



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOMÉDICAS

INSTITUTO DE ECOLOGÍA

*EMISIONES Y CAPTURA DE CARBONO DERIVADAS DE
LA DINÁMICA DE CAMBIO EN EL USO DEL SUELO
EN LOS BOSQUES DE LA REGION PURÉPECHA*

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

PRESENTA:
JOSÉ ANTONIO BENJAMÍN ORDÓÑEZ DÍAZ.

DIRECTOR DE TESIS:
DR. OMAR RAÚL MASERA CERUTTI

CODIRECTOR DE TESIS
BERNARDUS HENDRICUS JOZEPH DE JONG BERSMA
MÉXICO, D.F.

2008.



INSTITUTO
DE ECOLOGÍA
U N A M



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA

CIRCUITO EXTERIOR, CIUDAD UNIVERSITARIA
C.P. 04510 MEXICO, D.F. MEXICO

Voto Aprobatorio

13 de noviembre de 2008

DR. ISIDRO ÁVILA MARTÍNEZ

Director General de Administración Escolar,
UNAM

PRESENTE

Estimado Dr. Isidro Avila,

Después de haber evaluado la Tesis titulada "Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha" del alumno, José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz con número de cuenta 8652437-1 y número de expediente 152973, inscrito en el Doctorado en Ciencias Biomédicas y aspirante al grado de **Doctor en Ciencias**, considero que la Tesis reúne los requisitos suficientes y la acepto para ser presentada en el examen de grado. Por tanto emito mi VOTO APROBATORIO al respecto.

Agradezco de antemano la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente,

Dr. Carlos Gay García

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE QUÍMICA



CIRCUITO EXTERIOR CIUDAD UNIVERSITARIA DELEGACION COYDAGAN 04510 MEXICO, D.F.
APARTADO POSTAL 70-213 TEL. 5616-25-76 FAX. 5616-22-17

Voto Aprobatorio

13 de noviembre de 2008.

DR. ISIDRO ÁVILA MARTÍNEZ
Director General de Administración Escolar,
UNAM
PRESENTE

Estimado Dr. Isidro.

Después de haber evaluado la Tesis titulada "Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha" del alumno, **José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz** con número de cuenta 8652437-1 y número de expediente 152973, inscrito en el Doctorado en Ciencias Biomédicas y aspirante al grado de **Doctor en Ciencias***, considero que la Tesis reúne los requisitos suficientes y la acepto para ser presentada en el examen de grado. Por tanto emito mi **VOTO APROBATORIO** al respecto.

Agradezco de antemano la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente,


Dr. Federico Alfredo García Jiménez

Instituto de Química



Voto Aprobatorio

14 de noviembre de 2008

DR. ISIDRO ÁVILA MARTÍNEZ
Director General de Administración Escolar,
UNAM
P R E S E N T E

Estimado Dr. Ávila,

Después de haber evaluado la Tesis titulada "Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha" del alumno, José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz con número de cuenta 8652437-1 y número de expediente 152973, inscrito en el Doctorado en Ciencias Biomédicas y aspirante al grado de Doctor en Ciencias*, considero que la Tesis reúne los requisitos suficientes y la acepto para ser presentada en el examen de grado. Por tanto emito mi VOTO APROBATORIO al respecto.

Agradezco de antemano la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente,



Dr. Miguel Martínez Ramos

Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM

CAMPUS MORELIA

Apartado Postal 27-3 (Santo María de Guido 58090 Morelia, Michoacán)
Antigua carretera a Pátzcuaro 8701
Col. Ex. Hacienda de San José de la Huerta C.P. 58190
Morelia 01(443):Tel. 322 27 04 Fax 322 27 19
México, D.F. 01(55):Tel. 56 23 27 04 Fax 56 23 27 19
www.oikos.unam.mx
Morelia, Michoacán, México



Voto Aprobatorio

14 de noviembre de 2008

DR. ISIDRO ÁVILA MARTÍNEZ
Director General de Administración Escolar,
UNAM
P R E S E N T E

Estimado Dr. Ávila,

Después de haber evaluado la Tesis titulada "Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha" del alumno, José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz con número de cuenta 8652437-1 y número de expediente 152973, inscrito en el Doctorado en Ciencias Biomédicas y aspirante al grado de Doctor en Ciencias*, considero que la Tesis reúne los requisitos suficientes y la acepto para ser presentada en el examen de grado. Por tanto emito mi VOTO APROBATORIO al respecto.

Agradezco de antemano la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente,

Dr. Omar Rati Masera Cerutti

Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM

CAMPUS MORELIA



INSTITUTO
DE ECOLOGIA
UNAM

DEPARTAMENTO DE ECOLOGÍA FUNCIONAL
Laboratorio de Biogeoquímica Terrestre y Clima

Ciudad Universitaria, noviembre 21, 2008

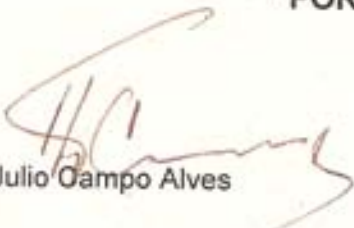
DR. ISIDRO ÁVILA MARTÍNEZ
Director General de Administración Escolar,
UNAM
PRESENTE

Estimado Dr. Avila,

Después de haber evaluado la Tesis titulada **Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha** del alumno, **José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz** con número de cuenta **8652437-1** y número de expediente **152973**, inscrito en el Doctorado en Ciencias Biomédicas y aspirante al grado de **Doctor en Ciencias**, considero que la Tesis reúne los requisitos suficientes y la acepto para ser presentada en el examen de grado. Por tanto emito mi **VOTO APROBATORIO** al respecto.

Agradezco de antemano la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Miembro del jurado



Julio Campo Alves

jcampo@ecologia.unam.mx



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Centro de Investigaciones en Ecosistemas

Voto Aprobatorio

6, mayo, 2008

Ing. Leopoldo Silva Gutiérrez
Director General de Administración Escolar,
UNAM
PRESENTE

Estimado Ing. Silva,

Después de haber evaluado la Tesis titulada "Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha" del alumno, **José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz** con número de cuenta 8652437-1 y número de expediente 152973, inscrito en el Doctorado en Ciencias Biomédicas y aspirante al grado de **Doctor en Ciencias***, considero que la Tesis reúne los requisitos suficientes y la acepto para ser presentada en el examen de grado. Por tanto emito mi **VOTO APROBATORIO** al respecto.

Agradezco de antemano la atención que se sirva prestar a la presente.

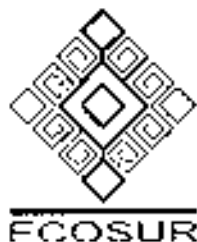
Atentamente,


Dr. Felipe García Oliva

Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM

CAMPUS MORELIA

Apartado Postal 27-3 (Santa Ma. De Guido), 58090, Morelia, Michoacán
Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México, tel. (443) 3 22 27 15, Fax (443) 322 27 19
www.oikos.unam.mx



EL COLEGIO DE LA FRONTERA SUR
UNIDAD VILLAHERMOSA

Voto Aprobatorio

Villahermosa, Tabasco, 15 de julio de 2008

Ing. Leopoldo Silva Gutiérrez
Director General de Administración Escolar,
UNAM
PRESENTE

Estimado Ing. Silva,

Después de haber evaluado la Tesis titulada "**Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha**" del alumno **José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz** con número de cuenta 8652437-1 y número de expediente 152973, inscrito en el Doctorado en Ciencias Biomédicas y aspirante al grado de **Doctor en Ciencias**, considero que la Tesis reúne los requisitos suficientes y la acepto para ser presentada en el examen de grado. Por tanto emito mi **VOTO APROBATORIO** al respecto.

Agradezco de antemano la atención que se sirva prestar a la presente

Atentamente,

Dr. Bernardus Hendricus Jozeph de Jong
Director Unidad Villahermosa, El Colegio de la Frontera Sur



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Centro de Ciencias de la Atmósfera

CIRCUITO EXTERIOR, CIUDAD UNIVERSITARIA

C. P. 04510 MEXICO, D. F., MEXICO

14 agosto 2008

Ing. Leopoldo Silva Gutiérrez
Director General de Administración Escolar,
UNAM
P R E S E N T E

Estimado Ing. Silva,

Después de haber evaluado la Tesis titulada "Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha" del alumno, José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz con número de cuenta 8652437-1 y número de expediente 152973, inscrito en el Doctorado en Ciencias Biomédicas y aspirante al grado de Doctor en Ciencias*, considero que la Tesis reúne los requisitos suficientes y la acepto para ser presentada en el examen de grado. Por tanto emito mi VOTO APROBATORIO al respecto.

Agradezco de antemano la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente,


Dr. Luis Gerardo Ruíz Suárez

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

1. Datos del alumno

Ordóñez
Díaz
José Antonio Benjamín
Tel. (55) 55822462
bordonez@miranda.ecologia.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Ecología
Doctorado en Ciencias
086524371

2. Datos del tutor

Dr.
Masera
Cerutti
Omar Raúl

3. Datos del cotutor

Dr.
de Jong
Bergsma
Bernardus Hendricus Jozeph

4. Datos de la tesis

Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la
Región Purépecha.
140 p
2008

DEDICATORIA

A mi Padre

*vini vidi vici
in memoria*

Por que el ejemplo que me dio
va más allá de la vida misma
y que sólo Dios sabe que me
dio estos padres como la
bendición más grande.

A mi Madre

Quien en todas sus acciones ha
forjado en mí y en mi familia
el coraje, educación, respeto
y sobre todo amor.

A mis hermanos:

**Ale, Marcelo, Charito, Lidi, Cero y José,
Chuy, Tito, Tere, Lula y mi tía Pili.**

Por que son mi orgullo.

A mis sobrinos y primos:

**Gigio, Coquis, Patsy, Miriam,
Chuchis, Alfredo, Jovana, Itzé,
Edith, Aurora, Mariza, Ale, Faby,
Sebastián, Gigi, Adan, Alaín, Carlitos, Didi,
y los que falten.**

A mi hija:

Lisa Fernanda

A la mujer que me ama.

A la mujer que amo.

A todas las personas que me han acompañado en este reto, por su apoyo en las buenas y en las malas, su amistad, confianza, las porras, por sus consejos y gratos recuerdos, Mil gracias!.

De manera muy especial les dedico esta tesis a:

Raúl Ahedo, Erika Tapia, Francisco Aviña, Viky Puentes, Irene Teresa Rodríguez y Julieta Flores, Michelle Hasselbarth, Lilia Tellez-Girón, Maribel Loredó, Solange Sotuyo, Olga Loredó, Mery Santos, Dulce Tovar, Teresa González, Ivonne Ortega, Abraham Cabrera, Irving Fragoso, Hugo Medrano, José Ventura Pérez, Juan Carlos Zamora, Juan Carlos Cedeño, Salvador Ochoa, Manuel González, René Cerritos, Leonel López, Carlos Ramos, Alejandra Acosta, Verónica Acosta, Vicente Salinas, Miguel Salinas, Jorge Rodríguez, Alberto Gómez-Tagle Jr., Sergio Zarate, Oscar, María, Christian, Emanuel y Sharon de la familia Vivanco-Villanueva; Eugenio, Isabel, Ricardo y Bartolomé compañeros de Ecosur Villahermosa; José Luis Navarrete, Jorge Escandón, Jorge Rojas, Adrián Quijada, Laura López, Carlos Ramos, Araceli Samaniego, Yazmín Jarquín, Mónica Alegre, Elvira Durán, Rosa Elvira de la Cruz, Minerva Cruz, Minerva Molina, Juan Velarde, Lizzetthe León, Erika Pérez, Erika López, Cecilia Conde, Liliana Rentería y Carlos Anaya, Noé Montaña, Heberto Ferreira, Miguel Espejel, Rosa Enriquez, Gino Chacón, Nineth Chacón, Eladio Hernández, Elvia Segura, Adrián Saldaña, Samuel Palacio, Selene Andrade, Luz Resendíz; Demetrio Salvador, Mary, Jairo, Dosi, Erika, Diana y Miriam de la familia Alonso-Lorenzo-Graña; Erna López y Manuel Mendoza, Gaby Angeles, Gonzalo Cortés, Janette Rivera, Lulú Domínguez, Martha Bonilla, Mariana Vázquez, Omar Morales, Bertha Domínguez, Michiel van Breugel, Mirjam Dieleman, Alberto Salguero, Willie Makundi, Ed Vine, Fernando Ruíz, Yareni Perroni, Yudi Iskandarsyah, Miguel Ángel Castillo, Liliana Galicia, Ryan Marlin y su esposa Heidi, Patricia Domínguez, José de Jesús Junco, Javier Santillán, Manuel Hernández, Gabriel Montiel Aguirre, Raúl López Recinos, Juan Mendoza, Liliana Sánchez, Mariana Susana Hernández, Sandra Pérez, Carolina Piña, Jaime Santiago Mariscal, Mauricio Galeana, Nirani Corona, David León, Juan Briones, Alejandra Guzmán, Zuelclady Araujo, Roberto Vilchis, Carlos Marcelo Pérez, Fermín de la Rosa, Leonel Iglesias, Ricardo Rivera, José Armando Alanís, Marian Aguirre, Luisa Isabel Gómez Solares y Familia, Susana Gaona Ochoa y Familia, Maryela Malagón, Esmeralda Armenta, Felipe Arreola, Lazaro Gallegos, David Antonioli y su esposa Gaby.

A José Garza Caligaris[†] y José Luis Jiménez[†]

[†]In memoria

A mis maestros

Carlos Gay, Tomás Hernández, Ben de Jong, Omar Masera, Georgina Pérez, Vicente Turrubiarte, Susana Gaona, Martha Mercado, Marcelino Ordóñez Sánchez y Lydia Díaz Arias.

A mis alumnos

Agradecimientos institucionales

En primera instancia agradezco a mis padres, hermanos y mi pequeña familia, por que siempre me han apoyado en todo.

A mi director de tesis Dr. Omar Maserá, a mi codirector de tesis Dr. Ben de Jong, a mis tutores Dr. Felipe García-Oliva, Dr. Luís Gerardo Ruiz Suárez y Dr. Carlos Gay, por dirigir esta tesis con tanto profesionalismo.

