con un valor máximo de 2.31ppm y un mínimo de 1.09 ppm de CH_4 .

De acuerdo con Shang, Chao, Hsiu y Huan (2009, p. 1916), en arroz paddy, las emisiones de CH_4 fluctuaron entre 35 y 66.5 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, mientras que los cálculos para este ensayo oscilaron entre 30 y 37,3 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. Estos resultados pueden explicarse como consecuencia de las diferencias en la composición química del material orgánico que se aplicó al suelo y su mineralización, aspecto controlado por el suelo, la relación C/N y el clima.

Respecto a N_2O , nuevamente la sensibilidad de la metodología permitió detectar los cambios entre etapas y tratamientos. En la emisión de este gas, es evidente que el disturbio del suelo al agregar los materiales orgánicos es un factor dominante en los resultados obtenidos junto a la precipitación en la zona. En AF1 los valores de N_2O son casi indetectables, mientras que en DF1 (a 14 días de incorporados los materiales orgánicos), los valores encontrados son más altos en AV y AV+C, pero no en FQ, a pesar de haber sido incorporada la primera dosis del fertilizante de síntesis. De allí en adelante, disminuyeron las emisiones en todos los tratamientos, sin embargo, a los 36 DDI días (DF2), cuando se aplicó la segunda dosis del fertilizante de síntesis, FQ es el único tratamiento donde se incrementó la emisión de este GEI. En PREF, este fenómeno ocurrió en C.

Estos resultados mostraron que aparentemente el disturbio del suelo causó que éste se oxigenara permitiendo a las raíces, rizósfera y microorganismos aumentar

su actividad respiratoria y, por lo tanto, que la degradación de materia orgánica se incrementara. Esto ocurrió porque hubo favorecimiento de la mineralización, donde se afectó el paso de NH_3 a nitritos y posteriormente a nitratos. En este proceso ocurrieron acumulaciones de N en forma de NO_2^- que posteriormente se perdieron a la atmósfera como N_2O . También pudo suceder que se incrementaran las pérdidas de nitrógeno vía nitrificación (metabolismo microbiano de NH_4^+ a NO_3^- y NO_2^-) o desnitrificación (metabolismo microbiano de NO_3^+ y NO_2^- a N_2 y N_2O).

En FQ el manejo focalizado del fertilizante impidió incrementos notables en la mineralización de la materia orgánica presentes inicialmente en esas parcelas y su manifestación en N_2O . No obstante, con la adición de fertilizante de síntesis química (FQ), se observó un incremento de 5% en el flujo de N_2O del suelo DF1, sin embargo, este incremento no fue significativo en comparación con T. Estos incrementos se presentaron solamente en la etapa DF1, en las demás, se redujeron. Estos incrementos fueron menores a los encontrados por (Snyder, 2008). Esto pudo suceder por un uso eficiente del nitrógeno por parte de la planta en proceso de crecimiento y/u otras formas de pérdida del NO_3^- y NH_4^+ , por volatilización o escurrimiento debido a su alta solubilidad, el tipo de suelo y la precipitación.

Para explicar estos resultados, aunado a los incrementos en la mineralización por el aporte de los materiales orgánicos, fue necesario tener en cuenta que los AV procedieron de la mezcla de *Axonopus scoparius* L. y *Canavalia ensiformis*, esta última rica en Nitrógeno. Los aportes de N_2O , cuando se usaron los AV en este ensayo alcanzaron $63,6 \text{ kg.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, datos similares a los encontrados por (Shang *et al.*, 2009, p. 1916).

(Prager *et al.*, 2002, p.4) encontraron que “el uso de AV basado en la especie *Canavalia ensiformis*, contribuyó a incrementar el contenido de Nitrógeno total del suelo entre 31 y 71%, mostrando los beneficios de esta especie como portadora de Nitrógeno”, es decir, que en los tratamientos donde estuvo presente sola o en mezcla, se podría esperar que dichos contenidos aumentaran, no sólo con sus efectos sobre la disponibilidad del elemento, sino también en la relación C/N y, por lo tanto, incrementará la mineralización de la materia orgánica y movimiento de nutrientes como N en sus diferentes formas químicas.

En cuanto a la emisión de CO_2 , como era de esperar, se encontró que este GEI efectuó el mayor aporte de emisiones y nuevamente, coincidió en los tratamientos con materiales orgánicos y con la evaluación en DF1, época en la cual, éstos llevaban 14 días de incorporados, es decir, había una alta mineralización. También coincidió con la mayor época de lluvia en la zona.

El uso de AV+ C aumentó el flujo de CO_2 en 30% (6164.63 ppm) en relación con T. La dinámica emisión de CO_2 indicó una alta mineralización debido al incremento de materiales orgánicos (Kettunen, 2004), que se evidenció en el aumento de la actividad biológica y los nutrientes disponibles (Hernández y Sánchez, 2011).

En este sentido, la actividad biológica del suelo fue importante, ya que todos los tratamientos presentaron un incremento en la emisión de CO_2 . Sin embargo, en algunos casos no fueron significativos. El uso de AV y C incrementó el flujo de CO_2 a la atmósfera, lo que indicó que también hubo incremento de respiración del suelo, lo cual pudo deberse a la suma de microorganismos al suelo con el abono orgánico. La adición de material orgánico (AV), sin duda, logró un mayor incremento en la tasa de respiración en DF1, dado que es aquí que se presentan las mayores emisiones. Lo anterior puede deberse al efecto adicional de los nutrientes aportados por el AV, sobre el incremento en las poblaciones de organismos edáficos y al mayor desarrollo de raíces y actividad rizosférica en el cultivo de maíz (Hernández y Sánchez, 2011).

El cálculo del PCG indicó que a pesar de que la emisiones de CH_4 (2309.86 Kg Eq- CO_2 .ha⁻¹.año⁻¹) y N_2O (17486.78 Kg Eq- CO_2 .ha⁻¹.año⁻¹) fueron menores en relación con el CO_2 (35154.20 Kg Eq- CO_2 .ha⁻¹.año⁻¹), estos gases debido a su potencial de calentamiento tuvieron mayor contribución (cuadro 9). Estos resultados fueron menores a los registrados por (Gregoric y Vandenbygaart, 2004). A pesar de estos resultados, en términos de PCG, El CO_2 fue el mayor contribuyente (IPCC, 2000).

Los tratamientos con mayor PCG fueron aquellos compuestos por material orgánico AV+C y AV con 13692.23 y 16858.82 kg Eq- CO_2 .ha⁻¹.año⁻¹ respectivamente, los cuales no difirieron estadísticamente de RQ con 9023.60 kg Eq- CO_2 .ha⁻¹.año⁻¹. El menor PCG lo presentó T con 6129.9 kg Eq- CO_2 .ha⁻¹.año⁻¹. Estos resultados corroboraron que la

intervención del suelo en términos de adición de materiales orgánicos y disturbio a través de incorporación, al igual que la fertilización con insumos de síntesis química tuvo efectos similares sobre PCG.

Este ensayo corroboró que la actividad agrícola independiente del manejo, genera GEI y que los materiales orgánicos, siendo fuente importante de C y N, como es el caso de los AV y C, también están involucrados, especialmente cuando se incorporan al suelo y éste se disturba, incrementando la aireación del suelo y por lo tanto, la respiración. Lo mismo sucede con la fertilización de síntesis química, aunque se aplique en forma localizada.

Como se dijo con anterioridad, dos factores importantes para estos incrementos de GEI, fueron la aireación, vía incorporación de los materiales orgánicos y la precipitación. También fue posible comprender que en la medida que el suelo respira, no sólo se mueve el C hacia CO_2 , sino también hacia CH_4 y hacia nutrientes como el N, en todas sus formas químicas, de allí que se generara tanto amonio, nitratos como N_2O con sus efectos sobre el ambiente y la nutrición de la planta.

Este ensayo dejó planteadas interrogantes respecto al disturbio causado por la incorporación de los materiales orgánicos solos o en mezcla y la posibilidad que al implementar cambios en el sistema tales como su manejo como coberturas muertas, se cause un menor movimiento y disturbio del suelo, que se expresara en disminución de GEI. Este mismo planteamiento no es aplicable a FQ, salvo el caso que se acudiera al voleo, sin embargo, esto traería otras consecuencias sobre disponibilidad de nutrientes para el cultivo y sobre el ambiente.

Otras inquietudes surgen respecto al manejo de agroecosistemas individuales y/o en monocultivo versus la complejidad surgida de la biodiversidad cuando se trabaja bajo concepciones agroecológicas, que conllevan a una mayor captura de carbono por parte de cultivos permanentes y acompañantes del agroecosistema productivo temporal que se implementa.