A los investigadores que integraron el subcomité del examen de candidatura y el comité de exámen doctoral: Dr. Rodolfo Dirzo, Dr. Felipe García Oliva, Dr. Julio Campo Alves, Dr. Miguel Martínez Ramos, Dra. Rosa Irma Trejo Vázquez, Dr. Valentino Sorani Dalbón, Dra. Lourdes Villers Ruiz y Dr. Federico García; ya que gracias a los pertinentes y acertados comentarios concluimos el presente trabajo de investigación.

Agradezco el apoyo recibido durante el desarrollo de éste trabajo de investigación, de manera particular a: Dra. Claudia Sheinbaum Pardo, Dr. Víctor Jaramillo, Dra. María de Jesús Ordóñez, Dra. Irene Teresa Rodríguez, Dra. Susana Gaona Ochoa, Dr. Sergio Franco, Dra. Xochitl Estrada Flores, Dr. Daniel Piñero, Dr. Daniel Klooster, Dr. Jorge Etchevers, Dra Lourdes de la Isla de Bauer, Dr. Tomás Hernández, Dra. Marta Astier, Dr. Willie Makundi, Dr. Ed Vine, Dr. Jayant Sathaye, Dr. Héctor Benavides, Ing. Pablo Irving Fragoso López, Biól. Francisco Luis Aviña, Ing. Hugo Medrano, Ing. José Ventura Pérez Camargo, Ing. Juan Carlos Zamora Collazo, M en C. Erika Tapia, Jaime Santiago, Geog. Mauricio Galeana, David León, Carlos Marcelo Pérez, Yair Puente, Zuelclady Araujo, Vanessa Sepúlveda, Teresa Arredondo, Oscar Aguado, Jaime Navia y Juan Velarde, Zenaida Estrella, Dr. Javier Madrigal, Dr. Jerzy Rzedowski, Dr. Sergio Zamudio, Dra. Irama Nuñez, Dra Ana Rosa Barahona Echeverría, Dr. César Carrillo Trueba, Laura González, M en C Arturo Carrillo y Dr. Edmundo López.

Agradezco el apoyo de Martín Gutiérrez Lacayo, Cecilia Simón, Jorge Rojas, Adrián Quijadas, Mercedes Otegui, Jaime Rojo, Ana Celia Tejeda, Francisco Torres, Alejandra y Daniela Salazar, Margarita González, Tere Romero, Iliana Salazar, Lázaro Gallegos, Martha Ángeles, Blanca Huerta, Rosalía Báez, Edgar López, Antonio Burgos, Ángel Fernández, Sergio Roldán, Luz María de la Fuente e Ing. Guillermo Barroso.

A Raúl Ahedo, Maribel Nava, René Martínez, Heberto Ferreira, Miguel Espejel, José de Jesús Junco, Gabriela Guerrero Pacheco, Alejandro Flamenco, Manuel Hernández y Luci Mora, por el apoyo recibido de cada una de sus especialidades, ¡mil gracias!

Al apoyo recibido en la Facultad de Ciencias por parte del Dr. Zenón Cano, Marina Melgarejo Damián, Palmira Arnaz Duran, Clara Fernández Lara, Yukiko Ma. Antonieta Sakurai Kiyono, Claudia Abad Ibarra, María Elena Martínez, Leticia Zid, Dra. Nora Galindo, Carmen Monroy, Adriana Sánchez, Socorro Guerrero, Juan Uribe, Victoria Parra, Hogla De la Rosa, Cintia Reza y Antonio Pizarro.

Al INIFAP, CENID-COMEF y en particular al Dr. Fabián Islas Gutiérrez, Verónica Luna, Elizabeth Olguín, Daniel Ramírez, Abigail Colin, Ramón Noguez, Margarita Muñoz, Malena Garín; a mis compañeros investigadores Gustavo Cruz, Efraín Velasco, Antonio González, Carlos Mallén, Martín Romero, Georgel Moctezuma, Antonio González, Francisco Moreno, Cecilia Nieto y Patricia Olvera.

A todo el personal administrativo y académico del Instituto de Ecología que siempre me han apoyado para la realización y consecución de todos y cada uno de los proyectos, Patricia Martínez, Carolina Espinoza, Reyna Retis, Soledad Sánchez, Virgilio Lara, Ernesto Arias, Alicia Cervantes, Gloria Guerrero y Consuelo Barrientos.

Del Instituto Nacional de Ecología agradezco sinceramente el apoyo al Dr. Adrián Fernández, Biól. Julia Matínez, Ing. Aquileo Guzmán, Ing. Luis Conde, M en C. Israel Laguna, Lic. Manuel Estrada y Lic. Maritza Ojeda.

De la Comisión Nacional Forestal agradezco a Biól. José Cibrián Tovar, M en C. Leonel Iglesias, Dr. Ricardo Rivera, M en C. José Armando Alanís e Ing. Salvador Juárez.

A la Unidad de Convenios Internacionales Técnico Científico, México Guatemala, en particular a la Lic. Mónica Barajas y por parte de Guatemala al Ing. Israel Cifuentes, Ing. Guillermo Menegazzo, Ing. Raúl López, Ing. Sergio Alonzo y demás ingenieros forestales.

A Pronatura México, A.C., Servicios Ambientales de Oaxaca, A.C., Gira, A.C., Asociación de Organizaciones de los Cuchumatanes, Proyecto de Manejo Sostenible de los Recursos Naturales en la Sierra de los Cuchumatanes

Este estudio fué financiado por:

a) El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, proyecto 32715-N;

Y recibió apoyos por parte de:

b) Proyecto UNAM: 20993-1498-5-XI-07; INE: INE/A1-055/2007,

c) Proyecto SEP-2003-C02-44766

d) Beca de la Facultad de Ciencias a profesores de asignatura;

e) Instituto Nacional de Ecología,

f) Pronatura México, A.C., y

g) La Comisión Nacional Forestal.

CONTENIDO

Prefacio	i
Capítulo I	
Los ecosistemas forestales y el cambio climático en México	1
Capítulo II	
La captura de carbono ante el cambio climático	33
Capítulo III	
Almacenamiento de carbono en los bosques de Nuevo San Juan: Aplicación del modelo dinámico CO ₂ Fix en un bosque de <i>Pinus pseudostrobus</i> en Michoacán, México	48
Capítulo IV	
Como entender: el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales	78
Capítulo V	
Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico	90
Capítulo VI	
Árboles para reciclar carbono: La guerra contra el calentamiento global	119
Capítulo VII	
Síntesis y perspectiva	125

PREFACIO

Las actividades humanas, tales como el uso de combustibles fósiles para la producción de energía y los procesos derivados del cambio en el uso del suelo, están generando grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como dióxido de carbono (CO₂), clorofluorocarbonados (CFC's), óxidos de nitrógeno (NO_x), y metano (CH₄), principalmente.

En particular, los procesos de cambio de uso del suelo promueven la disminución de los contenidos de carbono (C) almacenados en los ecosistemas, tanto en biomasa aérea, mantillo, raíces y suelo. Existen sin embargo grandes interrogantes tanto en la cantidad específica de C almacenado como en la dinámica de pérdida del mismo en estos ecosistemas.

El presente estudio tiene como objetivo general estimar las emisiones de carbono derivadas de la dinámica del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en la Región Purépecha en Michoacán, México. Se tienen tres objetivos particulares: 1.- Cuantificar el contenido de carbono en mantillo, suelo y biomasa aérea de las clases de cobertura vegetal y uso del suelo seleccionadas en el área de estudio; 2.- Estimar el cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo en la región de estudio, para el periodo comprendido entre los años 1986 y 2000; y 3.- Estimar los cambios de los contenidos de C de los principales almacenes por clase de cobertura vegetal y uso del suelo, asociados a los procesos de cambio en el uso del suelo a nivel regional en el periodo de estudio y, se busca contribuir en: a) la generación de nuevo conocimiento e hipótesis sobre contenido y emisiones de carbono en ecosistemas forestales; b) desarrollo de una metodología que permita cuantificar el contenido de carbono de los diferentes almacenes de los ecosistemas; c) un análisis detallado de la dinámica de emisiones y captura de carbono asociada a los procesos de cambio de uso del suelo en la región Purépecha y d) la aportación de elementos para determinar una línea base de emisiones a nivel regional.

El capítulo I presenta una revisión del estado que guardan los ecosistemas forestales y su relación con el cambio climático en México, definiendo los conceptos intrínsecos del presente estudio. El segunda Capítulo, trata el concepto de captura de carbono ante el cambio climático, desarrollándolo en expresiones matemáticas *ad hoc*, siendo la parte conceptual y medular que señala la forma de abordar la investigación de la presente tesis; el tercer capítulo, contiene un

estudio de caso dirigido a conocer la cantidad de carbono almacenado en los bosques de Nuevo San Juan, aplicando un modelo de simulación dinámica llamado CO₂fix, tomando como base de la simulación al *Pinus pseudostrabus*, a fin de conocer los alcances y limitaciones de este modelo.

En el cuarto capítulo, esta enfocado en como entender los conceptos de: el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales, porque tiene que ver con el desarrollo de la línea de base para proyectos dirigidos a la mitigación de las emisiones de carbono, vía captura de carbono por ecosistemas forestales. El quinto capítulo es el tema central de la tesis, se presenta tal y como fue aceptado en la revista *Forest Ecology and Management*; cabe señalar que los objetivos planteados como tema de investigación, fueron resueltos uno por uno y están contenidos en este capítulo. El último capítulo, es un ensayo titulado: Árboles para reciclar carbono: La guerra contra el calentamiento global; se desarrollo en un lenguaje ciudadano para publicarse en una revista de divulgación, que antecede a la apertura del mercado voluntario de certificados de captura de carbono derivados de proyectos forestales en México y que, se presenta simultáneamente con el primer concierto que decide neutralizar las emisiones de gases de efecto invernadero que genera por el uso de combustibles fósiles para la producción energía. La estructura en su conjunto, parte de un marco conceptual acotado, se aplica estrictamente el método científico, con herramientas de aplicaciones del sistema de información geográfica, estadística, base de datos, muchas horas de trabajo en laboratorio, aplicación del conocimiento en comunidades con pobreza y pobreza extrema y cerramos el tema con la entrega de 150 mil dólares por la venta del servicio ambiental captura de carbono en 10 comunidades en el Estado de Oaxaca.

Fue parte del proyecto CONACYT 32715-N, titulado: "Dinámica de emisiones de carbono a nivel regional, en un ecosistema templado del centro de México".

Capítulo I

Los ecosistemas forestales y el cambio climático en México¹

¹Aceptado para publicarse en el libro: “La Historia y la Filosofía de la Ciencia y su Relación con la Enseñanza de la Biología en la Educación Básica”. En prensa. Proyecto Clave: SEP-2003-C02-44766
Autora del Libro: Dra Ana Rosa Barahona Echeverría

Los ecosistemas forestales y el cambio climático en México¹

Introducción

La preocupación por los problemas ambientales que se viven hoy en día, abarcan diferentes lugares y regiones hasta llegar a ser problemas mundiales, y esto, no es un asunto nuevo, sus consecuencias que antes parecían ser predicciones fatalistas, son ahora situaciones reales a las que nos enfrentamos y que tenemos que resolver de manera urgente e integral, como por ejemplo la contaminación del aire, agua y tierra, la erosión, el uso excesivo de combustibles fósiles, los incendios forestales y la deforestación, estas actividades de manera directa o indirecta, afectan a todos y cada uno de los ecosistemas y en particular a los forestales, acentuando procesos como el cambio climático global.

Cambio climático y efecto invernadero

El cambio climático, se define como el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición química de la atmósfera, da lugar al aumento de la temperatura que ocurre en la atmósfera en todo el planeta y que se suma a la variabilidad natural del clima, este fenómeno, representa el problema ambiental más grave que enfrenta la humanidad en el presente siglo y es derivado del incremento en las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) provenientes de dos principales fuentes: a) el consumo de combustibles fósiles y b) de procesos como la deforestación e incendios forestales; los GEI, se acumulan en la atmósfera dando lugar al efecto invernadero.

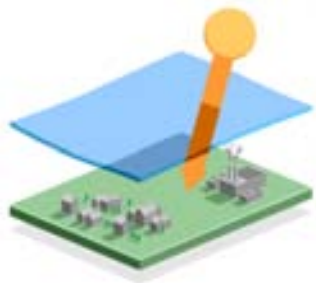
¹ Aceptado para publicarse en el libro: "La Historia y la Filosofía de la Ciencia y su Relación con la Enseñanza de la Biología en la Educación Básica". En prensa. Proyecto Clave: SEP-2003-C02-44766.
Autora del Libro: Dra Ana Rosa Barahona Echeverría

El efecto invernadero (Figura 1) se debe a que ciertos gases en la atmósfera permiten que la mayor parte de la radiación solar incidente penetre hasta la superficie del planeta,

1. El vapor de agua, el CO_2 y el CH_4 forman una capa natural en la atmósfera terrestre que retiene parte de la energía proveniente del Sol. El uso de combustibles fósiles y la deforestación ha provocado el aumento de las concentraciones de dichos gases (CO_2 , vapor de agua y CH_4), además de otros gases, como el óxido nítrico, mismos que aumentan el efecto invernadero.



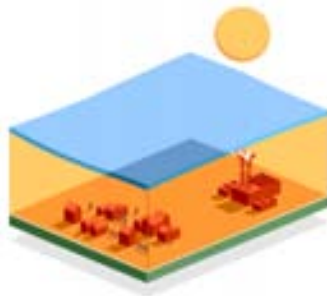
2. La superficie de la Tierra es calentada por el Sol. Pero ésta no absorbe toda la energía que de él proviene, sino que, refleja parte de ella de vuelta hacia la atmósfera.



3. Alrededor del 70% de la energía solar que llega a la superficie de la Tierra, es absorbida por la misma y el 30% restante, es reflejado por la tierra y la atmósfera. Pero parte de la radiación infrarroja es retenida por los gases que producen el efecto invernadero y vuelve a la superficie terrestre.



4. Como resultado del efecto invernadero, la Tierra se mantiene lo suficientemente caliente como para permitir la vida sobre el planeta. De no existir el fenómeno, las fluctuaciones climáticas serían intolerables. Sin embargo, una pequeña variación en el delicado balance de la temperatura global puede acentuar fenómenos naturales como: huracanes, granizadas, tornados, inundaciones, deslizamientos de suelo, lluvias torrenciales, migraciones, entre las principales.



Fuente: BBC de Londres, 2005

planeta, mientras que absorben y reemiten parte de la radiación infrarroja que el planeta emite de regreso al espacio exterior. Cuanto mayor es la concentración de los gases de invernadero, menor es la cantidad de radiación infrarroja que el planeta emite libremente al espacio exterior. De esta manera, al aumentar la concentración de gases de invernadero, se incrementa la cantidad de calor atrapado en la atmósfera, dando origen a que se eleve la temperatura superficial del planeta.

Figura 1. El efecto invernadero.

Gases de efecto invernadero

Los gases que incrementan el efecto invernadero de acuerdo con diferentes autores (Schneider, 1989; Houghton y Woodwell, 1989; Goudie, 1990; Dixon *et al.*, 1994 e IPCC, 2001) y que son reconocidos por el Protocolo de Kyoto² son el bióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), los derivados fluorados del metano y etano (HFC), los perfluorocarburos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF₆) (en Ordóñez *et al.*, 2001). Estos gases provienen de diferentes fuentes que pueden ser naturales o de origen humano (antropogénicas), en el cuadro 1, se proporciona información sobre los principales GEI, la fuente antropogénica que los genera, la concentración actual estimada en el planeta, la concentración que alcanzó en la era preindustrial y el tiempo de permanencia (residencia) en la atmósfera (IPCC, 2001).

Cuadro 1. Características de los principales gases de efecto invernadero (IPCC, 2001).

Gas	Fuentes antropogénicas	Concentración (ppb)		Incremento anual de la concentración	Tiempo de residencia en la atmósfera (años)
		Preindustrial	Actual		
CO ₂	Uso de combustibles fósiles y leña, deforestación	275,000	353,000	0.5%	50-200
CH ₄	Cultivo de arroz, ganado, tiraderos de basura, uso de combustibles fósiles	800	1,720	0.9%	10
N ₂ O	Fertilizantes químicos, deforestación, uso de leña	285	310	0.2%	150-180
CFC	Aerosoles, refrigerantes, aislantes	0	3	5.0%	65-130

² En la Ciudad de Kyoto en Japón en 1997, se elaboró el marco legal bajo el cual todos los países adscritos a la Convención Marco del Cambio Climático se comprometieron a reducir las emisiones que contribuyan al calentamiento global, mediante normas y procedimientos que en su conjunto son conocidos como el Protocolo de Kyoto

Ciclo del carbono

Para comprender la dinámica de acumulación e intercambio de GEI entre los componentes del sistema planetario como la atmósfera, la biosfera, la litosfera y la hidrosfera, es indispensable comprender el funcionamiento del ciclo global del carbono, identificando sus fuentes, flujos y almacenes. En los ecosistemas terrestres, los bosques representan importantes reservorios de carbono (C), dentro de ellos se puede identificar a la vegetación y a los suelos como los depósitos (o almacenes) más significativos de este elemento químico. Los cambios en el uso del suelo que están transformando estos ecosistemas, modifican su papel dentro de la dinámica del carbono; por lo tanto, es necesario caracterizarlos y cuantificar los contenidos de carbono orgánico en estos almacenes.

El carbono es el cuarto elemento de mayor abundancia en el universo y es absolutamente esencial para la vida que se desarrolla en nuestro planeta. En realidad, el carbono constituye la definición propia de la vida y su presencia o ausencia ayuda a definir si una molécula es considerada orgánica o inorgánica (Harrison, 2003).

El carbono se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza: en el agua en forma de carbonatos disueltos, en el aire como dióxido de carbono ó anhídrido carbónico (CO₂) y en la tierra formando parte de las rocas calizas (Harrison, 2003).

Todos los organismos vivos están constituidos por compuestos de carbono, que se obtienen como resultado de la fotosíntesis y los procesos metabólicos realizados durante su desarrollo, mismos que son liberados cuando éstos mueren; aproximadamente, el 50% del peso seco de cualquier organismo lo constituye este elemento (Smith *et al.*, 1993).

El movimiento del C en las diferentes capas que forman la Tierra como la atmósfera, los océanos, la biosfera y la pedósfera, está descrito en el ciclo del carbono (Figura 2). Este ciclo, consiste de varias fuentes y sumideros de almacenamiento de C y los procesos (naturales y antrópicos) por los cuales varias de estas fuentes y sumideros intercambian C (las flechas y los números en la Figura 2, señalan las fuentes y sumideros). Si la cantidad de carbono que se emite de una fuente es mayor de la que se captura, entonces el proceso estará considerado un emisor neto de C; pero si la cantidad de carbono que se emite es menor de la que se almacena, entonces se estará considerado una sumidero neto de C (Ordóñez, 1999).

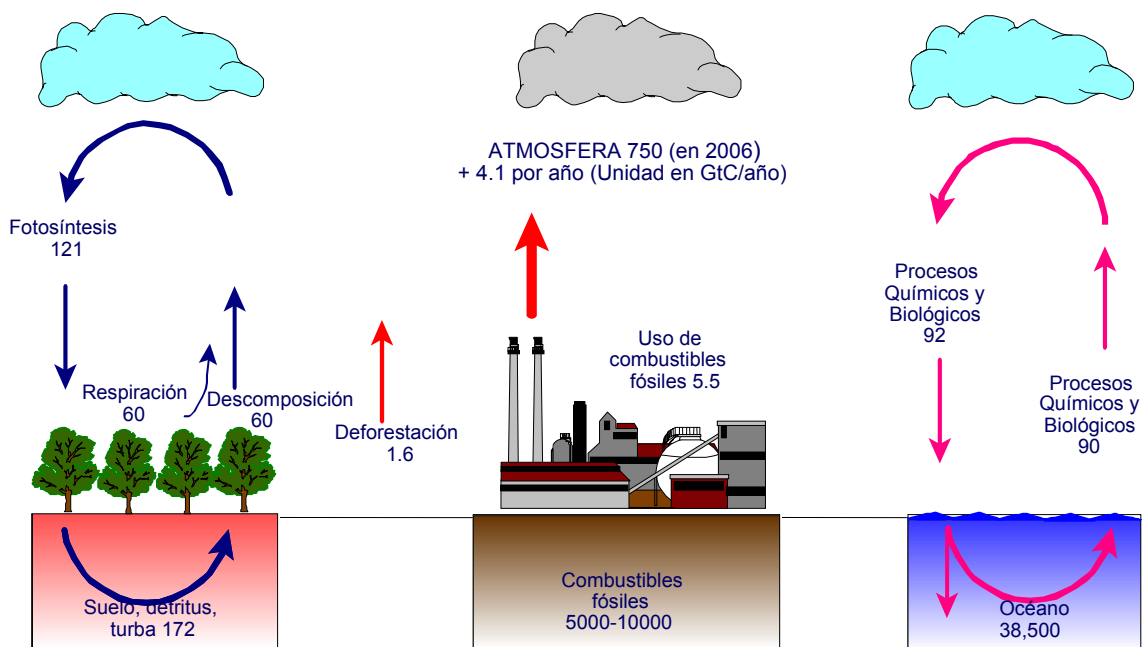


Figura 2. Fuentes y sumideros de carbono, las unidades están expresadas en Gigatoneladas (1Gt = 1x10⁹ Toneladas) de carbono. Fuente: Ordóñez, 1999.

El ciclo global del carbono, es uno de los ciclos biogeoquímicos más importantes y puede ser dividido como su nombre lo dice en componentes geológicos y biológicos. El ciclo del carbono geológico funciona en una escala temporal de millones de años,

mientras que el ciclo biológico funciona en una escala temporal más corta (Harrison, 2003).

El ciclo del carbono comienza con la fijación del CO₂ atmosférico a través de organismos fotosintetizadores. En este proceso el CO₂ y el agua reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno en forma simultánea que pasan a la atmósfera. Parte de los carbohidratos se consumen directamente para suministrar energía al organismo y el CO₂ producto del metabolismo se libera a través de las hojas o raíces. Otra parte es consumida por los animales, que también liberan CO₂ en su respiración. Las plantas y los animales mueren y son finalmente descompuestos por microorganismos del suelo, lo que da como resultado que el carbono de sus tejidos se transforme en CO₂ y CH₄ y regrese a la atmósfera (Schimel, 1995; Smith *et al.*, 1993).

La fijación de carbono por bacterias, es otra manera de capturar el CO₂ de la atmósfera, aunque cuantitativamente menos importante que la fijación de carbono por las plantas. Cuando los organismos vegetales son comprimidos por deposición, no son atacados por las bacterias, sino que suceden una serie de cambios químicos para formar turba, luego carbono pardo o lignita y finalmente carbono. Los cuerpos de algunos organismos marinos pueden tener cambios semejantes y formar a largo plazo petróleo. (Ordóñez, 1999).

En el océano, algunos organismos del fitoplancton y los corales usan carbono para producir exoesqueletos de carbonato de calcio (CaCO₃), los cuales se sedimentan en el fondo del océano formando lodos cuando muere el mismo organismo, estos pueden comprimirse a medida que pasa el tiempo y eventualmente se transforman en roca caliza. La materia orgánica excluyendo al carbonato de calcio, es la que se puede transformar en compuestos como el petróleo (Harrison, 2003).

Como se mencionó anteriormente, el CO₂ atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. Este gas participa en la composición

de todas las estructuras necesarias (como los tallos, troncos, hojas, flores, ramas y raíces) para que ellas puedan desarrollarse y al crecer, incrementan su biomasa (Ordóñez, 1999).

Durante el tiempo en que el CO₂ se encuentra constituyendo alguna estructura de la biomasa de un árbol por ejemplo y hasta que es enviado al suelo o a la atmósfera, se considera almacenado (Figura 2). En el momento de su liberación, ya sea por la descomposición de la materia orgánica o por la combustión de la biomasa, el CO₂ fluye para regresar al ciclo biológico del carbono (Ordóñez, 1999).

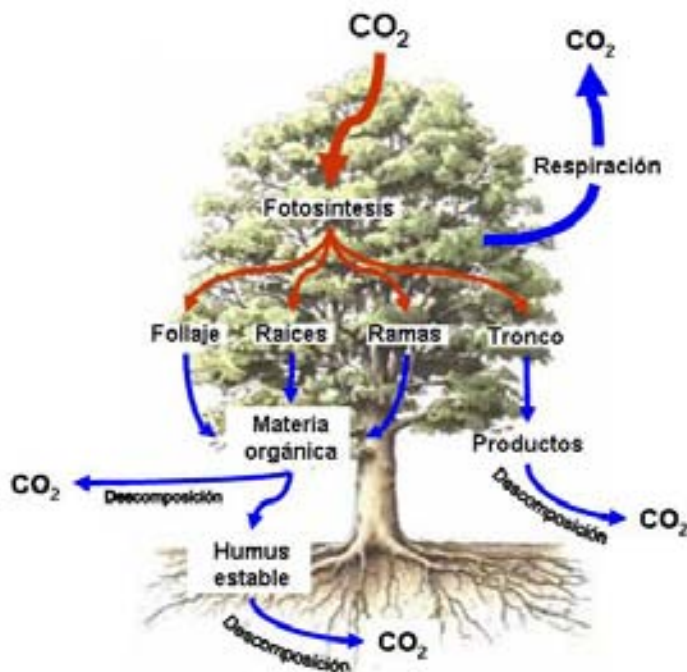


Figura 2. Flujos de CO₂ y almacenes de carbono en un ecosistema forestal. Fuente: Ordóñez, 1999; diseño Samuel Palacios.

La superficie forestal estimada en la Tierra es de 4.1×10^9 ha, donde las áreas naturales protegidas abarcan el 2.3%, menos del 10% de las áreas que se encuentran bajo manejo. Aproximadamente el 37% de carbono se encuentra en latitudes bajas (de 0° a 25° de latitud), 14% en las medias (de 25° a 50° de latitud) y 49% en las altas (de 50° a 75° de latitud). Es por esto que Dixon y sus colaboradores en 1994, afirman que la proporción de carbono capturado por la vegetación y suelo difiere en cuanto a su ubicación geográfica respecto de su latitud y señalan que aproximadamente dos

terceras partes del carbono en ecosistemas forestales se encuentran contenidas en el suelo.

Los biomas boreales³ circumpolares tienen una cobertura de 2×10^9 ha en el hemisferio norte y contienen 800 GtC en reservas de carbono contenido en la biomasa, detritus, suelo y turba. En los ecosistemas forestales boreales, la biomasa, el detritus, la turba (con 419 GtC) y el suelo (con 290 GtC) contienen en su totalidad 709 GtC (Apps *et al.*, 1993). Los bosques tropicales almacenan en la vegetación y el suelo 159 GtC y 216 GtC respectivamente, para un total de 375 GtC (Brown *et al.*, 1993; Ordóñez, 1999).

Los árboles en particular, almacenan grandes cantidades de carbono durante toda su vida. Los bosques del mundo capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo (Apps *et al.*, 1993; Brown *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994; Ordóñez, 1999).

Los principales almacenes de C en los ecosistemas forestales son la vegetación, el mantillo y el suelo. La vegetación es la encargada de incorporar el C atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis. Los bosques del mundo (templados y tropicales) capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo (Apps *et al.*, 1993; Brown *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994). De igual manera, el suelo desempeña un papel muy importante en el ciclaje y almacén del carbono en estos ecosistemas. Como ejemplos de la influencia global de los procesos del suelo están los productos de la desnitrificación, tales como N_2O , N_2 , así como los producidos por la descomposición de la materia orgánica del suelo, como el CO_2 , CH_4 y otros gases asociados al ciclo del C (Melillo *et al.*, 1989; Mosier *et al.*, 1991). El suelo tiene una gran capacidad de "capturar" C (Post *et al.*, 1990; Johnson, 1992), ya que puede acumularlo por miles de años (Schlesinger, 1990).