Además, dentro del ciclo del carbono, un componente escasamente estudiado es aquel de la vía metabólica que sigue el CH_4 , pues fuera de su emisión al ambiente, este gas también puede ser consumido dentro del agroecosistema

por aquellos organismos que lo utilizan como sustrato, tal es el caso de los metanótrofos. Estas inquietudes darán origen a nuevos trabajos de investigación.

CONCLUSIONES

En el ensayo realizado en el suelo *Humic Dystrudepts*, las mayores emisiones de los tres GEI evaluados (CH_4 , N_2O y CO_2), se presentaron en los tratamientos donde se adicionaron materiales orgánicos en forma individual y/o en mezcla, en estado fresco y/o como compost, a los 14 días de incorporados y sembrado el maíz.

El orden de emisiones de GEI fue: $\text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{N}_2\text{O}$. Sin embargo, en la contribución al PCG el orden fue: $\text{CO}_2 > \text{N}_2\text{O} > \text{CH}_4$.

El PCG no difirió estadísticamente entre los tratamientos a los cuales se adicionaron materiales orgánicos y aquel donde se utilizó fertilizante de síntesis química.

El disturbio al suelo ocasionado por la incorporación de los materiales orgánicos y algunas propiedades del suelo como la textura, aireación, drenaje y altos contenidos de materia orgánica, estuvieron relacionados, por una parte, con la producción de biomasa de los AV y por otra, con su mineralización y consecuentes efectos sobre GEI y PCG.

BIBLIOGRAFÍA

- “Agricultura y abonos verdes”, *Boletín de la sociedad de agricultores de Chile*. (2010), Chile [Internet], Boletín 18, Disponible desde: <http://www.abcagro.com/fertilizantes/abonos_verdes.asp> [Acceso: 04 de octubre de 2010].
- “Agricultura orgánica o ecológica”, *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural* (2010), Colombia. Documentación Ministerio de Agricultura. Disponible desde: <http://www.minagricultura.gov.co/archivos/guia_de_agricultura_ecologica.pdf> [Acceso 31 de octubre de 2010].

- Bunch, R. (1994), “Uso de abonos verdes por agricultores campesinos: Lo que hemos aprendido hasta la fecha”, *Tesis electrónicas* [Internet], informe técnico, no.3, 2ª edición. Disponible desde: <<http://www.cidicco.hn/archivospdf/Inftecnico3.pdf>> [Acceso 10 de agosto de 2010].
- Bunch, R. (1990), “Low input soil restoration in Honduras: the Cantarranas Farmerto-Farmer Extension Programme. International Institute for Environment and Development, Londres, Reino Unido”, *Gatekeeper Series*, 23.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT (2009), “Colombia. Presentación de toma de muestra, análisis y cálculo del potencial de calentamiento global (PCG) en sistemas agrosilvopastoril”, *Manual de análisis de suelos y tejido vegetal*, Palmira.
- “Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca” (CVC), *Boletín Hidroclimatológico*, año 2006. [Internet] Cuenca Río Nima, Estación San Emigdio, Municipio de Palmira, Disponible desde: <http://www.cvc.gov.co/vianet/portal/vsm38cvc/data/RecursoHidrico/multimedias/BoletinH2006/cli/cli_nima_sanemigdio.htm>. [Acceso 03 de junio de 2009]
- Davies, D.D.; Giovanelli, J. (1969), *Bioquímica vegetal*, Universidad de East Angila, Edición OMEGA, Barcelona, España, p. 83.
- Gregorich, E., Vandenbygaart, D. (2004), “Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada”, *Journal Agricultural Systems* [Versión electrónica], 58.
- Hernández, A. Sánchez M. (2011), *Actividad biológica en un inceptisol sembrado con maíz Zea mays L bajo abonos verdes en la Buitrera (Valle del Cauca)*, p. 16 (inédito).
- Hesen, A. (2005), “Dairy farm CH₄ and N₂O emissions, from one square metre to the full farm scale”, p. 147, Pub. 40. *Soil Sci. Soc. Am.*, Madison Wisconsin, EE.UU., 1-13.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), *Fertilización en diferentes cultivos: Manual de asistencia técnica*, no. 25, Santafé de Bogotá D.C.: ICA, 1992. 64 pp.
- Inventario Nacional de GEI Módulo Agricultura (2009), Capítulo 4. [Internet], Colombia Documentación IDEAM, “Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo Territorial”. Mesa Técnica de trabajo institucional. Disponible desde: <http://www.cambioclimatico.gov.co/documentos/InventarioGasesEfectoInvernadero/IDEAM_4.pdf> [Acceso 03 de octubre de 2010].

- Panel Intergubernamental de expertos para el cambio climático. Naciones Unidas IPCC, (2000). [Internet], “Informe síntesis, efectos observados del cambio climático en el mundo”. Disponible Desde: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/es/mains1-2.html> Acceso 20 de octubre de 2010].
- Panel Intergubernamental para el Cambio Climático IPCC, (2008), [Internet], “Glosario de términos”, Disponible desde: <<http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>> [Acceso 10 de octubre de 2010].
- Kettunen, R., Saarni, M., Pertti, Silvola, J. (2004), “Elevated CO₂ concentration and nitrogen fertilisation effects on N₂O and CH₄ fluxes and biomass production of *Phleum pratense* on farmed peat soil”, *Soil Sci*, 20.740.
- Kaizzi, C., Ssali, H., Vlek. P. (2006), “Differential use and benefits of Velvet vean (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) and N fertilizers in maize production in contrasting agro-ecological zones of E. Uganda” *Journal Agricultural Systems*, 88: 44-60.
- Grupo de Investigación en Agroecología (2009), Próyecto de investigación: Los abonos verdes como estrategia agroecológica y ambiental en agroecosistemas del Valle del Cauca”, presentado a Colciencias por el Grupo de Investigación en Agroecología de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.
- Maccabe, W. L., Smith, J.C., Harriott, P. (1998), *Operaciones unitarias en ingeniería química*, 4ª ed., McGraw-Hill, p. 848.
- Martin, G.M.; Rivera, R. (2004), “Mineralización del Nitrógeno de la *Canavalia ensiformis* en un suelo Ferralítico rojo de la Habana”, *Cultivos tropicales*, vol. 25, no. 3, pp. 83-88.
- Ojiem, J., Vanlauwe, B., Ridder, N., Giller, K. (2007), “Niche-based assessment of contributions of legumes to the nitrogen economy of Western Kenya smallholder farms”, *Journal Plant Soil*, 292: 119-135.
- Orozco, F. (1999), *La biología del nitrógeno: conceptos básicos sobre las transformaciones biológicas*, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Facultad de Ciencias, pp. 15- 24.
- Prager, M., Victoria, J.A., Sánchez de P., M. (2002), *El suelo y los abonos verdes, una alternativa de manejo ecológico*, Cuadernos ambientales, no.7, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira y Ministerio de Agricultura, pp. 4-16.
- Salamanca, R. (1999), *Suelos y fertilizantes*, Universidad Santo Tomás Abierta y a Distancia, Ediciones USTA, p. 33 en adelante.

- Salamanca, A.; Wilson, F. (2003), *Efecto de la incorporación de abonos verdes sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de un vertisol ústico en las condiciones del Valle del Cauca*, Palmira, trabajo de grado, ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, pp. 77.
- SEAE, (2007), *La contribución de la agricultura ecológica a la mitigación de cambio climático en comparación con la agricultura convencional (SEAE) en colaboración con la fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sostenible*, pp. 8-25.
- Shang, S. Y., Chao, M., Hsiu, C., Huan. C. (2009), "Estimation of methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in Taiwan", *Journal Renewable Energy*, 34: 1916–1922.
- Tejada, M., González, J.L., García, A., Parrado, J. (2007), "Effects of different green manures on soil biological properties and maize yield", *J. Bioresource Technology*.
- UNESCO (2007), *Human Alteration of the Nitrogen Cycle: Threats, benefits and Opportunities*, April 2007, no. 4, UNESCO-SCOPE, París, France.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ALMACENES DE CARBONO EDÁFICO EN SUELOS CAFETALEROS DE LA SIERRA SUR DE OAXACA, MÉXICO

G. Álvarez Arteaga ⁽¹⁾, A. Ibáñez Huerta ⁽¹⁾,

N.E. García Calderón ⁽²⁾

*(1) Laboratorio de Edafología Nicolás Aguilera
Dpto. Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México.*

*(2) UMDI-DERN Facultad de Ciencias, Campus Juriquilla
Universidad Nacional Autónoma de México.*

RESUMEN

Considerando la importancia que tienen los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra como proveedores de servicios ambientales, se realizó un estudio para determinar los almacenes de carbono edáfico y su distribución espacial dentro de una finca cafetalera en la Sierra Sur de Oaxaca. Para ello se realizó la caracterización morfológica de los suelos y se determinó el pH, la concentración de carbono y sus almacenes dentro de una malla de 152 puntos equidistantes dentro de la finca. Los resultados indicaron la presencia de tres grupos de suelo: alisoles húmicos, umbrisoles húmicos y cambisoles mólicos. Los almacenes de carbono edáfico a una profundidad de 40 cm se situaron

en promedio a 159 Mg ha^{-1} , siendo los suelos del grupo de los acrisoles los de mayor acumulación. Los resultados corroboraron la capacidad de estos agroecosistemas para funcionar como grandes almacenes de carbono edáfico.