3 Son bosques perennes de coníferas que se ubican en la región norte de América, Asia y Europa

Desde la perspectiva de la vegetación

En los ecosistemas terrestres, la vía más importante del flujo de carbono (C) atmosférico a la vegetación y el suelo debe ser biológica, por medio de la fotosíntesis y la descomposición, respectivamente (Figura 1). La incorporación de C al ciclo biológico se da por medio de la fotosíntesis⁴, la cual produce energía bioquímica para los procesos fisiológicos y de formación de materia biológica (biomasa) a partir del CO₂, energía radiante y nutrientes; este flujo de materiales involucra muchos procesos interactuantes, los cuales mantienen el equilibrio dinámico del intercambio de gases entre la atmósfera, las plantas y el suelo (Oliva y García-Oliva, 1998).

La Figura 3, representa la productividad primaria derivada de la fotosíntesis neta, así como los flujos (Rh y Ra) y almacenes de carbono en un ecosistema forestal, donde el follaje, las ramas, las raíces, el tronco, los desechos, el humus estable y los productos que se obtengan del bosque son almacenes de carbono, mismos que se reincorporarán al ciclo por descomposición y/o quema de la biomasa forestal.

Flujo de nutrientes en ecosistemas forestales

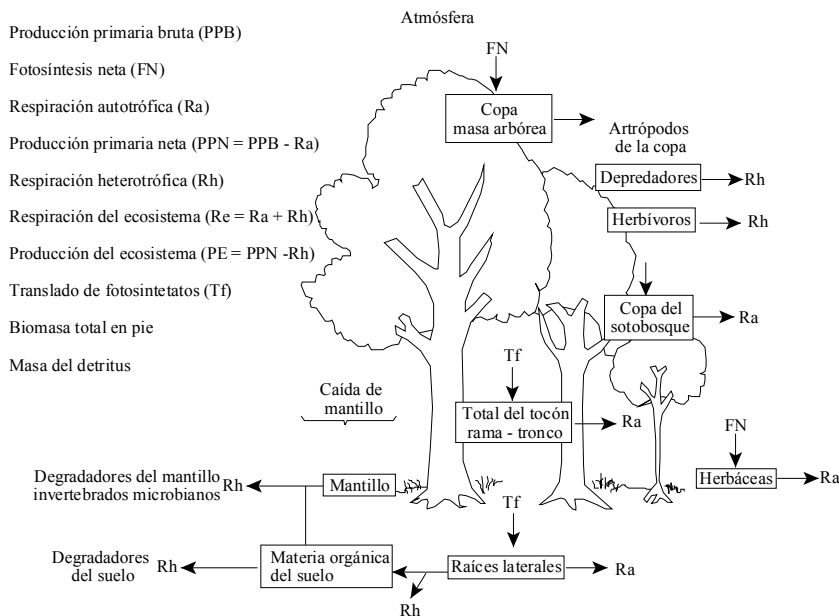


Figura 3. Productividad primaria derivada de la fotosíntesis y flujo de nutrientes en los ecosistemas forestales.

4 La actividad fotosintética, se denomina también como productividad primaria y se expresa en términos de toneladas de materia orgánica o toneladas de biomasa (Salisbury y Ross, 1994)

El proceso comienza cuando el CO₂ es tomado directamente de la atmósfera y asimilado por las plantas a través de la fotosíntesis; dicho proceso se conoce como fotosíntesis gruesa. A la fotosíntesis gruesa después de la respiración, se le conoce como fotosíntesis neta, que representa la cantidad neta de C que entra al ciclo biológico. La tasa neta de fotosíntesis depende de las características fisiológicas de las especies que la realizan y de la disponibilidad de los otros recursos necesarios para llevarla a cabo (e.g., nutrientes, radiación, agua, entre otros). Por ello, la tasa neta de fotosíntesis depende de factores inherentes tanto a las plantas (fisiología de cada especie) como a los otros componentes del ecosistema (e.g., suelo). De lo anterior podemos concluir que las distintas especies vegetales (composición específica) presentes en un ecosistema son uno de los mecanismos que controlan el flujo del C en el sistema atmósfera - planta - suelo, ya que cada especie tiene una eficiencia fotosintética característica. La modificación de la composición específica puede afectar la eficiencia fotosintética neta del ecosistema y, por lo tanto, la cantidad de C que es incorporado al ciclo biológico (ver Figura 1). Pero no todo el CO₂ asimilado es transformado a biomasa, sino que una parte es regresado a la atmósfera por medio de la respiración que se lleva a cabo durante los procesos fisiológicos (Oliva y García-Oliva, 1998).

El carbono fijado por las plantas se transforma en moléculas móviles, que se asignan a las diferentes estructuras de la planta para satisfacer sus demandas fisiológicas y estructurales. Esta asignación determina las rutas por las cuales se dará posteriormente el flujo de C al suelo. Cada especie de planta asignará más o menos C para producir biomasa en la parte aérea o en la parte subterránea. Por ejemplo, la biomasa subterránea en la selva estacional representa entre 40 y 50% de la biomasa total, mientras que en bosque templado y en el bosque tropical, la biomasa subterránea representa menos del 15% (Castellanos, 1991).

La incorporación de C al suelo en los ecosistemas naturales es por dos vías principales: por el mantillo (capa superficial de materia vegetal) y por la biomasa radicular aunada a su velocidad de descomposición.

Las características principales que determinan la descomposición del mantillo son:

- 1- La complejidad de las moléculas orgánicas (llamadas polímeros) que forman el material vegetal, que está muy relacionado con la energía necesaria que requieren las poblaciones microbianas para su descomposición;
- 2- La forma de las uniones bioquímicas que tienen estas moléculas; y
- 3- Su contenido de nutrientes.

Una parte importante del ciclo del C es la biodegradación de polímeros de origen vegetal por medio de las poblaciones microbianas. Las plantas son la principal fuente de C orgánico en el suelo y los microorganismos son los principales responsables de la degradación de polímeros estructurales (Oliva y García-Oliva, 1998).

El resultado de la actividad microbiana es una transformación de C, que puede consistir en:

- 1- Reintroducción a la atmósfera como CO₂, resultado de la respiración microbiana;
- 2- Formación de compuestos orgánicos más sencillos, fácilmente aprovechables por otras poblaciones microbianas;
- 3- Producción de biomasa y compuestos microbianos, tales como enzimas; y
- 4- Formación de material húmico estable por medio de uniones con compuestos inorgánicos del suelo.

Algunos de las moléculas orgánicas (polímeros) son reciclados mediante la degradación microbiana en el suelo, llevan el nombre común de celulosa, hemicelulosa y lignina de este material aunado a las condiciones de temperatura y humedad va a depender la presencia de las poblaciones microbianas del suelo y de las características del material vegetal (Oliva y García-Oliva, 1998).

Cuando el material llega al suelo, primero van a ser descompuestas las formas más sencillas (e.g., carbohidratos) aumentando la actividad microbiana y posteriormente serán degradados los compuestos más complejos con una menor velocidad y actividad

microbiana. Esto sugiere que la entrada de C nuevo al mantillo y al suelo es muy importante para mantener activas a las poblaciones microbianas. Esta incorporación de C nuevo es por medio de la vegetación, por lo que la producción y la fenología son otros mecanismos que controlan el flujo de C atmósfera - planta - suelo (Oliva y García-Oliva, 1998).

Asimismo, el suelo desempeña un papel muy importante en el ciclaje y almacén del carbono en estos ecosistemas. Como ejemplos de la influencia global de los procesos del suelo están los productos de la desnitrificación, tales como N_2O , N_2 , así como los producidos por la descomposición de la materia orgánica del suelo, como el CO_2 , CH_4 y otros gases asociados al ciclo del C (Melillo *et al.*, 1989; Mosier *et al.*, 1991).

El suelo tiene una gran capacidad de capturar C (Post *et al.*, 1990; Johnson, 1992), ya que puede acumularlo por miles de años (Schlesinger, 1990), y además representa el almacén de C más importante en los ecosistemas terrestres. Una vez que se descompone el material vegetal, puede pasar a las distintas formas del carbono del suelo (Tate, 1992). La capacidad de estabilización del C en el suelo depende directamente de la estructura física de éste y, por lo tanto, es otro factor que controla el flujo de C en el sistema atmósfera - planta - suelo. Recientemente se ha desarrollado la teoría sobre la importancia que tienen los agregados del suelo en favorecer esta estabilización.

Los agregados estables del suelo están formados por la unión de arcillas, compuestos orgánicos y metales polivalentes. La presencia de estos agregados reduce la tasa de descomposición de las formas lábiles, protege a las poblaciones microbianas de ser consumidas por los depredadores y reduce la posibilidad de que compuestos no - húmicos sean lixiviados por el agua en el suelo (Elliot, 1986). Estos efectos en las formas del C se deben básicamente a la protección física que proporcionan los agregados. Debido a lo anterior, los macroagregados (mayores a $250 \mu m$) presentan mayor cantidad de C, biomasa microbiana, N y P que los microagregados (menores a

250 μm ; Tisdall y Oades, 1982; Elliot, 1986; Gupta y Germida, 1988). Por ello, la naturaleza, composición y susceptibilidad a la descomposición de la materia orgánica asociada a los macro y microagregados es diferente en cada tipo de suelo (Oliva y García-Oliva, 1998).

Sin embargo, una vez que el bosque ha alcanzado su madurez, llega a un balance entre los procesos de respiración, oxidación y fotosintético, por lo que la captura neta de carbono se reduce. A largo plazo, el carbono capturado tanto en los ecosistemas forestales como en los sistemas agroforestales puede alcanzar entre 80 y 350 Megagramo de carbono por hectárea (Mg C/ha; Ordóñez, 1999). Por lo tanto, los bosques tienen un papel muy activo en el intercambio de CO_2 entre la biosfera y la atmósfera, siendo esto un elemento clave en el ciclo global del carbono (Ordóñez *et al.*, 2001).

El bosque

Ahora bien, de forma común se asocia el término *bosque* (ya sean templados o tropicales) a un conjunto de árboles que ocupa grandes extensiones de terreno (en la Ley Forestal de México, se dice que bosque es un área con al menos el 30% de cobertura por árboles; mientras que otros países consideran el 10% y esto depende directamente de la definición que se pretenda usar); generalmente se componen de áreas cubiertas con vegetación (en los bosques templados generalmente se pueden identificar y delimitar la superficie que ocupa el conjunto de árboles en un lugar determinado y el conjunto recibe el nombre de "rodal", pero no sucede así en los bosques tropicales) que se diferencian de otras áreas boscosas por su composición (se refiere a las especies de árboles que están presentes en el bosque), edad o estado.

Se puede decir que el bosque es homogéneo cuando el 80% o más de los árboles que lo conforman pertenecen a una misma especie y se dice que es heterogéneo cuando está formado de varias especies forestales; en cuanto a su edad se refiere, se dice que

es coetáneo cuando los árboles son de edades próximas y multietáneo cuando los árboles presentes tienen diferentes edades (Grijpma, 1990).

La estructura y composición de las comunidades forestales nos permite observar que generalmente, los diferentes tipos de comunidades forestales no se encuentran separadas abruptamente unas de otras, sino que, por el contrario, se ordenan a lo largo de un continuo en gradientes definidos (Figura 3) por los factores ambientales⁵ o sociales, traslapándose entre sí con límites que no son precisos y que frecuentemente constituyen comunidades ecotonales o de transición y por lo tanto, podrá ser frecuente o común que las áreas que ocupan los bosques de diferente extensión se encuentren en una etapa sucesional que los haga parecer distintos a las comunidades características o predominantes de una región determinada.



Figura 3. Continuo de gradientes de vegetación.

Respecto a la dinámica de comunidades, diversos autores (Piñero, 1979; Martínez-Ramos & Álvarez-Buylla, 1995; Reich & Davis, 1998; Dale, 1999; Salinas, 2002) afirman que los factores bióticos y abióticos son los principales causantes de la estructura,

⁵ Que afectan además la dinámica de las poblaciones así como su distribución y abundancia, despertando grandes intereses en describir cuáles son los patrones en la distribución espacial de las poblaciones vegetales desde los años 20 (Crawley, 1998; en Salinas, 2002).

composición y dinámica misma de las poblaciones que las conforman, esto ha dado lugar a la formulación de diferentes teorías, que tratan de explicar las causas que determinan la distribución y abundancia de los organismos a través del espacio y el tiempo, mediante el desarrollo de estudios de patrones espaciales (tales como: individuos distribuidos de forma azarosa, en forma de agregados o con un tipo de distribución uniforme). Para analizar este tipo de poblaciones naturales que se utilizan diferentes métodos y herramientas estadísticas.

Procesos del cambio en los bosques

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 el 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 el 69.5% de la superficie terrestre, ocasionando una drástica reducción de la diversidad biológica (Lee *et al.*, 1995).

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 período de barbecho y otros tipos de degradación forestal.

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).

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 período 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 un 44%, en América Latina en un 32% y en el sur sudeste de Asia en un 34% (Houghton, 1994; Bocco *et al.*, 2001).

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 *et al.* (1997) y Masera (1996) mencionan que para inicios de los años 90 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 diferencias en la intensidad de trabajo realizado y diferencias en 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 (Masera, 1995; Ordóñez, 1999) que, a su vez, son producto de los diferentes propósitos por los que se han llevado a cabo los

diferentes estudios (González-Medellín, 1999), 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.

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).

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).

Los principales factores socioeconómicos que se correlacionan con la deforestación en países tropicales son, 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). 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 (Maser, 1996).

Por ejemplo en el estado de Michoacán, Bocco *et al.* (2001) mencionan que en los años 70 el 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 un 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.

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.

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 el 20% de las emisiones antropogénicas totales (IPCC 1992, 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.

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 llegar a ser irreversible (Maserá *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 de la deforestación. Las primeras se refieren a procesos inmediatos que producen cambio pero que 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.

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).

Fragmentación

Los cambios en el uso del suelo y cobertura vegetal asociados a la fragmentación de hábitats, es uno de los más perversos efectos de las actividades antrópicas en la faz de la tierra (Soulé and Orians, 2001). La destrucción y fragmentación de los hábitats es una de las causas principales en el incremento de las tasas de extinción de especies en las décadas recientes (Henle *et al.*, 1996; en Soulé and Orians, 2001). Todas las estimaciones de la superficie afectada en la fragmentación y destrucción de los hábitats sobre la tierra, son indicadores de un severo problema que se está incrementando. Aún áreas consideradas como bosques prístinos como en el Amazonas se han estado fragmentando; estudios como el de Fearnside (1996), menciona que los procesos de aclareo en el Amazonas presentó un incremento exponencial en el periodo comprendido entre los años 70 y 80 y que aún continua con alarmantes tasas; esto es muy significativo porque los trópicos presentan una alta diversidad que aún no se acaba de conocer.