Palabras clave: Agroecosistemas cafetaleros, almacenes de carbono, distribución espacial.

SPATIAL DISTRIBUTION OF CARBON STOCKS IN COFFEE GROWING SOILS IN SIERRA SUR DE OAXACA, MÉXICO

ABSTRACT

Shade coffee growing agroecosystems are important environmental services providers; we conducted a study to determine soil carbon stocks and their spatial distribution within a coffee plantation in the Sierra Sur of Oaxaca. Soil morphological description was done and also we determined pH, soil organic carbon and its storage in a grid of 152 equidistant points within the coffee plantation. The results indicated the presence of three soil groups: humic alisols, humic umbrisols and mollic cambisols. Soil organic carbon stocks at 40 cm depth were 159 Mg ha^{-1} average. alisols accumulate more soil organic carbon than others soils. The results confirm the capacity of these agro-ecosystems to function as major carbon sinks.

Keywords: coffee agroecosystems, carbon stocks, spatial distribution.

INTRODUCCIÓN

Los agroecosistemas cafetaleros en México, importancia socioeconómica y ambiental

De acuerdo a cifras proporcionadas por la FAO, para el año de 2009, México se ubicó como el octavo país productor de café en el mundo y primero en café orgánico. En el territorio nacional se cultivan aproximadamente 789 000 ha de café, ubicadas

en 281 municipios con 4 326 comunidades repartidas en los estados de Chiapas, Colima, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tabasco y Veracruz. Del total de esta superficie, Oaxaca produce 23% del total, únicamente detrás de Chiapas (30%). Tales cifras dan cuenta de la importancia de esta actividad dentro del sector agrícola nacional y estatal, tanto por la derrama de divisas como por la mano de obra empleada.

Las principales variedades de café que se cultivan en el estado de Oaxaca son la arábica y robusta, su cultivo se realiza bajo diferentes esquemas de manejo como son: a) los sistemas rusticanos o de montaña, que consisten en la sustitución de plantas arbustivas y herbáceas del piso del bosque por matas de café; b) el policultivo tradicional o de jardín en el que se introduce el café debajo de los bosques, pero acompañado de numerosas especies de plantas útiles y bajo un manejo sofisticado de las especies nativas; c) el policultivo comercial, que involucra la remoción total del bosque original y la introducción de diversos árboles de sombra apropiados para el café; d) el monocultivo bajo sombra, que utiliza casi por completo árboles de la leguminosa *Inga* y finalmente e) el cultivo de café al sol (Moguel y Toledo, 1996). Dentro de esta variedad de sistemas productivos, se considera que los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra o “cultivos de jardín” presentan ventajas ecológicas en tanto que cumplen con diferentes funciones como la preservación de la biodiversidad de los ecosistemas originales, la manutención de servicios ambientales como la captura de carbono y agua, a la vez que proporcionan ingresos adicionales a los productores a través del cultivo y comercialización de otros productos (Moguel y Toledo, 1996; Manson *et al.*, 2008).

Ante la fuerte caída del precio internacional del café en las últimas décadas, los productores estatales han explorado estrategias tendientes a mantener su viabilidad económica y social, algunas de las cuales se han enfocado a la producción de café orgánico y gourmet, así como a la venta de servicios ambientales (Beer *et al.*, 1998; Montagnini y Nair, 2004). Respecto a las primeras, es conocido que el mercado del café orgánico proporciona precios más altos y estables a cambio de maximizar la conservación de la biodiversidad o el bienestar socio-económico de los trabajadores (Rice, 2003; Bacon, 2005) y dentro de este contexto, —como se citó previamente—,

los sistemas de producción cafetalera en México y particularmente en el estado de Oaxaca ofrecen amplias perspectivas (Moguel y Toledo, 2004).

La venta de servicios ambientales ha surgido como una nueva alternativa en la que los productores pueden recibir compensaciones económicas a cambio de preservar e incrementar la cobertura forestal de sus predios; es preciso mencionar que la puesta en marcha de diversos programas sectoriales que consideran el pago por servicios hidrológicos (Manson, 2004) ha tenido gran respuesta entre los productores y se espera que en un futuro cercano, los bonos por servicios de captura de carbono sean un detonante para fortalecer el manejo sustentable de estos agroecosistemas, para ello, es necesario realizar investigaciones sobre la capacidad de estos sistemas para acumular carbono en sus diferentes componentes.

Estimación de almacenes de carbono edáfico en suelos forestales.

Problemática y limitantes

En la actualidad, sabemos que el estudio del ciclo del carbono (C) se ha constituido como uno de los nuevos paradigmas científicos. La alteración de los ecosistemas terrestres en todo el mundo y la creciente emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera han favorecido el desarrollo de nuevas líneas de trabajo; una de ellas es la que concierne a la estimación de los reservorios de C en los ecosistemas. De manera general se consideran dos grandes almacenes, la biomasa aérea y subterránea, y el suelo, del cual nos referiremos a continuación.

Estimar los contenidos de C almacenado en el suelo resulta una tarea laboriosa, ya que generalmente se carece de información previa suficiente sobre los procesos que rigen la dinámica del C en los suelos locales (Maser *et al.*, 2000). Para estudiar la función del suelo sobre la captura de C es importante realizar evaluaciones a través de muestreos de suelos con vegetación y ambientes uniformes que permitan indicar los niveles de materia orgánica del suelo (MOS) y sus variaciones dentro de este suelo. Luego, los valores pueden ser extrapolados para áreas con condiciones similares; sin embargo, debido a la extrema variabilidad en las propiedades de algunos

suelos y a la carencia de uniformidad en otras variables, es importante tener un alto grado de representatividad en los estudios. Generalmente, los trabajos realizados se han enfocado principalmente a suelos agrícolas, propios de las regiones con clima templado y en menor medida a ecosistemas naturales particularmente de zonas tropicales y subtropicales.

Como podrá advertirse, los problemas de muestreo de suelos, la variabilidad de los mismos y la profundidad crean amplias diferencias en las estimaciones de la reserva de C, por lo que algunos investigadores ubican estos valores hasta en 3 000 Pg (Atjay *et al.*, 1979) mientras que otros como Eswaran *et al.* (1993) lo estiman en 1500 Pg. De cualquier manera se considera que las reservas de C en el suelo son más del doble de las estimadas en la atmósfera y alrededor de tres veces el carbono de la materia orgánica en la biósfera (Lal *et al.*, 1998).

Un aspecto importante para evaluar la cantidad de C presente en el suelo es su profundidad. A pesar de que la MOS se concentra en las capas superficiales de la mayoría de los suelos, para el caso de algunos como vertisoles, chernozems, phaeozems e histosoles hay cantidades sustanciales de C en capas profundas. Otro punto a considerar es la evaluación de la densidad aparente del suelo (ρ_a), ya que para calcular la cantidad de carbono orgánico (Mg ha^{-1}), es necesario conocer su valor, esto no siempre es observado o bien, las evaluaciones se basan en criterios subjetivos. No obstante se debe tener en cuenta que la ρ_a de las capas superficiales del suelo cambia bajo diferentes usos y prácticas de manejo. Como resultado de las dificultades anteriores no es sorprendente que las estimaciones lleguen a fluctuar de un estudio a otro considerablemente.

Los agroecosistemas cafetaleros como reservorios de carbono

Investigaciones recientes han resaltado el hecho de que los suelos de agroecosistemas cafetaleros bajo sombra funcionan como sumideros de carbono (Guo y Gifford, 2002), almacenando contenidos, incluso superiores a los de otros sistemas productivos y naturales. Lo anterior se puede explicar a partir de la coexistencia del café con

otras especies autóctonas consiguiendo reproducir de manera más o menos eficaz los flujos de energía y materia de los ecosistemas primarios y en el caso del suelo se preservan sus componentes y propiedades.