Además de la reducción en la cobertura forestal, un serio problema que enfrentan los ecosistemas naturales es su fragmentación y degradación (Noss y Csuti, 1997). Las superficies fragmentadas como degradadas de las masas forestales serán subestimadas si al analizar los cambios en el uso y en la cobertura del terreno se privilegia la cuantificación de la pérdida de áreas con arbolado o sin él y no se toman en cuenta aspectos importantes como sus características y las trayectorias de cambio, como lo demuestra el trabajo de Alarcón-Cháires (1998). En este sentido es importante también entender en donde y con qué dirección están ocurriendo los cambios.

El proceso de fragmentación y subsecuente aislamiento descrito en los trabajos de Dirzo y García (1992) queda implícito en otros estudios, como el de Cuarón (1991) y el de Mas (1996). Por otro lado, la fragmentación del hábitat no necesariamente se asocia con grandes pérdidas en todos los componentes de la biodiversidad (Landa *et al.*, 1997), aunque el empobrecimiento de los ecosistemas naturales es la regla más que la excepción (Bilborrow y Ogendo, 1992; Whitmore y Sayer, 1992).

Emisiones de carbono en México

En nuestro país, los principales emisores de GEI son el sector de energía por el uso de combustibles fósiles con 83.8 MtC⁶ (Gay y Martínez, 1995), el cambio en el uso del suelo y actividades relacionadas con el sector forestal con 30.2 MtC (Masera *et al.*, 1995) y los procesos de la industria del cemento con 3.1 MtC, (Gay y Martínez, 1995) dando un total de 117.1 MtC. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 1995) estima que las emisiones de México contribuyen con el 1.45 % de las emisiones totales de carbono que se dan en nuestro planeta cada año.

México se extiende sobre un área de 196,718,300 ha, de las cuales se estima que en 1994, el 14% era pastizales, el 13% terrenos agrícolas, el 11% terrenos agropecuarios,

⁶ MtC es igual a una megatonelada de carbono, es decir un millón de toneladas de carbono.

el 16% bosques, el 13% selvas, 29% arbustos y matorrales, 2% vegetación de desiertos y dunas, y el 2% otros tipos (SARH, 1994).

A nivel nacional, los bosques son actualmente la segunda fuente de emisiones de GEI, contribuyendo aproximadamente el 30% del total (Gobierno de México, 1997). Asimismo, los bosques de México pueden ser extremadamente vulnerables al cambio climático (Villers y Trejo, 1997) y representan un almacén de carbono aproximado de 8 GtC (Maser *et al.*, 1997), cantidad equivalente a las emisiones mundiales actuales de CO₂. La capacidad de almacenamiento de C en estos bosques se está perdiendo rápidamente por los procesos de deforestación y degradación de los ecosistemas forestales.

El papel de los bosques en la mitigación del cambio climático

Al finalizar este milenio, la humanidad se da cuenta que ha inducido cambios en la dinámica de nuestro planeta conocidos como Cambio Global. Entre los efectos más importantes del Cambio Global está el incremento de algunos compuestos en la atmósfera, los cuales afectan la termodinámica de la misma y por eso han recibido el nombre de gases de efecto invernadero (e.g., dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, clorofluorocarburos, halocarburos, perfluorocarburos). Estos gases con efecto de invernadero tienen la capacidad de aumentar la temperatura del aire y por consiguiente modificar los actuales patrones climáticos del planeta. Entre las principales actividades humanas que han afectado la química de la atmósfera está el uso de combustibles fósiles y la deforestación. Se ha calculado que la concentración de CO₂ de la atmósfera se ha incrementado entre 15 y 20% en los últimos 100 años (Schlesinger 1991). Debido a lo anterior, la comunidad internacional ha establecido varios convenios para hacerle frente a este problema. El más reciente fue el Protocolo de Kyoto en el año de 1997. Dicho convenio estableció un compromiso de reducción de las emisiones netas de C a la atmósfera por algunos países desarrollados (Países de la Unión Europea, Estados Unidos, Canadá, Japón, entre los principales). Esto es, entendiéndose como

emisiones netas a la diferencia entre las emisiones brutas menos la captura del carbono atmosférico producto de las actividades humanas. Ejemplo de emisiones brutas son las generadas por el uso de combustible fósiles (García-Oliva y Ordóñez, 1999).

Pero las reducciones brutas de emisiones de C no resuelven el problema de los gases de efecto invernadero, porque no reduce la concentración de C que ya está en la atmósfera y con las condiciones actuales de la tecnología no es posible desarrollar actividades productivas sin emisiones brutas. Por lo que la solución es favorecer la captura de C orgánico y el único mecanismo reconocido actualmente, es por medio de la fotosíntesis de las plantas. Debido a que la captura del carbono atmosférico es por medio de los procesos que involucran el sistema vegetación-suelo, los bosques pueden ser muy importantes para reducir la concentración del carbono atmosférico. Entre las principales acciones de mitigación de emisiones de carbono se han propuesto la conservación de bosques (tropicales y templados) y el incremento de áreas boscosas, ya sea por reforestación o por medio de plantaciones forestales. Sin embargo, para tener una idea clara del efecto de estas acciones es necesario entender claramente los mecanismos que controlan el flujo de C entre la vegetación y el suelo. Sin embargo, la vegetación por sí sola, no tiene la capacidad de retener todo el C incorporado en la atmósfera, por lo que es muy importante conocer los mecanismos que controlan el flujo de C (Oliva y García-Oliva 1998).

Ante la preocupación mundial sobre las repercusiones ecológicas, económicas, políticas y sociales de un cambio climático global, a finales del siglo pasado se realizaron importantes foros, convenciones y acuerdos internacionales en torno a la reducción de las emisiones por actividades humanas de los GEI a la atmósfera. Dos importantes esfuerzos lo constituyen el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), formado en 1988 por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) aceptada en 1992 durante la

“Cumbre de la Tierra”, cuyo órgano máximo de decisión es la Conferencia de las Partes (COP).

Entre ambos, los representantes de gobiernos y científicos de todas partes del mundo promueven la investigación en torno al sistema climático, sus posibles impactos y plantean mecanismos para enfrentarlos considerando aspectos económicos y sociales. De tal manera que se logre la estabilización de los GEI en la atmósfera, en un periodo en el cual los ecosistemas se adapten de manera natural y en el que las actividades relacionadas al desarrollo económico y a la producción de alimentos continúen de forma sustentable, sin afectar al sistema climático (IPCC, 1995).

Sin embargo, las medidas voluntarias para la reducción de las emisiones fueron poco exitosas por lo que en 1997, durante la tercera Conferencia de las Partes en Tokio, Japón (COP-3) se aprueba un Protocolo que impone a los países de mayor emisión de GEI medidas adicionales y obligatorias de reducción (Gay, 2000). De esta manera el Protocolo de Kyoto (PK) plantea como temas básicos la reducción cuantificada de las emisiones de GEI y establece mecanismos de flexibilidad para lograrla (Maserá *et al.*, 2000).

El Protocolo de Kyoto y la CMNUCC reconocen responsabilidades comunes pero diferenciadas entre los países, pues si bien los países industrializados han contribuido significativamente a la emisión de estos gases, su efectiva mitigación requiere de la participación de todos los países, conforme a sus capacidades, condiciones sociales y económicas (Gay 2000).

El Protocolo de Kyoto designa las responsabilidades de los países firmantes conforme a su nivel de desarrollo económico y compromiso ante el cambio climático⁷. Así, el *Anexo I*

7 a) *Países del Anexo I*: Esta Conformado por 39 países desarrollados o con economías de mercado en transición y son los de mayor posibilidad y capacidad de acción ante el CC. En 1990 produjeron cerca del 55% de las emisiones totales de CO₂.

se integra por 39 países desarrollados o con economías de mercado en transición y son los de mayor responsabilidad y capacidad de acción ante el cambio climático por que para el año de 1990 produjeron cerca del 55% de las emisiones totales (Gay, 2000). Un subconjunto de 25 países de los anteriores llamados *países del Anexo II*, son países desarrollados los cuales proporcionan ayuda económica y tecnológica a países los países del *no Anexo* a fin de enfrentar el cambio climático. Estos últimos, se conforman por países cuyas economías están en desarrollo, entre ellos México (IPCC, 1995; Gay, 2000).

Conclusión

Los recursos forestales tienen un papel importante en la economía mundial y en el sano desarrollo de los diferentes ecosistemas, ya que tienen una función de fundamental importancia en el manejo y conservación de la biosfera (y por ende de la biodiversidad), es por ello que se necesitan estudiar con detenimiento las interrelaciones de cada comunidad, para poder así dar opciones de manejo de las diferentes comunidades que se encuentran en cada uno de los ambientes o en la intersección de dichos ambientes, en otras palabras se requiere del trabajo multidisciplinario que permita integrar todas y cada una de las especialidades que estudian las comunidades forestales y el ecosistema en sí a fin de desarrollar un adecuado manejo de los recursos naturales, asegurando su permanencia y que permitan cubrir las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer los recursos que usarán las generaciones en el futuro.

Si consideramos que en México aproximadamente 12 millones de personas habitan las zonas forestales y son en su mayoría comunidades rurales e indígenas que viven en condiciones de pobreza y marginación, es entonces determinante entender que los

b) Países del Anexo II: Conformado por 25 países desarrollados del *Anexo I*, los cuales proporcionan ayuda económica y tecnológica a los países de la categoría *No Anexo I* con el fin de enfrentar al CC.

c) Países del No Anexo I: son países en vías de desarrollo y México pertenece a esta categoría, a estas naciones no se les obliga a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero.

ecosistemas forestales proveen importantes servicios ambientales, como la captura de carbono, la protección de cuencas hidrográficas, la retención del suelo, la generación de oxígeno, el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales, la regulación climática, la protección de la biodiversidad, entre los principales y que también aporta insumos y materia prima para el desarrollo de la actividad productiva del país.

Por ello, para proponer estrategias viables dirigidas a la mitigación del cambio climático, es imprescindible por una parte, conocer la dinámica del carbono en los ecosistemas forestales (sus almacenes, fuentes y reservorios) y por otra parte, conocer las modificaciones a los almacenes de carbono que dan origen a los flujos derivados 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.

Un segundo paso clave para determinar los flujos netos de carbono a la atmósfera son los cambios en el uso del suelo, mismos que modifican, muchas veces de manera drástica los contenidos de carbono en los distintos almacenes.

En conjunto, estudiar la influencia de los procesos de cambio de uso del suelo en la dinámica de emisiones de carbono es crítico en nuestro país, pues la deforestación y la degradación de los ecosistemas forestales han sido muy aceleradas en las últimas décadas; los procesos asociados a la pérdida de los ecosistemas forestales, va de la mano con la conversión de bosques y selvas a áreas ganaderas y a cultivos agrícolas, estos factores varían en magnitud e importancia según el tipo de ecosistema.

Referencias

- Alarcón-Cháires, P. 1998. Cambios en la vegetación y uso del suelo en la meseta Púrhepecha, el caso de Nahuatzen, Michoacán, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 62: 29-37.
- Apps, M.J., W.A. Kurz, R.J. Luxmoore, L.O. Nilsson, R.A. Sedjo, R. Schmidt, L.G. Simpson, y T.S. Vinson. 1993. Boreal Forests and Tundra. In Wisniewski, J. y R.N. Sampson (Eds). *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 39-53.
- Bawa, K.S. y S. Dayanandan, 1997. Socioeconomic factors and tropical deforestation. *Nature*, 386:562-563.
- Bilsborrow, R.E. y H.W.O.O. Ogendo. 1992. Population-driven changes in land use in developing countries. *Ambio*, 21(1):37-45.
- Bocco, G., O. Maser 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*. No 44: 18-38.
- Brown, S., Ch. Hall, W. Knabe, J. Raich, M. Trexler, y P. Woome. 1993. Tropical Forest: their Past, Present and Potential Future Role In The Terrestrial Carbon Budget. *Water, Air and Soil Pollution*, 70, 71-94.
- Castellanos, J., J.M. Maass and J. Kummerow. 1991. Root biomass of a dry deciduous tropical forest in Mexico. *Plant and Soil*. 131:225-228.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2006. *Desarrollo Forestal Sustentable en México. Avances 2001-2006*. Comisión Nacional Forestal. 181 p.
- 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.
- Cuarón, A.D. 1991. Conservación de los primates y sus hábitats en el sur de México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Daily, G.C. 1995. Restoring value to the world's degraded lands. *Science*, 269:350-354.
- Dale, M.R.T. 1999. *Spatial pattern analysis in plant ecology*. Cambridge University Press. 1st Edition, 332 p.
- 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.

- 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.
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler, y J. Wisniewski. 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, 263, 185-190.
- Elliott, E.T. 1986. Aggregate structure and C, N and P in native and cultivated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:627-633.
- FAO-UNEP. 1990. Tropical Forest Resources Assessment Project. Vol. 1. FAO. Roma. 343 p.
- Fernaside, P.M. 1996. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. *Forest Ecology and Management*, 80:21-34.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1995. Forest resources assesment 1990, FAO forestry paper 124, Roma.
- García-Oliva, F. y A. Ordóñez. 1999. El Papel de los suelos forestales en la captura de carbono. *Nuestro Bosque. Gobierno del Estado de Michoacán- Comisión Forestal del Estado*, Vol. 1:1, 8-11, Oct-Dic.
- Gay, C. 2000. México: una visión hacia el siglo XXI, el cambio climático en México. INE-UNAM-U.S.Country Studies Program.
- Gay, C. y J. Martinez. 1995. Mitigation of Emissions of Greenhouse Gases in Mexico. *Interciencia*, 20:6, 336-342.
- Gobierno de México. 1997. Programa Forestal y de Suelo 1995-2000.
- 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 p.
- Goudie, A. 1990. *The Human Impact on the Natural Environmet*. Basil Blackwell Ltd, Oxford, U.K. 3th Edition. 388 p.
- Grijpma, I.P. 1990. *Producción Forestal*. Ed Secretaría de Educación Pública (SEP)/Trillas, 3^a Reimpresión. México, D.F. 134 p.
- Gupta, V.V.S.R. and J.J. Germida. 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biol. Biochem.*, 20:777-786.
- 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 p.

- Harrison J. A. 2003. El Ciclo Carbonoico: Siempre de Ida y Vuelta. *Visionlearning* Vol. EAS-2 (3s).
- Houghton, R.A. 1994. The worldwide extent of land-use change. *BioScience*, 44, 5:305-306.
- Houghton, R.A. y C.M. Woodwell. 1989. Global Climate Change. *Scientific American*, 260:4, 36-40.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1992. Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1995. Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. Cambio Climático, 2001; Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas. Una evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el Cambio climático. 94 p.
- Johnson, D. W. 1992. Effects of forest management on soil carbon storage. In: Natural Sink of CO₂. (J. Wisniewski and A. E. Lugo, Eds.) Palmas de mar, Puerto Rico, Kluwer Academic Pubs. 83-120.
- Kaimowitz, D., Angelsen, A. 1998. Economic models of tropical deforestation: a review. Center for International Forestry Research. Indonesia. 139 p.
- 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 p.
- Lambin, E.F., 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*, 7(1):316-329.
- Lee, H., J.L. Carr y A. Lanckerani. 1995. Human disturbance and natural habitat: a biome level analysis of a global set. *Biodiversity and Conservation*, 4:128-155.
- Martínez-Ramos, M. & E. Álvarez-Buylla. 1995. Ecología de poblaciones de plantas en una selva húmeda tropical. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 56:121-153.
- Mas, J.F. 1996. Estimación preliminar de las tasas de deforestación en el estado de Campeche. *Jaina*, 7(1): 5-6.

- 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., M.J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change*. 35: 265-295.
- Masera, O. 1995. Los Bosques y El Cambio Climático Global. Universidad de México. 536-537: 43-47.
- Masera, O. 1996. "Desforestación y Degradación Forestal en México". Documento de Trabajo No. 19. GIRA, A.C. Pátzcuaro, México.
- 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". 1a Ed. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada A.C. Michoacán, México.
- Melillo, J. M., P. A. Steudler, J. D. Aber and R. D. 1989. In: M.O. Andreae and D.S. Schimel (Eds.) Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Wiley. 263-280.
- 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, D.F. 50 p.
- Mosier, A., D. Schimel, D. Valentin, K. Bronson and W. Parton 1991. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature* 350: 330-332.
- 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.
- Noss, R.F. y Blair Csuti. 1997. Habitat fragmentation. En: G.K. Meffe y C.R. Carroll (eds.) *Principles of Conservation Biology*. Sinauer. Sunderland. 237-264.
- Oliva, M. y F. García-Oliva. 1998. Un nuevo campo de acción en la química biológica: Parte I. Generalidades sobre el cambio global. *Educación Química*. UNAM. México.
- ONU: CMCC. 1998. Organización de las Naciones Unidas: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Informe de la Conferencia de las Partes sobre su tercer periodo de sesiones, celebrado en Kyoto, Japón del 1° al 11 de diciembre de 1997. COP. 52 p.
- Ordóñez, A. 1998. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias-UNAM. México, D.F. 61 p.

- Ordóñez, A. 1999. Estimación de la captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo. INE- SEMARNAP. México, D. F. 72 p.
- Ordóñez, A., B.H.J de Jong y O. Maser. 2001. "Almacenamiento de carbono en los bosques de Nuevo San Juan: Aplicación del modelo dinámico CO2Fix en un bosque de *Pinus pseudostrabus* en Michoacán, México". *Madera y Bosques* 7 (2): 27-48. Departamento de Productos Forestales y Conservación de Bosques del Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México.
- Piñero, D. 1979. La distribución de las plantas en el espacio y su importancia en los estudios de ecología vegetal. *Biología*. 1-4:19-25.
- Post, W.M., J. Pastor, A.W. King and W.R. Emanuel. 1990. Aspects of the interaction between vegetation and soil under global change, in: *Natural sink of CO2*. J. Wisniewski and A.E. Lugo (Eds.) Palmas del Mar, Puerto Rico, Kluwer Academic Publishers. 345-363.
- 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.
- Reich, R.M. & R. Davis. 1998. Quantitative spatial analysis. Course notes NR/ST. Colorado State University. CO., 419 p.
- Salinas, M. 2002. Aspectos ecológicos de patrones espaciales de árboles tropicales caracteres de historia natural y tipos de hábitats en una selva húmeda neotropical, Chajul, Chiapas, México. Tesis de Licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Salisbury, F. y C. Ross. 1999. Fisiología vegetal. Grupo editorial Iberoamérica, S.A. de C.V. 759p.
- Schimel, D.S. 1995. Terrestrial Ecosystems and The Carbon Cycle. *Global Change Biology*, 1: 77-91.
- Schlesinger W. H. 1990. Evidences from chronosequence studies for low carbon-storage potential of soils. *Nature* 348: 232-234
- Schneider, S.H. 1989. The Greenhouse Effect: Science and Policy. *Science*, 243:10, 271-281
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. (SARH). México, D.F. 81 p.
- Smith, T.M., W.P. Cramer, R.K. Dixon, R. Leemans, R.P. Neilson, and A.M. Solomon. 1993. The Global Terrestrial Carbon Cycle. *Water, Air and Soil Pollution*, 70: 19-37.
- Soulé, M.E. and G.H. Orians. 2001. *Conservation biology: research priorities for the next decade*. Island Press. USA.

- Tate III, R.L. 1992. Soil organic matter. Biological and Ecological Effects. Krieger Publishing Co. Malabar Florida. 291 p.
- Tisdall, J.M. and J.M. Oades. 1982b. Organic matter and water-stable aggregates in red-brown earth. *Aust. J. Soil. Res.* 18:423-433.
- 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. Purrúa, México. 115-139.
- Villers-Ruíz, L. and I. Trejo-Vázquez. 1997. Assessment of the Vulnerability of Forest Ecosystems to Climate Change in Mexico. *Climate Research.* 9:87-93.
- Whitmore, T.C. y J.A. Sayer. 1992. Deforestation and species extinction in tropical moist forests. En: T.C. Whitmore, y J.A. Sayer. (eds.) *Tropical Deforestation and Species Extinction*. Chapman & Hall. Londres.



Capítulo II

La captura de Carbono ante el Cambio Climático¹

¹Publicado como: Ordóñez, J.A.B. y O. Maser. 2001.

La Captura de carbono ante el cambio climático. **Madera y Bosques** 7 (1): 3-12.

Manuscrito recibido el 16 de octubre del 2000

Aceptado el 23 de febrero de 2001. ISSN 1405-0471

La captura de Carbono ante el Cambio Climático¹.

Ordóñez, J.A.B. y O. Maserá.

Resumen

Las actividades humanas, tales como el uso de combustibles fósiles para la producción de energía y los procesos derivados del cambio en el uso del suelo y silvicultura, están generando grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como: dióxido de carbono (CO₂), clorofluorocarburos (CFC's), óxidos de nitrógeno (NOx), y metano (CH₄), principalmente. Siendo el CO₂ uno de los GEI más importantes por las grandes cantidades en las que se emite. La vegetación tiene la capacidad de asimilar el carbono e incorporarlo a su estructura es decir, lo fija y lo mantiene almacenado por largos periodos, a través de la fotosíntesis. Es por esta razón que los bosques son importantes sumideros de carbono. El presente trabajo, tiene como objetivo describir el proceso de captura de carbono en los ecosistemas forestales y su relación al cambio climático

Abstract

Human activities have been generating high greenhouse gas emissions (GHG) from two principal sources: fossil fuel used to produce energy and vegetation removal during land use changes and forestry practices. The main GHG are carbon dioxide (CO₂), chlorofluorocarbons (CFC's), nitrogen oxide (NOx) and Methane (CH₄). CO₂ is the most important GHG, since it has the highest emission rates. The vegetation has the capacity to sequester carbon and incorporate it in their structure and keep it for long period of time, through photosynthesis, therefore forests are important carbon sinks. In the

1 Publicado como: Ordóñez, J.A.B. y O. Maserá. 2001. La Captura de carbono ante el cambio climático. **Madera y Bosques** 7 (1): 3-12. Manuscrito recibido el 16 de octubre del 2000
Aceptado el 23 de febrero de 2001. ISSN 1405-0471

present work the carbon sequestration process and its relation with climate change is described.

Introducción:

El cambio climático global asociado al aumento potencial de la temperatura superficial del planeta, es uno de los problemas ambientales más severos que enfrentamos en el presente siglo. Este problema se acentúa por el rápido incremento actual en las emisiones de gases de efecto invernadero "GEI" (Bolin *et al.*, 1986) y por las dificultades de reducir en forma sustantiva el incremento de GEI en el futuro próximo (IPCC, 1995). En nuestro país, los principales emisores de GEI son el sector de energía, por el uso de combustibles fósiles con 83.8 MtC² (Gay y Martínez, 1995), el cambio en el uso del suelo y forestería con 30.2 MtC (Maserá *et al.*, 1995a) y los procesos de la industria del cemento con 3.1 MtC, (Gay y Martínez, 1995) dando un total de 117.1 MtC. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 1995) estimó que las emisiones de México contribuyen con el 1.45 % de las emisiones totales de carbono que se dan en nuestro planeta cada año.

Diferentes autores (Schneider 1989; Houghton y Woodwell, 1989; Lashof y Ahuja 1994; Dixon *et al.*, 1994 y Maserá 1995a; Schimel, 1995; Ordóñez, 1998 y 1999) afirman que el dióxido de carbono³ (CO₂) es uno de los GEI más importantes y que su emisión a la atmósfera por el cambio en el uso del suelo ocupa el segundo lugar a nivel mundial, con una fuerte contribución de las zonas tropicales. La deforestación mundial anual se calcula en 17 millones de hectáreas, lo que significa una liberación anual de cerca de 1.8 GtC⁴; lo que representa el 20% de las emisiones antropogénicas totales (IPCC, 1992 y 1995; Montoya *et al.*, 1995).

2 Una MtC es igual a un millón de toneladas de carbono.

3 Una tonelada de CO₂, equivale a 0.27 toneladas de carbono.

4 Una GtC es igual a mil millones de toneladas de carbono.

Específicamente para México, este fenómeno es de singular importancia pues, por un lado, 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 bioclimáticas y socioeconómicas (Villers y Trejo, 1998; Ordóñez, 1998; Gay, 2000; Milenio, 2001).

A nivel nacional, los bosques son actualmente la segunda fuente de emisiones de GEI, contribuyendo aproximadamente el 30% del total (Gobierno de México, 1997). Asimismo, los bosques de México pueden ser extremadamente vulnerables al cambio climático (Villers y Trejo, 1998) y representan un almacén de carbono aproximado de 8 GtC (Masera *et al.*, 1997), cantidad equivalente a las emisiones mundiales actuales de CO₂. La capacidad de almacenamiento de carbono (C) en estos bosques se está perdiendo rápidamente por los procesos de deforestación y degradación de los ecosistemas forestales.

Para proponer estrategias viables dirigidas a la mitigación del cambio climático es imprescindible, por un lado, conocer la dinámica del C en los ecosistemas forestales y, por otra, 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 (Ordóñez, 1998).

Los principales almacenes de C en los ecosistemas forestales son el suelo, la vegetación y el mantillo. La vegetación es la encargada de incorporar el C atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis. Los bosques del mundo (templados y tropicales) capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo (Apps *et al.*, 1993; Brown *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994). De igual manera, el suelo juega un papel muy importante en el reciclaje y almacén del carbono en estos ecosistemas. Como ejemplos de la influencia global de los procesos del suelo están los productos de la

desnitrificación, tales como N_2O , N_2 , así como los producidos por la descomposición de la materia orgánica del suelo, como el CO_2 , CH_4 y otros gases asociados al ciclo del C (Melillo *et al.*, 1989; Mosier *et al.*, 1991). El suelo tiene una gran capacidad de "secuestrar" C (Johnson, 1992), ya que puede acumularlo por miles de años (Schlesinger, 1990).

Un segundo factor clave para determinar los flujos netos de C a la atmósfera son los cambios en el uso del suelo (Jenny, 1941), mismos que modifican, muchas veces de manera drástica, los contenidos de carbono en los distintos almacenes. Estudiar la influencia de los procesos de cambio de uso del suelo en la dinámica de emisiones de C es crítico en nuestro país pues la deforestación y la degradación del recurso forestal, han sido muy aceleradas en las últimas décadas. La tasa de deforestación, no se conoce con precisión aunque se estima que oscila entre 370 y 670 mil ha año⁻¹ para principios de los 90's tan sólo en los bosques templados y las selvas. Masera *et al.* (1997), afirman que probablemente el valor más alto sea el correcto. De acuerdo con esta última estimación se obtiene que, para los bosques templados la tasa de deforestación es de 1% y para las selvas de 2% al año (Masera *et al.*, 1995b). Las causas que más impacto tienen en la deforestación son el cambio en el uso del suelo, tales como la conversión a ganadería y a cultivos agrícolas. Estos factores varían en importancia según el tipo de ecosistema (Ordóñez, 1998).

A pesar de ser actualmente fuentes netas de emisión de GEI, los bosques tienen la posibilidad de mitigar GEI por medio de la captura de carbono en diferentes ecosistemas vegetales conocidos como: sumideros (Masera, 1996; Ordóñez, 1998 y 1999).

No se cuenta en el país con información detallada sobre los almacenes de C por tipo de ecosistema y uso del suelo, ni de los flujos netos de C derivados de los patrones de cambio de uso del suelo a nivel regional (Hughes *et al.*, 1999; Hughes *et al.*, 2000; Ahedo, 2001). 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 (Maser, 1996; Ordóñez, 1998 y 1999).