Bajo un manejo racional de estos agroecosistemas cafetaleros es factible pensar que actúen como grandes reservorios de carbono, agua y otros nutrientes, sin embargo, al ser el suelo un componente altamente variable dentro del contexto espacio-temporal, su organización y distribución tiende a fluctuar en función de una serie de parámetros físicos y bióticos, conformando mosaicos altamente complejos y difíciles de representar, sobre todo en zonas con relieve abrupto, como es el caso de los bosques tropicales de montaña. Para entender esta dinámica, el objetivo del presente estudio consistió en caracterizar los suelos dentro de un agroecosistema cafetalero bajo sombra, así como estimar los almacenes de carbono edáfico y su distribución espacial.

MATERIAL Y MÉTODOS

Antecedentes de trabajo y descripción de la zona de estudio

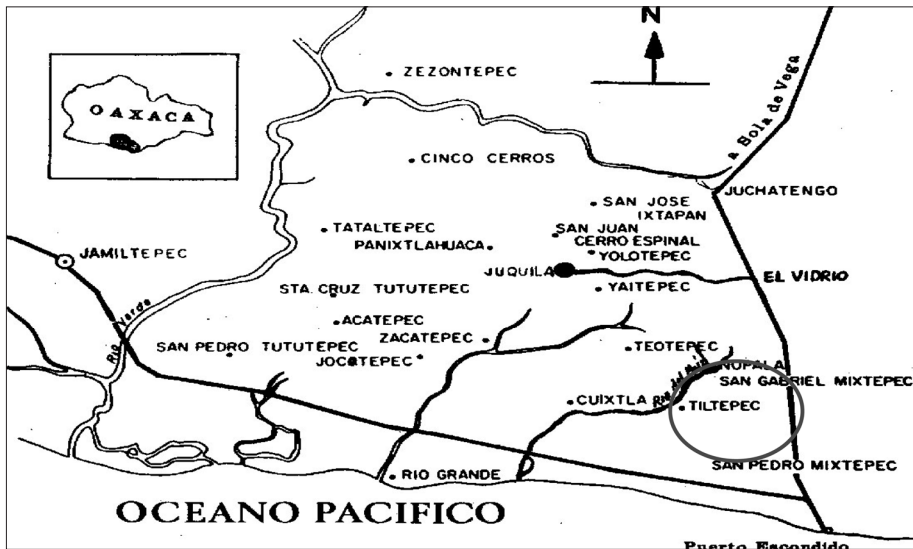
Los estudios edafológicos en zonas cafetaleras del estado de Oaxaca por parte del grupo de investigación del Laboratorio de Edafología Nicolás Aguilera en la Facultad de Ciencias, UNAM; se han centrado en primera instancia, en entender los procesos geomorfológicos y pedogenéticos que dieron origen a los suelos forestales de la Sierra Sur de Oaxaca, muchos de ellos ubicados dentro de fincas cafetaleras (García Calderón *et al.*, 2000, 2005, 2006). De manera paralela se han realizado trabajos relacionados con la evolución de la composición química y estabilidad de la materia orgánica del suelo en dichos agroecosistemas (Ibáñez *et al.*, 2001; Álvarez *et al.*, 2002; García Calderón, 2008).

El estudio se realizó dentro de la finca cafetalera “El Sinaí” ubicada en el municipio de Santos Reyes Nopala, perteneciente al distrito 22 de Juquila, estado de Oaxaca, México (16° 07’41.5 “de latitud norte y 97° 06’12.9 “de longitud oeste).

El relieve es montañoso escarpado y el intervalo altitudinal queda comprendido entre los 900 y los 1300 msnm (figura 1). La formación del sistema montañoso data del Paleozoico y los materiales parentales consisten principalmente en anortositas, cuarcitas y gneiss. En el sitio de estudio los materiales parentales se componen de anortositas y dioritas y sus productos metamórficos como el gneiss (García Calderón *et al.*, 2005). La pendiente es compleja y se orienta de norte-este y oeste-sur y pueden sobrepasar el 90 por ciento.

Figura 1

UBICACIÓN DE LA FINCA CAFETALERA “EL SINAÍ”, MUNICIPIO DE SANTOS REYES NÓPALA, OAXACA



El clima de la región es clasificado como semicálido húmedo con una precipitación anual de 1800 a 2000 mm y una temperatura media anual de 21 a 21.9 °C (García, 1973). Existen dos periodos principales: el de lluvias que comprende de junio a noviembre y el seco de diciembre a mayo. La vegetación corresponde un bosque tropical subcaducifolio con plantaciones de *Coffea arabica* por debajo del dosel

de la vegetación original remanente (Rzedowski, 1978). Las especies arbóreas más abundantes son *Brosimum alicastrum*, *Enterolobium cyclocarpus*, *Pterocarpus acapulcensis*, *Bursera simaruba*, *Caesalpinia coriácea*, *Ceiba pentandra* y *Ficus* spp. (Lorence y García, 1989; Flores y Manzanero, 1999), así como algunos frutales de cacao, naranja, plátano, mamey, chicozapote, aguacate, achiote, zapote negro, bambú y guayaba. Las variedades de café son la típica, mundo novo, caturra y catoai. El café producido dentro de esta zona en la modalidad de “café de jardín” tiene como denominación de origen “Pluma Hidalgo”.

Con objeto de evaluar los contenidos y patrones de distribución espacial del carbono edáfico dentro del agroecosistema cafetalero bajo sombra, se diseñó una malla de muestreo con puntos equidistantes a 100 m sobre una superficie de 365 ha. Las muestras se extrajeron a profundidades de 0 a 20 y 20 a 40 cm (152 para cada profundidad). El contenido de carbono orgánico se obtuvo mediante el método de combustión en húmedo, la densidad aparente por el método del cilindro y pH en conductímetro a una relación 2:1 agua-suelo (van Reeuwijk, 2002). Para correlacionar los datos de variabilidad espacial con la distribución de los grupos de suelos, se tomaron los perfiles representativos para cada grupo de suelos dentro de la finca. Los mapas de distribución espacial de las variables edáficas se diseñaron empleando el software Surfer versión 6.02 por el método de kriging.

RESULTADOS

Grupos de suelo representativos

Los procesos edafogénicos que tienen lugar en esta región dentro de la Sierra Sur de Oaxaca, dan lugar a suelos típicamente tropicales cuyos rasgos comunes son el alto grado de intemperismo, fuerte lavado de bases y gran dinámica en los procesos de mineralización y humificación. De acuerdo con la descripción de los perfiles tipo, los suelos dentro de la finca cafetalera Sinaí son alisoles húmicos, umbrisoles húmicos y cambisoles mólicos (FAO-ISRIC-ISSS, 1998), (cuadro 1).

Cuadro 1

PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS PERFILES DE SUELO REPRESENTATIVOS DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO

Suelo	Horizonte	Prof	Textura ⁽¹⁾	DA	pH		C	Ca	Mg	K	Na
		cm		g cm ³	H ₂ O	KCl	g kg ⁻¹			cmol(+) kg ⁻¹	
Acrisol húmico	Ap 11	" 0-12	CR	1.04	5.4	5.0	22.0	7.16	3.58	0.30	1.71
	Ap 12	" 12-30	AC	0.98	5.5	5.2	28.7	7.16	3.58	0.30	0.76
	AB	" 31-48	CA	1.08	5.5	4.8	10.0	4.03	2.46	0.26	0.33
	Bt1	" 48-66	CA	1.04	5.5	4.6	10.0	3.58	2.24	0.30	0.87
	Bt2	" 66-82	CA	1.05	5.6	4.7	6.3	3.58	2.24	0.26	1.38
	C1	" 82-125	CA	1.08	5.5	4.7	2.7	1.12	1.79	0.26	1.38
	C2	125-150	CA	1.11	5.9	4.6	2.7	1.12	1.12	0.26	1.41
Umbrisol húmico	Ap 11	"0-21	CA	1.00	5.3	4.7	31.8	10.3	0.44	0.17	1.43
	Ap 12	21-53	CA	1.04	5.3	4.7	22.7	4.93	1.72	0.17	1.07
	AC	53-75	CA	1.29	5.2	4.2	13.1	1.34	0.67	0.17	0.51
	C1	75-95	CL	1.37	5.4	4.2	3.8	1.34	0.22	0.17	0.51
	C2	" 95-142	C	1.37	5.5	4.3	2.8	1.56	0.89	0.21	0.64
Cambisol mólico	Ap 11	" 0-16	CA	1.21	6.5	5.3	15.2	3.50	0.82	0.95	0.61
	Ap 12	16-36	CA	1.22	6.5	5.3	10.1	2.23	0.47	0.95	0.51
	Bw	36-72	CA	1.26	6.3	5.5	1.4	1.30	0.35	0.95	0.51
	C1	" 72-106	CA	1.26	6.2	5.3	1.1	0.71	0.11	1.04	0.50
	C2	108-172	CA	1.26	6.3	5.8	0.3	0.59	0.23	1.04	0.51

⁽¹⁾CR= franco arcilloso, AC= arenoso-franco; CA= franco-arenoso, CL= franco-limoso.