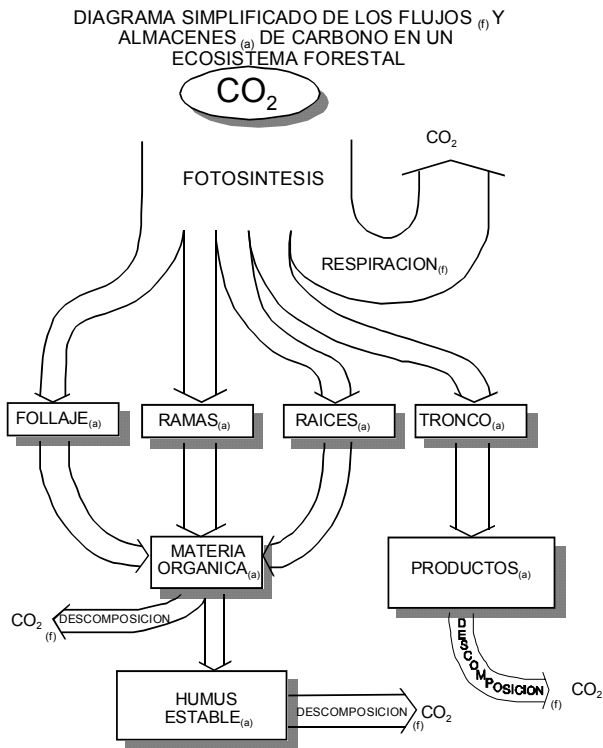
El carbono en ecosistemas forestales

Una vez que el dióxido de carbono (CO_2) atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis, éste participa en la composición de materias primas como la glucosa, para formar todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (e.g., follaje, ramas, raíces y tronco). El árbol al crecer va incrementando su follaje, sus ramas, flores, frutos, yemas de crecimiento (que en su conjunto conforman la copa); así como altura y grosor de su tronco. La copa necesita espacio para recibir energía solar sobre las hojas dando lugar a una competencia entre las copas de los árboles por la energía solar, originando a su vez un dosel cerrado. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, misma que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable que, a su vez aporta nuevamente CO_2 al entorno (Ordóñez, 1998 y 1999).

Simultáneamente los troncos, al ir incrementando su diámetro y altura, alcanzan un tamaño tal que puedan ser aprovechados con fines comerciales. De este aprovechamiento se extraen productos como: tablas, tablones y polines, que darán origen a subproductos elaborados como: muebles y casas. Estos productos finales tienen un tiempo de vida determinado después del cual se degradan aportando carbono al suelo y CO_2 producto de su descomposición a la atmósfera (Ordóñez, 1998 y 1999).

Finalmente, durante el tiempo en que el carbono se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol y hasta que es reemitido (ya sea al suelo o a la atmósfera), se considera que se encuentra almacenado. En el momento de liberación (ya sea por la

descomposición de la materia orgánica y/o la quema de la biomasa) el carbono fluye para regresar a su ciclo (Ordóñez, 1998 y 1999).



El diagrama (figura 1), representa los flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal, donde el follaje, las ramas, las raíces, el tronco, los desechos, los productos y el humus estable son almacenes de carbono, mismos que se reincorporarán al ciclo por descomposición y/o quema de la biomasa forestal.

Figura 1. Diagrama simplificado de los flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal.

La estimación precisa de la dinámica de los flujos netos de carbono entre los bosques y la atmósfera (es decir, el balance emisión-captura) es uno de los problemas abiertos más importantes en la discusión sobre cambio climático (IPCC, 1995; Lashof y Ahuja, 1990; Mintzer, 1992; Dixon *et al.*, 1994). Esto es resultado, por un lado, del complejo ciclo biogeoquímico del carbono en los ecosistemas forestales (García-Oliva y Ordóñez, 1999). En efecto, los procesos de emisión- captura son parte de un sistema con cuatro tipos generales de reservorios de carbono (vegetación -aérea y subterránea- materia en descomposición, suelos, productos forestales), con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes. Estos reservorios se encuentran estrechamente interrelacionados lo que hace necesario un enfoque sistémico conocido como: *método del sistema total del carbono*, (Apps *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994) y el uso de modelos de simulación. La problemática es particularmente crítica para los bosques tropicales, en donde no se tiene buena información de los contenidos de carbono en

vegetación y suelo, ni se han podido determinar los parámetros para los modelos predictivos existentes (e.g., modelos como: GORKAM, CASFOR, LUCS).

Un segundo problema fundamental para la determinación precisa de las emisiones netas de los ecosistemas forestales, es la gran incertidumbre en los procesos de cambio de uso del suelo, específicamente, cuánto y cómo se pierden los bosques a través del tiempo (IPCC, 1995; Masera *et al.*, 1997). Esto es complicado pues depende de la interacción de factores de tipo biofísico y socioeconómico. Entre los factores físicos y biológicos relacionados con los procesos de cambio de cobertura y uso del suelo destacan las características del relieve del terreno, las propiedades físicas y químicas del suelo, la disponibilidad de fuentes de agua, el estado y la estructura de la vegetación. Además de los procesos naturales de cambio dinámico de los propios ecosistemas como la regeneración y sucesión, hay numerosos factores antropogénicos que promueven la transformación de las áreas naturales, impactándolas a distintos niveles y con diferentes intensidades, desencadenando cambios en las relaciones entre la diversidad biológica y el funcionamiento del ecosistema (Naveh y Liebman, 1984; Saunders *et al.*, 1991). No existen muchos trabajos destinados a entender los aspectos finos de la dinámica que ocurre en el paisaje que responde a diversos procesos como la degradación o regeneración de la vegetación. Estos aspectos finos de los procesos de cambio de uso del suelo son, sin embargo, los más importantes desde el punto de vista de la dinámica de emisiones y captura de carbono.

La captura unitaria de carbono

Para estimar la captura unitaria de carbono se estima el carbono contenido en diferentes almacenes (que pueden ser emitidos o ahorrados; Masera, 1995; Ordóñez, 1998 y 1999), estos almacenes incluyen:

C_v = carbono contenido en la vegetación

C_d = carbono contenido en la materia orgánica en descomposición

- Cs*** = carbono contenido en los suelos
- Cp*** = carbono contenido en productos forestales (e.g., muebles, papel)
- Cf*** = carbono ahorrado por no utilizar combustibles fósiles (e.g., proyectos bioenergéticos, aclarando que este punto no es un almacén de C)

Carbono en vegetación (*Cv*).

El carbono en la vegetación es la suma del carbono contenido en la biomasa aérea y el carbono contenido en la biomasa de las raíces. La biomasa aérea comprende el tronco, las hojas, las ramas y el follaje; mientras que el carbono contenido en las raíces es definido como biomasa de las raíces.

Carbono en descomposición (*Cd*).

Es el carbono contenido en la materia orgánica que se encuentra en proceso de descomposición; ésta es originada cuando las estructuras vegetales como: las hojas, las ramas, el tronco, son depositadas en el suelo.

Carbono en el suelo (*Cs*).

Es el carbono contenido en las capas que conforman el suelo forestal; este suelo es originado por fragmentación de la roca madre expuesta (material parental), donde se establece un organismo vegetal, que a lo largo del tiempo va formando capas por depositación de materiales que, al irse acumulando y compactando, almacenan una cierta cantidad de carbono misma que se incrementará por la continuidad del proceso de formación del suelo.

Carbono en productos (*C_p*).

Son los productos forestales almacenes de carbono durante todo el tiempo de vida del producto y cuando este tiempo termina, el carbono se incorporará al ciclo dependiendo del proceso de degradación del producto. Mientras mayor sea la vida media de un producto forestal, el carbono estará almacenado por más tiempo.

Carbono ahorrado por sustitución de combustibles fósiles (*C_f*).

Es una alternativa para contabilizar créditos comercializables por la sustitución de combustibles fósiles (e.g., por el uso de la biomasa forestal para la producción de energía), aclarando que este punto se contempla en el cálculo de la captura unitaria pero, no es ni captura, ni secuestro de carbono.

La captura unitaria de carbono ***C_t*** parte de la siguiente ecuación:

$$C_t = C_v + C_d + C_s + C_p + C_f$$

y como resultado de la sumatoria se obtiene ***C_t*** que es igual al carbono total fijado (en ton/ha) o se puede estimar dinámicamente como:

$$C_t = \frac{\sum (C_v + C_d + C_s + C_p)}{T} + \sum C_f$$

donde:

T = tiempo.

De esta forma, ***C_t*** es el promedio del carbono fijado en la vegetación, materia en descomposición, suelos, y productos forestales, más la suma del carbono ahorrado por la sustitución de combustibles fósiles debido al uso de bioenergía

En las opciones forestales de mitigación, la captura de carbono se mide en toneladas de carbono por ha (tC/ha/año). Se define asimismo una captura unitaria “neta”, es decir, la captura que resulta de la diferencia entre llevar a cabo la opción seleccionada y el uso alternativo del uso (por ejemplo, la diferencia entre el contenido de carbono en un bosque y en una parcela agrícola).

La captura unitaria neta de carbono **Cnet**, por la puesta en práctica de la opción seleccionada está dada como:

$$Cnet = Ctp - Ctref$$

donde:

Ctp = carbono total fijado en la opción de manejo bajo análisis

Ctref = carbono total fijado en el uso (alternativo) del suelo sin proyecto

Discusión

Las implicaciones del cambio climático son muchas. Cuando se modifica la temperatura en la Tierra (efecto invernadero), se asocian otros problemas atmosféricos, porque de ello depende la cantidad de evapotranspiración de los océanos, la existencia de nubes, la presencia-ausencia de lluvia y, en consecuencia, la producción y la escasez de alimentos. Las regiones semiáridas podrían convertirse en áridas y en los sitios donde llueve mucho podría llover más; es decir hablamos de afectaciones en casi todas las actividades humanas, comenzando con la agricultura (Gay, 2000).

Aunado a esto, tenemos los procesos de deforestación, mismos que liberan grandes cantidades de carbono a la atmósfera y dan origen a problemas de degradación del recurso forestal, de los suelos y como consecuencia de la pérdida de biodiversidad.

Es por estas razones que se están estableciendo mecanismos de desarrollo limpio (MDL), a fin de que los países en desarrollo puedan percibir incentivos por la venta de bonos de captura de carbono derivados de la certificación en la reducción de sus emisiones y del establecimiento de proyectos de captura de carbono; sin embargo, aun hay muchas incertidumbres sobre los costos reales de este servicio ambiental y de los requisitos que se pretenden establecer a nivel mundial para este mercado (para mayor información ver: Evaluating carbon offsets from forestry and energy projects: how do they compare?, By Kenneth M. Chomitz, Development Reseach Group, World Bank, March 2000).

Conclusión

Dentro de este panorama, una de las tareas prioritarias es llevar a cabo estudios de emisión-captura de carbono a nivel regional en ecosistemas forestales que presenten procesos muy dinámicos de cambio de uso del suelo. Estos estudios deberán permitir, por un lado, estimar más precisamente las densidades de carbono asociadas a las distintas clases de vegetación y, por el otro, desarrollar métodos de cuantificación y predicción sobre el comportamiento de los procesos de emisión captura de carbono bajo diferentes dinámicas de cambio de uso del suelo y de esta forma poder ofrecer opciones de mitigación de gases de efecto invernadero en el corto, mediano y largo plazo, aunado a la posible venta de un servicio ambiental. Es decir, la captura de carbono nos permitirá además, en el largo plazo, contribuir directamente en la mitigación del fenómeno conocido como cambio climático.

Agradecimientos

Quiero agradecer los comentarios y sugerencias del Biól. Raúl Ahedo y de Ir. Michiel van Breugel y del comité de revisores de la Revista Maderas y Bosques, para hacer mas claro este documento. Esta investigación ha sido financiada por CONACYT (Proyecto No: 32715-N).

Literatura citada

- Ahedo R. 2001. Estimación de biomasa radical y almacenes de carbono en los Tuxtlas Veracruz, México: los cambios con en el uso del suelo. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM. México, D.F. 47 p.
- Apps, M.J., W.A. Kurz, R.J. Luxmoore, L.O. Nilsson, R.A. Sedjo, R. Schmidt, L.G. Simpson, y T.S. Vinson. 1993. Boreal Forests and Tundra. In Wisniewski, J. y R.N. Sampson (Eds). Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 39-53.
- Bolin, B., B.R. Döös, J. Jager y R.A. Warrick. 1986. The Green House Effect, Climate Change and Ecosystems. Ed. John Wiley & Sons.
- Brown, S., Ch. Hall, W. Knabe, J. Raich, M. Trexler, y P. Woomer. 1993. Tropical Forest: their Past, Present and Potential Future Role In The Terrestrial Carbon Budget. Water, Air and Soil Pollution, 70, 71-94.
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler, y J. Wisniewski. 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. Science, 263, 185-190.
- García-Oliva, F. y A. Ordóñez. 1999. El Papel de los suelos forestales en la captura de carbono. Nuestro Bosque. Gobierno del Estado de Michoacán- Comisión Forestal del Estado, Vol. 1, N°1, Pág. 8-11, Oct-Dic.
- Gay, C. 2000. El Cambio climático, el problema global más importante del futuro. Gaceta UNAM, Noviembre 13. No. 3411: 12-13.
- Gay, C. y J. Martínez. 1995. Mitigation of Emissions of Greenhouse Gases in Mexico. Interciencia, 20:6, pp. 336-342.
- Gobierno de México. 1997. Programa Forestal y de Suelo 1995-2000.
- Houghton, R.A. y C.M. Woodwell. 1989. Global Climate Change. Scientific American, 260:4, 36-40.
- Hughes, R.F., J.B. Kauffman, and V.J. Jaramillo. 1999. Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of Mexico. Ecology 80(6): 1892-1907.
- Hughes, R.F., J.B. Kauffman, and V.J. Jaramillo. 2000. Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico. Ecological Applications 10: 515-527.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1992. Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1995. Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jenny H. 1941. Factors of soil formation. MacGraw-Hill, New York.
- Johnson, D. W. 1992. Effects of forest management on soil carbon storage. In: Natural Sink of CO₂. (J. Wisniewski and A. E. Lugo, Eds.) Kluwer Academic Publs. Palmas de mar, Puerto Rico. p. 83-120.
- Lashof, D.A y D.R. Ahuja. 1990. Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming. *Nature*, 344:5, 529-531.
- Masera, O. 1995a. Carbon Mitigation Scenarios for Mexican Forests: Methodological Considerations and Results. *Interciencia*, 20:6, 388-395.
- Masera, O. 1995b. Desforestacion y Degradación Forestal en México. Documento de Trabajo 19. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. Pátzcuaro, Micoacán, México. 50 p.
- Masera, O., T. Hernández, A. Ordóñez, y A. Guzmán, 1995a. Land Use Change and Forestry. In Preliminary Inventory of National Greenhouse Gases: Mexico, UNEP PROJECT # GF/4102-92-01 (pp/3011) Mexico City. 56-100. (sept.)
- Masera, O., M.R. Bellon, y G. Segura. 1995b. Forest Management Options for Sequestering Carbon in Mexico. *Biomass & Bioenergy*, 8:5, 357-367.
- Masera, O. 1996. "Desforestación y Degradación Forestal en México". Documento de Trabajo No. 19. GIRA, A.C. Pátzcuaro, México. 50 p.
- Masera O., M.J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change*, 35, 265-295.
- Milenio. 2001. Crece la amenaza por el cambio climático. *Milenio Diario*, Lunes 19 de febrero, 2001. p 35.
- Melillo, J. M., P. A. Steudler, J. D. Aber and R. D. 1989. In: M.O. Andreae and D.S. Schimel (Eds.) Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Wiley & Sons, p. 263-280.
- Mintzer, I.M. 1992. Confronting Climate Change. Risk Implications and Responses. Cambridge, University Press, Cambridge.
- Mosier, A., D. Schimel, D. Valentin, K. Bronson and W. Parton 1991. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature* 350: 330-332.
- 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, Cuadernos de Trabajo 4. México, D.F.