El grupo de los alisoles ocupa principalmente la porción noreste de la finca, siendo ésta la que alcanza mayor altitud. Estos suelos son muy ácidos ($\text{pH} < 5$), con saturación de bases menor al 50 % y con altos contenidos de carbono en los primeros 20 cm de profundidad ($>50 \text{ g C kg}^{-1}$), que decrece entre 20 y 40 cm (41.1 g C kg^{-1}). Generalmente se observan estados avanzados de intemperismo con evidencias de minerales secundarios, producto de la migración en profundidad de compuestos organominerales.

El grupo de los umbrisoles está distribuido principalmente en los puntos de rompimiento de pendiente y a diferentes altitudes, el horizonte úmbrico es el carácter diagnóstico más representativo e indica la acumulación de contenidos medios de materia orgánica, poseen baja saturación de bases, y tienen coloraciones pardas o pardo amarillentas y texturas medias a gruesas.

Los cambisoles mólicos son los suelos menos evolucionados dentro del área de estudio, poseen una capa superficial con saturación mayor al 50 %, su textura es uniforme en todo el perfil y contienen alto grado de pedregosidad. Su acidez es intermedia de los grupos anteriores y su capacidad para acumular C es baja.

Todos los suelos se caracterizan por poseer un buen drenaje debido a su posición en el relieve.

Variabilidad espacial del pH y almacenes de carbono

Los datos referentes a los valores extremos y medias para los parámetros valorados dentro de la malla de muestreo se indican en el cuadro 2. Los valores de pH dentro de la malla de muestreo van de ligeramente ácidos a muy ácidos, siendo esta última condición más evidente para los suelos ubicados en la porción noreste de la finca (alisoles). Para el caso de los almacenes de carbono edáfico, los datos indican mayor acumulación en los primeros 20 cm con decrementos de 20 a 40 cm. La capacidad de los suelos para acumular C en los primeros 40 cm es de $158.7 \pm 33.6 \text{ Mg ha}^{-1}$ y resulta evidente en los mapas de distribución espacial (figuras 3, 4 y 5), que la mayor acumulación se tiene en la porción noreste.

Cuadro 2

VALORES MEDIOS, MÁXIMOS Y MÍNIMOS Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA LAS DIFERENTES
VARIABLES EDÁFICAS EVALUADAS DENTRO DE LA MALLA DE MUESTREO

Variable	PROFUNDIDAD							
	0 - 20 cm				20-40 cm			
	Media	Min.	Max.	Desv. Std.	Media	Min.	Max.	Desv. Std.
pH (H ₂ O)	5.3	4.0	6.3	0.5	5.3	4.1	6.3	0.5
pH (KCl)	4.8	3.7	5.8	0.5	4.7	2.8	5.8	0.5
Carbono (g kg ⁻¹)	50.1	5.0	143.0	22.1	36.7	2.0	138.0	19.2
Densidad aparente (g/cm ³)	0.9	0.5	1.2	0.1	1.0	0.6	1.4	0.2
Almacén de carbono (Mg ha ⁻¹)	88.0	236.6	11.9	33.7	70.7	248.4	3.4	33.6

Datos tomados a partir de un total de 152 muestras de suelo.

Figura 3

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL C EDÁFICO (G KG⁻¹) EN LA PROFUNDIDAD DE 0 A 20 CM

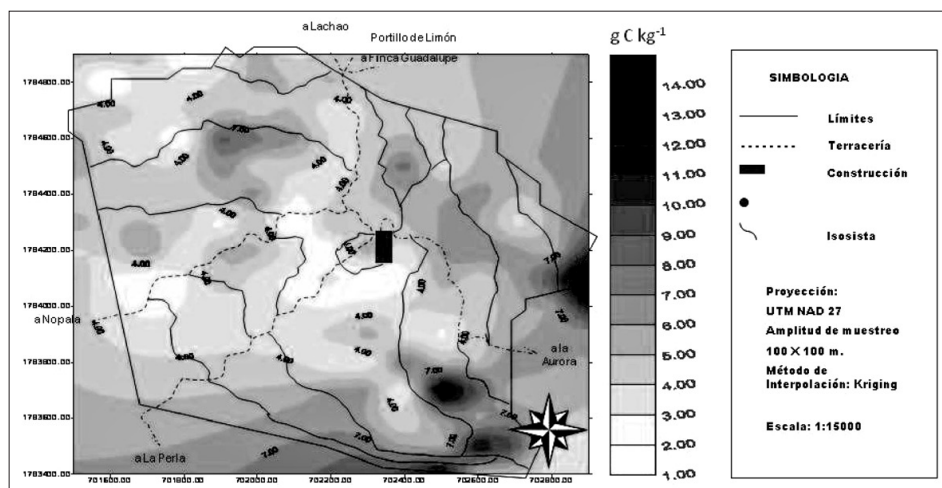


Figura 4

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL C EDÁFICO EN LA PROFUNDIDAD DE 20 A 40 CM

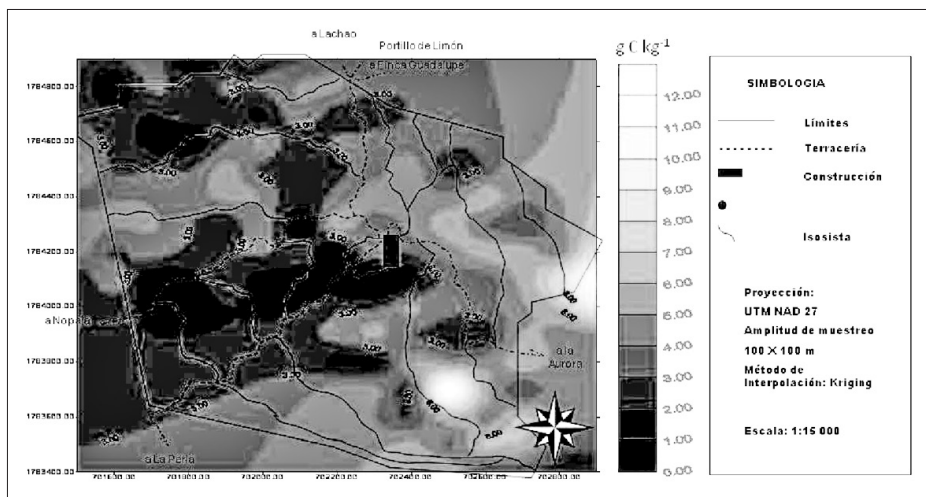
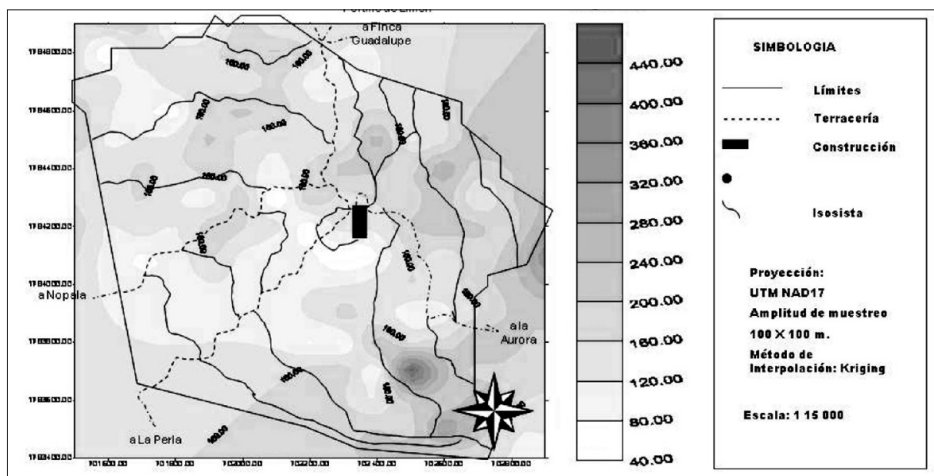


Figura 5

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ALMACENES DE C EDÁFICO EN LA PROFUNDIDAD DE 0 A 40 CM



DISCUSIÓN

Los procesos edafogénicos que tienen lugar en la zona de estudio en la Sierra Sur de Oaxaca son altamente complejos y dan lugar a suelos típicamente tropicales en los que se pueden advertir rasgos comunes como lo es el alto grado de intemperismo, una fuerte lixiviación de bases y un activo dinamismo en los procesos de reciclado de la materia orgánica del suelo. Debido a lo accidentado del relieve, cobran importancia los procesos erosivos y de transporte de material que tienden a favorecer el rejuvenecimiento constante de los suelos.

Mediante este estudio fue posible advertir la existencia de patrones de distribución de suelos que obedecen principalmente a su posición fisiográfica: los alisoles húmicos se presentan en terrazas, a partir de cortezas de intemperismo de gran profundidad. Es en estos puntos donde se observa una gran acumulación de compuestos organominerales (C asociado con arcillas) con profundidades mayores a 1 m. Los cambisoles y umbrisoles se ubican en las partes intermedias de las pendientes, en zonas de transporte donde los suelos son de escaso espesor y generalmente limitan con una capa pétreo consistente.

Es importante destacar la trascendencia que tienen estos procesos de erosión y transporte de materiales sobre la dinámica de acidificación del suelo y la acumulación del carbono. Los datos obtenidos indican la presencia de un gradiente de acidez que se incrementa hacia las partes altas de la finca, donde coincide con altos contenidos de carbono. Lo anterior pudiera explicarse como una disminución de la actividad microbiana sobre la materia orgánica del suelo y la incorporación de esta última con la fracción mineral del suelo (alisoles). Mediante los mapas de variabilidad espacial para el C edáfico y los almacenes de C, es posible advertir esta condición. Cabe señalar que al procesar los datos mediante criterios geoestadísticos, la amplitud de la malla de muestreo resultó poco eficiente para advertir los cambios de los parámetros estudiados respecto a la distancia entre puntos de muestreo, por lo que sugerimos reducir la amplitud de muestreo por debajo de los 100 m en caso de presentarse un relieve tan accidentado como fue el caso de nuestra área de trabajo.

Finalmente destaca la necesidad de contar con sitios testigo para establecer las comparaciones pertinentes entre condiciones de uso y manejo. En nuestro caso esta condición no pudo cumplirse debido a que dentro de la zona no existen áreas de conservación o libres de la influencia de las actividades humanas.

CONCLUSIONES

La información recabada y analizada durante este estudio permitió definir las siguientes pautas sobre la evolución de las propiedades de los suelos y la dinámica de los procesos de acumulación de carbono.

Los procesos de erosión y transporte de materiales ejercen una influencia determinante sobre patrones de distribución espacial de suelos. En tal sentido, las unidades de suelo identificadas para el sitio de estudio correspondieron, de acuerdo a la clasificación FAO-ISRIC-ISSS (1998), a alisoles húmicos, en el caso de los suelos más desarrollados, cambisoles mólicos y umbrisoles húmicos, para condiciones de mayor pendiente, donde los procesos de erosión y arrastre de materiales son más intensos.

Existe una correlación positiva entre la acidificación del suelo y la acumulación de carbono que también se advierte en los mapas de variabilidad espacial.

Los alisoles húmicos, ubicados en la porción noreste de la finca, son los suelos que ostentan la mayor capacidad para acumular carbono en los primeros 40 cm de profundidad.

Si bien los almacenes de carbono para estos suelos bajo manejo agroforestal pueden considerarse como elevados, al carecer de una superficie libre de manejo dentro de la zona no fue posible hacer comparativos los datos entre ambas condiciones de uso de suelo y vegetación.

BIBLIOGRAFÍA

Almendros, G. (2000), "Procesos de transformación de la materia orgánica en ecosistemas agrícolas e inalterados, en: *La edafología y sus perspectivas al siglo XXI*", tomo I, R. Quintero

- L., T. Reyna T., L. Corlay-Chee, A. Ibáñez H. y N.E. García Calderón (editores), C.P., UNAM, UACH, México.
- Álvarez, G. y N.E. García-Calderón (2002), *Estudio de la dinámica del carbono en suelos cafetaleros de Oaxaca*, México, II Simposio Internacional de Café y Cacao, Santiago de Cuba.
- Atjay, G.L.P., P. Ketnet (1979), "Terrestrial primary production and phytomass", in: *The global carbon cycle*, B. Bohn, E.T. Dejens, S. Kennel and P. Retner (editores), Wiley, Chichester, pp. 128-181.
- Bacon, C. (2005), "Confronting the coffee crises: can fair trade, organic and specialty coffees reduce small-scale farmers vulnerability in northern Nicaragua?", *World Development* 33(3): 497-511.
- Batjes, N. H. (1999), *Management options for reducing CO₂ concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil*, NRP Report no. 4102 00031. ISRIC Technical paper no. 30, Wageningen, The Netherlands.
- Beer J. R. Muschler, D. Kass, E. Somarriba, (1998), "Shade management in coffee and cacao plantations", *Agroforestry Systems*, 38: 139-164.
- Burke, I.C., C.M. Yonker, W.J. Parton, C.V. Cole, K. Flach y D.S. Schimel (1989), "Texture, climate and cultivation effects on soil organic matter content in US grassland soils", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:800-805.
- Eswaran, H., E. Van der Berg and P. Reich (1993), "Organic carbon in soils of the world". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 192-194.
- FAO-ISRIC-ISSS (1998), *World reference base for soil resources*, Soil Resources Report no. 84, Roma, Italia.
- FAO, Cifras de la producción de café del 2009 <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- Flores A., G.I. Manzanero, (1999), "Tipos de vegetación del estado de Oaxaca", en Vázquez M.A. (Ed.), *Sociedad y naturaleza de Oaxaca 3: Vegetación y flora*, Oaxaca, pp. 7-45.
- García, E. (1973), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen*, UNAM, México.
- García-Calderón, N.E., A. Ibáñez, E. Fuentes, B. Platero, M.S. Galicia, R. Ramos, I. Mercado, L. Reyes, A. Hernández y J. Tremols, (2000), "Características de los suelos de un sector de Pluma Hidalgo, Sierra Sur de Oaxaca, México", en *La edafología y sus perspectivas al siglo XXI*, tomo I. R. Quintero-Lizaola Ed), CPCA, UNAM, UACH, México, pp. 61-67.

- García Calderón, N.E., Krasilnikov P.V., A. Ibáñez Huerta, G. Álvarez Arteaga, E. Fuentes Romero, B.E. Marín Castro, (2005), "WRB classification of some polygenetic soils of Sierra Sur de Oaxaca, México", *Euras. Soil Sci.* 38(1), pp. 527-534
- García-Calderón N.E., G. Álvarez Arteaga, A. Ibáñez Huerta, P. Krasilnikov and A. Hernández (2006), "Soil diversity and properties in mountainous subtropical areas, in Sierra Sur de Oaxaca, México", *Canad. J. Soil Sci.*, 86: 61-76.
- García Calderón N.E., Y. Uriostegui Delgado, G. Álvarez Arteaga, A. Ibáñez Huerta, P. Krasilnikov, "Spatial distribution of the soil properties controlling soil resistance to erosion at a coffee growing farm in Sierra Sur de Oaxaca", in Krasilnikov, P., Carré, F & Montanarella, L. (eds.) (2008), *Soil geography and geostatistics. Concepts and applications*, Institute of Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission. <http://europa.eu/pp>. 37-54.
- Guo, L.B and R.M. Gifford (2002), "Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis", *Global Change Biology* 8(4): 345-360.
- Ibáñez H.A., E. Fuentes, G. Álvarez, N. García Calderón (2001), *Sustancias húmicas en suelos cafetaleros de la finca "El Sinaí", Oaxaca, México*, Memorias del XV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Cuba.
- Lal, R., J.M. Kimble, R. Follet and C.V. Cole (1998), "The potential of the United States cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect", *Ann. Arbor Press*, Chelsea, MI.
- Lorence, D.H., A. García (1989), Oaxaca, México, in D.G. Campbell and H.D. Hammond (editores.), "Floristic inventory of tropical countries", N.Y., *Bot. Gard. Publ. Bronx*. pp. 253-269.
- Manson, R., V. Hernández-Ortiz, S. Gallina and K. Mehlreter (editores), (2008), *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación*, Instituto Nacional de Ecología, México.
- Masera O.R., B.H.J De Jong, I. Ricalde y A. Ordoñez (2000), Consolidación de la oficina mexicana para la mitigación de gases de efecto invernadero, reporte final, México, INE/UNAM, 197 pp.
- Moguel, P. and V.M. Toledo (1996), "El café en México, cultura indígena y sustentabilidad", *Ciencias*, 43: 40-51.

- Moguel, P. and V.M. Toledo (2004), "Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos", *Biodiversitas*, 55: 2-7.
- Montagnini, F. and P.K.R. Nair (2004), "Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems", *Agroforestry Systems* 61-62 (1-3): 281-295.
- Oades, J.M. (1988), The retention of organic matter in soils, *Biogeochemistry*, 5: 35-570.
- Rice, R. (2003), "Coffee production in a time of crisis: social and environmental connections", *SAIS review*, 23(1): 221-245.
- Rzedowski, J. (1978), *Vegetación de México*, Limusa, México.
- SURFER Versión 6.02 software, Copyright 1993-1996, Golden Software Inc.
- Van Reeuwijk, L.P. (Editor) (2002), "Procedures for soil analysis. 6th edition", ISRIC-FAO, ISRIC Technical Paper no. 9.

COLABORADORES

Abel Ibáñez Huerta

Maestro en Ciencias, Laboratorio de Edafología Nicolás Aguilera, Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. 04510, México. Correo electrónico: aibanezter@gmail.com

Alejandro Valdés Carrera

Estudiante de la Licenciatura en Ciencias Ambientales en la Facultad de Planeación Urbana y Regional, Universidad Autónoma del Estado de México y becario del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Correo electrónico: (escolapio_321@hotmail.com)

Andy Jarvis

Doctor y líder del Programa Análisis de Políticas del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) en Cali Colombia, y es el líder temático en el Programa de Investigación CGIAR de Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentario (CCAFS). Tiene más de 10 años de experiencia en investigación de punta en países en vía de desarrollo en apoyo a los retos de reducción de pobreza rural, y la protección del medio-ambiente.

Su investigación se ha enfocado en el uso de análisis espacial y modelación en los campos de conservación de biodiversidad, adaptación de medios de vida a cambio climático, y el mantenimiento de servicios ecosistémicos. Ha publicado numerosos artículos científicos y libros, ha trabajado como consultor para la Organización de Agricultura y Alimentos (FAO) en el desarrollo de estrategias para la conservación de la agrobiodiversidad frente el cambio climático, y en otros proyectos con la Unión Europea y el Fondo Mundial del Medio-Ambiente (GEF) entre otros. En 2003 ganó el premio de mejor artículo publicado en la revista *Crop Science* relacionado con Recursos Genéticos, y en 2009 fue el ganador del prestigioso premio Ebbe Nielsen por su investigación en Bioinformática relacionado con los impactos de cambio climático sobre la agrobiodiversidad. Correo electrónico: a.jarvis@CGIAR.ORG

Carlos Jorge Aguilar Ortigoza

Doctor en Ciencias por el Instituto de Ecología, Biólogo y M. en C. por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, Especialidad en Cartografía Automatizada por la Facultad de Geografía UAEM; profesor TC en el área de Botánica de la Facultad de Ciencias UAEM. Miembro del Cuerpo Académico Sistemática y Ecología Vegetal; con 35 años de impartir docencia en Biología celular, Fisiología vegetal, Botánica sistemática, Sistemática molecular y Biogeografía; con varios libros y artículos científicos en el área de botánica de angiospermas; conferencias en Biología vegetal y Sistemática filogenética; dirección de tesis de licenciatura, maestría y doctorado en Botánica para estudiantes de UAEM, UNAM y UAG. Correo electrónico: aguilarcj@yahoo.com.mx

Charlotte Lau

Investigadora y coordinadora de proyectos de ciencias sociales en Sur-Asia para el CGIAR Programa de Investigación sobre el Cambio Climático, Agricultura y

Seguridad Alimentaria (CCAFS), basada en Nueva Delhi, India. Anteriormente fue una investigadora visitante en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) en Cali-Colombia. Su enfoque es el impacto de cambio climático en sistemas productivos y la capacidad humana para adaptarse.

Elizabeth Fuentes-Romero

Maestra en Ciencias, Laboratorio de Edafología, UMDI-Facultad de Ciencias-Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, C.P. 04510. Correo electrónico: rofue1@gmail.com.

Emmanuel Zapata-Caldas

Geógrafo en la Universidad del Valle, Cali-Colombia. Actualmente es asistente de investigación en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), dentro del programa *Decision and Policy Analysis* (DAPA). Allí realiza labores relacionadas con análisis geográfico, involucrando diversos temas de investigación; desde la identificación de sitios potenciales para mejorar la calidad de la agricultura en un sitio específico, hasta la evaluación de los impactos del cambio climático del sector agrícola en las escalas local, regional y global. Actualmente realiza la Maestría en Sistemas de Información Geográfica en la Universidad de San Francisco de Quito. Correo electrónico: emmanuelzapata@gmail.com

Gabriela Gutiérrez Martínez

Licenciada en Ciencias Ambientales, Facultad de Planeación Urbana y Regional, y estudiante de la Maestría en Ciencias Ambientales, Facultad de Química por la

Universidad Autónoma del Estado de México y becaria del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Correo electrónico: lady_ponita03@yahoo.com; environmentgaby@gmail.com

Germán Carrasco Anaya

Licenciado en Geografía. Escuela Nacional Preparatoria, Universidad Nacional Autónoma de México. Correo electrónico: germanc@unam.mx

Gloria Alfaro Sánchez

Maestra en Ciencias. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Correo electrónico: galfaro@igg.unam.mx

Gratia Dei Flores Salgado

Bióloga por la Facultad de Ciencias y estudiante de la Maestría en Ciencias Ambientales en la Facultad de Química por la Universidad Autónoma del Estado de México y becaria del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Correo electrónico: gdfst@hotmail.com

Gustavo Álvarez Arteaga

Doctor en Ciencias, Laboratorio de Edafología “Nicolás Aguilera”, Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. 04510, México. Correo electrónico: galvareza68@gmail.com

José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz

Biólogo por la Facultad de Ciencias y Doctor en Ciencias por el Instituto de Ecología del programa doctoral en Ciencias Biomédicas. Actualmente es director e investigador en el programa de cambio climático de Pronatura México A.C., pertenece al Sistema Nacional de Investigadores y es profesor en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Tiene múltiples publicaciones y participaciones en cursos, talleres y congresos; es expositor para The Climate Project de Al Gore. Es corresponsable de borrar la huella de carbono de la Conferencia de las Partes No. 16, desarrollada en Cancún el año pasado y coautor del Mercado Voluntario de carbono en México que acutalmente beneficia a más de 509 familias de 10 comunidades de Oaxaca que reciben un pago por el servicio ambiental Captura de carbono, derivado del cuidado y recuperación del bosque mesófilo de montaña. Correo electrónico: jabordonez@gmail.com

Julián Ramírez-Villegas

Asistente de investigación en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Julián tiene experiencia en modelamiento climático, de cultivos y de conservación de biodiversidad y parientes silvestres, particularmente bajo el contexto de cambio climático, con el fin de producir nuevo conocimiento para los sistemas de producción agrícola y servicios ambientales en las zonas tropicales. Julián es ingeniero agrícola de la Universidad Nacional de Colombia y se encuentra adelantando su PhD en la Universidad de Leeds (Inglaterra).

Liliana del Carmen Valdez-Arenas

Laboratorio de Edafología, UMDI-Facultad de Ciencias-Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Delegación Coyoacán, C.P. 04510. Correo electrónico: livalare@correo.unam.mx

Lorena Romero Salazar

Obtuvo en 1997 el Doctorado en Ciencias (Física) por la UAM-Iztapalapa. Miembro del SNI desde 1996 y recientemente, en 2011, promovida a nivel II del SNI. Perteneció a la Facultad de Ciencias de la UAEMéx desde 1997 y al Cuerpo Académico Consolidado Física Estadística. Sus investigaciones y colaboraciones interdisciplinarias han sido sobre: físico-química, sustentabilidad de suelos, física estadística y teoría construccional aplicada a modelos ambientales; hidrodinámica de eyecciones de masa coronal; así como género y ciencia. Correo electrónico: lors@uaemex.mx

María Estela Orozco Hernández

Doctora en Geografía en Estudios Territoriales por la Universidad Nacional Autónoma de México, investigadora del Centro de Investigación de Estudios Avanzados en Planeación Territorial y coordinadora de posgrado en la Facultad de Planeación Urbana y Regional de la Universidad Autónoma del Estado de México, miembro del Sistema Nacional de Investigadores y líder del Cuerpo Académico de Estudios Territoriales y Ambientales. Sus líneas de investigación son los estudios regionales y locales con dimensión ambiental y es responsable de los proyectos: Metodología mixta para la valoración de las prácticas socio ambientales en el uso y manejo de los recursos naturales en comunidades rurales del Estado de México (Conacyt). Cambios de uso del suelo, inducidos por actividades agropecuarias en ecosistemas terrestres templados y cálidos del Estado de México: impactos locales y emisiones globales de gases de efecto invernadero Conacyt-Semarnat. Es autora y coautora de artículos nacionales e internacionales, libros y capítulos de libro, dirección de tesis de licenciatura, maestría y doctorado, y docente en la Licenciatura, Maestría y Doctorado en Ciencias Ambientales y en la línea de sustentabilidad urbana en la Maestría en Estudios de la Ciudad y en el Doctorado en Urbanismo de la Universidad Autónoma del Estado de México. Correo electrónico: eorozcoh61@hotmail.com

Ma. Eugenia Valdez Pérez

Es geógrafa por la Universidad Autónoma del Estado de México y maestra en Geografía con especialidad en conservación y manejo de recursos naturales por la Universidad Nacional Autónoma de México, especialista en cartografía automatizada, estudiante del Doctorado en Ciencias y profesora de tiempo completo por la Universidad Autónoma del Estado de México. Publicaciones en recursos naturales y cartografía, tiene experiencia en clasificación de campo de la carta topográfica 1:50,000 y 1:250,000, elaboración de cartografía automatizada, levantamientoS GPS, manejo, interpretación y elaboración de cartografía topográfica y temática en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Manejo de áreas naturales protegidas en la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México. Docencia en Cartografía, Sistemas de Información Geográfica, teledetección, GPS, Geografía física, trabajo de campo, recursos hídricos y dirección de tesis de licenciatura. Correo electrónico: mevaldezp@gmail.com

María Engracia Hernández Cerda

Doctora en Ciencias e Investigadora del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, tiene publicaciones nacionales e internacionales y ha dirigido tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Correo electrónico: mehc@unam.mx

Marina Sánchez de Prager

Investigadora de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Palmira. Correo electrónico: msanchezdp@palmira.unal.edu.co

Norma Eugenia García

Realizó estudios de licenciatura y maestría en Biología en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, obtiene el grado de doctora en Ciencias Biológicas en la Universidad Complutense de Madrid. Estancia postdoctoral en el Departamento de Ciencia del Suelo de la Universidad de British Columbia, Canadá. Profesor Titular B de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación en el Campus Juriquilla de la UNAM. Nivel C del PRIDE y nivel I en el SNI. Ha publicado numerosos artículos en revistas científicas, participado como editora de libros y capítulos de libro, y en congresos nacionales e internacionales. Responsable de proyectos de investigación y proyectos de docencia financiados. Ha dirigido tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Sobresaliente “CUM LAUDE” en el examen doctoral, Cátedra *Faustino Miranda*, Facultad de Ciencias, UNAM. Reconocimiento como colaboradora en el Premio Anual Año 2007 a los resultados de la investigación, Academia de Ciencias de Cuba, 2008. Pertenece a la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, Unión Internacional de Sociedades de la Ciencia del Suelo, Sociedad Mexicana de Cristalografía y a la Sociedad Internacional de las Sustancias Húmicas. Correo electrónico: normaeu@fata.unam.mx

Patricia Mireles Lezama

Es ingeniero agrónomo por la Universidad Autónoma del Estado de México y maestra en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México, profesora-investigadora del Centro de Investigación de Estudios Avanzados en Planeación Territorial (CEPLAT), coordinadora del Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Facultad de Planeación Urbana y Regional de la Universidad Autónoma del Estado de México. Colabora en el proyecto “Cambios de uso del suelo, inducidos por actividades agropecuarias en ecosistemas terrestres templados y cálidos del Estado de México: impactos locales y emisiones globales de gases de efecto invernadero

Conacyt-Semarnat”. Es autora y coautora de artículos nacionales e internacionales y capítulos de libro, dirección de tesis de licenciatura y maestría, y docente en Licenciatura y Maestría en Ciencias Ambientales. Correo electrónico: paty_land@hotmail.com

Pavel Krasilnikov Vladimirovich

Es doctor en Ciencias, Institute of Biology, Karelian Research Center RAS, 185610, Petrozavodsk, Russia. Correo electrónico: pavel.krasilnikov@gmail.com

Rebeca Granados Ramírez

Es doctora en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México. Investigadora Titular “A “ en el Instituto de Geografía, UNAM. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I. Estudios y cursos de especialización en torno a las líneas: Agroclimatología y Geomática aplicada al estudio y manejo de la agricultura y los recursos naturales. Participación en el proyecto institucional. “Nuevo Atlas Nacional de México” en la sección Agroclimática. Artículos internacionales, nacionales y de divulgación, y dirección de tesis de geógrafos y biólogos. Correo electrónico: rebeca@igg.unam.mx

Rodolfo Correa Yotengo

Investigador de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Palmira. Correo electrónico: rcorreay@palmira.unal.edu.co

Stacy Hernández Millán

Bióloga. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. Correo electrónico: napstay@hotmail.com

Vicente Peña Manjarrez

Es geógrafo y egresado de la Maestría en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México, perito y consultor ambiental por el Colegio de Ingenieros del Estado de México A. C. y especialista en Cartografía Automatizada y Sistemas de Información Geográfica por la Universidad Autónoma del Estado de México, es autor y coautor de artículos nacionales e internacionales, capítulos de libro y dirección de tesis de licenciatura. Correo electrónico: vpenam62@hotmail.com

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	7
LÍNEA BASE SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO	
Los estudios de carbono en México <i>José Antonio Benjamín Ordoñez Díaz</i>	11
Agenda de investigación ambiental. Cambios de uso del suelo, inducidos por actividades agropecuarias en ecosistemas terrestres del Estado de México: impactos locales y emisiones globales de gases de efecto invernadero <i>María Estela Orozco Hernández</i>	27
Contribución de los métodos para estimar el contenido de biomasa y carbono en bosque templado <i>Ma. Eugenia Valdez Pérez, María Estela Orozco Hernández, Carlos Jorge Aguilar Ortigoza, Lorena Romero Salazar</i>	53
Los bosques montanos de niebla en México: heterogeneidad ambiental y almacenes de carbono <i>G. Álvarez Arteaga, P. Krasilnikov, N. E. García-Calderón</i>	87

Estrategias de mitigación y adaptación ante el cambio climático

Gabriela Gutiérrez Martínez, Alejandro Valdés Carrera, María Estela Orozco Hernández 109

AMBIENTES BIOFÍSICOS

Factores de degradación de los ecosistemas terrestres en México y Estado de México

María Estela Orozco Hernández, Vicente Peña Manjarrez, Patricia Mireles Lezama 141

El clima y la degradación del suelo en una zona semiárida tropical de México

María Engracia Hernández Cerda, Germán Carrasco Anaya, Gloria Alfaro Sánchez 181

Revisión comparativa de los métodos para la medición de gases de efecto invernadero en cuerpos de agua

Gratia Dei Flores Salgado, Patricia Mireles Lezama, María Estela Orozco Hernández 213

Emisiones de bióxido de carbono y metano en suelos de humedales

*Elizabeth Fuentes-Romero, Liliana del Carmen Valdez-Arenas,
Norma Eugenia García-Calderón* 233

AMBIENTES PRODUCTIVOS

Análisis de los impactos de cambio climático sobre cultivos andinos

Emmanuel Zapata-Caldas, Andy Jarvis, Julián Ramírez, Charlotte Lau 251

Variación espacial de los indicadores agroclimáticos: histórico y por efectos del ENOS (horas frío)

Rebeca Granados Ramírez, Stacy Hernández Millán 289

Gases con efecto invernadero (GEI) en maíz <i>Zea mays</i> L. con fertilización orgánica <i>versus</i> convencional	
<i>Rodolfo Correa Yotengo, Marina Sánchez de Prager</i>	309
Distribución espacial de los almacenes de carbono edáfico en suelos cafetaleros de la Sierra Sur de Oaxaca, México	
<i>G. Álvarez Arteaga, A. Ibáñez Huerta, N.E. García Calderón</i>	341
COLABORADORES	359

Carbono en ambientes biofísicos y productivos. Línea base sobre cambio climático, de María Estela Orozco Hernández y Patricia Mireles Lezama (coordinadoras), se terminó de imprimir en febrero de 2014, en los talleres de LITOGRAFICA DORANTES S.A. de C.V. El tiraje consta de 500 ejemplares. *Formación y Diseño de Portada*: Mayra Flores Mercado. *Cuidado de la edición*: María Consuelo Barranco Monroy.

Editora responsable
María Lucina Ayala López