Naveh, Z. and A. Liebman. 1984. Landscape ecology. Springer-Verlang. New York. pp 3-25.

Ordóñez, A. 1998. Estimación de la Captura de Carbono en un Estudios de Caso para Bosque Templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad de México.

Ordóñez, A. 1999. Estimación de la Captura de Carbono en un Estudio de Caso. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT. México DF. 72p.

Villers-Ruiz, L. and I. Trejo-Vázquez. 1997. Assessment of the Vulnerability of Forest Ecosystems to Climate Change in Mexico. *Climate Research*. 9:87-93

Sauders, D., R. Hoobbs, and C. Margules. 1991. Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conservation Biology*, 5: 18-32.

Schimel, D.S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle: *Global Change Biology* 1: 77-91.

Schlesinger W. H. 1990. Evidences from chronosequence studies for low carbon-storage potential of soils. *Nature* 348: 232-234.

Schneider, S.H. 1989. The Greenhouse Effect: Science and Policy. *Science*, 243:10, 271-281.

Capítulo III

Almacenamiento de carbono en los bosques de Nuevo San Juan: Aplicación del modelo dinámico CO2Fix en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Michoacán, México¹

¹Publicado como: Ordóñez, J.A.; B.H.J. de Jong y O. Masera. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus*, Michoacán. **Madera y Bosques** 7 (2): 27-47.
Manuscrito recibido el 12 de septiembre del 2000
Aceptado el 23 de febrero de 2001. ISSN 1405-0471



Almacenamiento de carbono en los bosques de Nuevo San Juan: Aplicación del modelo dinámico CO₂Fix en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Michoacán, México¹.

Ordóñez, J.A.B.; B.H.J. de Jong y O. Maserá

Resumen

En el presente trabajo se utilizó el modelo dinámico CO₂Fix for Windows Ver. 1.2., para obtener la captura potencial de carbono en la comunidad de Nuevo San Juan (NSJ). El carbono total estimado en el largo plazo (250 años) por hectárea fue de 217 tC; la biomasa (aérea y subterránea) con 74 tC/ha, los productos con 49 tC/ha y el suelo con 94 tC/ha. Se estimó que en el largo plazo (250 años) se tiene un potencial de captura de carbono en el bosque de la comunidad de 1.9 MtC en sus 8,870 ha. Así mismo se realizaron análisis de sensibilidad de tres parámetros, para identificar la diferencia potencial en la captura de carbono (tiempo de vida de los productos, tasas de humificación y descomposición $\pm 30\%$ del valor original). Por último, se describe la importancia del uso del modelo CO₂FIX como una herramienta en el manejo forestal, especialmente para las plantaciones forestales. La simulación se basó en lo posible en datos disponibles localmente. Específicamente la información disponible fue: (a) Superficie del área de estudio; (b) Manejo forestal: ciclos de aclareos, corta de regeneración y corta de liberación; existencias reales (E.R), y volumen de madera extraído; (c) Crecimiento del árbol: incremento corriente anual (ICA), diámetro, altura, edad, e incremento medio anual (IMA); y (d) Productos derivados como: papel, cajas de

¹ Publicado como: Ordóñez, J.A.; B.H.J. de Jong y O. Maserá. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus*, Michoacán. **Madera y Bosques** 7 (2): 27-47.
Manuscrito recibido el 12 de septiembre del 2000. Aceptado el 23 de febrero de 2001. ISSN 1405-0471

empaque, madera para construcción, madera para muebles, madera para energía y madera muerta.

Palabras clave: Carbono, Nuevo San Juan, Captura, Manejo forestal, Modelo CO2Fix

INTRODUCCIÓN

El cambio climático global es uno de los problemas ecológicos más severos, que se propician por el incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Este fenómeno tendría repercusiones particularmente graves para los ecosistemas naturales, coadyuvando a la pérdida y degradación de la riqueza biótica del planeta, la erosión de suelos, cambios en los patrones de evapotranspiración, contaminación de mantos acuíferos y otros fenómenos (Bolin, 1986; Wilson, 1999; Cherrill y McClean, 1995; Krysanova *et al.*, 1998; Mander *et al.*, 1998).

Se ha determinado que el dióxido de carbono (CO₂) es el principal GEI, siendo la producción de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo, los factores más importantes (Schneider, 1989; Houghton, 1989; Goudie, 1990; Lashof y Ahuja, 1990; Mintzer, 1992; Dixon *et al.*, 1994). En nuestro país los principales emisores de gases de efecto invernadero son el sector energía por el uso de combustibles fósiles con 83.8 MtC (Gay y Martínez, 1995), en segundo lugar el cambio en el uso del suelo y forestería con 30.2 MtC (Masera *et al.*, 1995b; Masera *et al.*, 1997, estiman 52.3 MtC, sin restar las tC absorbidas por arbustos y matorrales, por lo que se considera en este estudio la primera estimación) y en tercer lugar los procesos de la industria del cemento con 3.1 MtC, (Gay y Martínez, 1995) dando un total de 117.1 MtC. El IPCC (1995), estima que las emisiones de México contribuyen con el 1.45 % de las emisiones totales de carbono que se dan en nuestro planeta cada año.

La deforestación y la degradación del recurso forestal han sido muy importantes en las últimas décadas. La tasa de deforestación, no se conoce con precisión y las

estimaciones oscilan entre 370 y 670 mil ha año⁻¹ para principios de los 90´s en bosques templados y selvas². Masera *et al.* (1997), afirman que probablemente la tasa alta sea la correcta. De acuerdo con esta última estimación se obtiene que para los bosques templados la tasa de deforestación es de 1% y para las selvas un 2% al año (Masera, *et al.*, 1995a).

Las causas que más impacto tienen en la deforestación son el cambio en el uso del suelo, conversión a praderas y a cultivos agrícolas, así como los incendios forestales y la tala irracional. Es por eso que los procesos de cambio de uso del suelo, ocupan el segundo lugar entre las fuentes de emisión de GEI a nivel nacional.

Los bosques tienen la posibilidad de mitigar GEI por medio de la captura de carbono que se realiza en diferentes ecosistemas vegetales conocidos como sumideros, a pesar de ser, fuentes netas de emisión de GEI (Masera, 1996; Ordóñez, 1998 y 1999). En efecto, la vegetación asimila dióxido de carbono atmosférico, por medio del proceso fotosintético. Los árboles en particular, asimilan y almacenan grandes cantidades de carbono durante toda su vida. Los bosques del mundo 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 (Apps *et al.*, 1993; Brown *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994).

Estimar con precisión la dinámica de los flujos netos de carbono entre los bosques y la atmósfera (es decir, el balance emisión-captura) es uno de los problemas abiertos más importantes en la discusión sobre cambio climático (IPCC, 1995; Lashof y Ahuja, 1990;

²Actualmente existen inconsistencias en las definiciones de los tipos básicos de vegetación y superficie entre los diferentes inventarios forestales y entre diferentes instituciones (Masera, 1995b). Por ejemplo, el Primer Inventario Forestal, realizado entre 1961 y 1985, utilizó fotografías aéreas y muestreo intensivo de campo para el 52% de la superficie forestal -esencialmente las zonas arboladas con mayor valor comercial- e imágenes de satélite de baja resolución y fue procesado a escala 1:3,000,000 para el 48% restante. El Inventario Forestal de Gran Visión se realizó con imágenes de satélite de baja resolución y fue procesado a escala 1:1,000,000 sin muestreos de campo. Finalmente, el Inventario Forestal Periódico utilizó imágenes de satélite de alta resolución pero con interpretación en papel, fue procesado a escala 1:250,000 e incluyó muestreos de campo de baja intensidad (Varela *et al.*, 1995)

Mintzer, 1992; Dixon *et al.*, 1994). Esto es resultado, del complejo ciclo biogeoquímico del carbono en los ecosistemas forestales (García-Oliva y Ordóñez, 1999). En efecto, los procesos de captura-emisión son parte de un sistema con cuatro tipos generales de reservorios de carbono (vegetación -aérea y radicular- materia en descomposición, suelos, productos forestales), con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes. Estos reservorios se encuentran estrechamente interrelacionados lo que hace necesario un enfoque sistémico conocido como: *método del sistema total del carbono*, (Apps *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994) y el uso de modelos de simulación. La problemática es particularmente crítica para los bosques tropicales, en donde no se tiene información buena de los contenidos de carbono en vegetación y suelo, ni se han podido parametrizar los modelos predictivos existentes (e.g., modelos como: GORCAM, CASFOR, LUCS; Mohren y Goldewijk, 1990; Nabuurs y Mohren, 1993; De Jong *et al.*, 1995; Maser *et al.*, 1997; Ordóñez, 1997, 1998 y 1999).

Captura de carbono en los ecosistemas forestales

La dinámica del carbono en los ecosistemas forestales es muy compleja, por lo que, para hacer una estimación de los cambios en el almacenamiento de carbono, es necesario analizar la cantidad de carbono en los distintos componentes que integran los ecosistemas y las transferencias de carbono entre ellos en el tiempo y el espacio. Esto implica analizar conjuntamente la dinámica del carbono en: vegetación (aérea y subterránea), suelo (incluyendo materia en descomposición) y productos forestales. Para obtener la dinámica temporal de la captura de carbono es necesario utilizar modelos de simulación.

En este estudio se integró toda la información que fue posible obtener localmente, complementándola con datos publicados de estudios de caso en ecosistemas similares para poder así ejecutar el modelo de simulación CO₂Fix a fin de poder realizar una estimación de la dinámica de carbono en los bosques de la comunidad de Nuevo San Juan (NSJ).

El uso de modelos de simulación permite realizar las estimaciones de la dinámica de carbono de una manera ágil, y facilita la generación de escenarios alternativos a corto, mediano y largo plazo, así mismo un análisis de sensibilidad de ciertos parámetros (Mohren y Goldewijk, 1990; Nabuurs y Mohren, 1993; De Jong *et al.*, 1995; Masera *et al.*, 1997; Ordóñez, 1997, 1998 y 1999). Sin embargo, los modelos requieren de una multitud de parámetros que no siempre se pueden obtener a nivel local.

Descripción general del área de estudio.

El municipio de Nuevo San Juan se localiza al sur de la región Purépecha en el centro occidente del Estado de Michoacán (figura 1), entre los paralelos $19^{\circ}21'00''$ y $19^{\circ}24'45''$ N y los meridianos $102^{\circ}08'15''$ y $102^{\circ}17'30''$ W. Tiene una extensión de 23,431.00 ha.

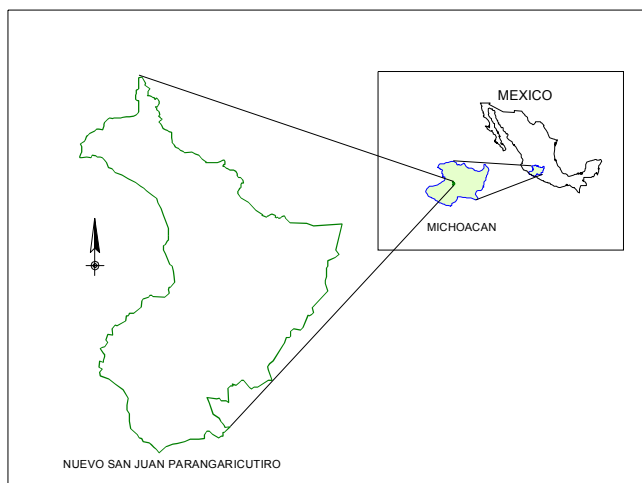


Figura 1. Localización del área de estudio.

La Comunidad Indígena de Nuevo San Juan se ubica en el municipio de Nuevo San Juan Parangaricutiro, a 15 kms al poniente de la ciudad de Uruapan. Administrativamente forma parte del Centro de Apoyo Agropecuario y Forestal N° 01 de Nuevo San Juan, del Distrito de Desarrollo Rural Integral N° 087, con sede en Uruapan, y a la jefatura del Programa Forestal y Delegación Estatal de la Secretaría de Agricultura y Recursos

Hidráulicos (SARH), en Morelia, Michoacán. Cuenta con una superficie de 18,318 ha, que representa el 78% del total municipal.

La región pertenece al Período Cuaternario y tiene rocas del medio superior volcánico de la Era Cenozoica. Se encuentran en el área rocas ígneas de tipo andesíticas, riolitas, basaltos, tobas, cenizas volcánicas, porfidios y brechas andesíticas predominantemente. También rocas sedimentarias compuestas por material detrítico, en proporción menor. En la región abundan los conos cineríticos grandes y pequeños, barrancas, llanuras volcánicas y algunos valles, con altitudes que van de los 1500 a 3250 msnm.

Los suelos que dominan el área corresponden, según el sistema FAO-UNESCO, a andosol vítrico, regosol eutrico, litosol, luvisol crómico y cambisol eútrico (Cuanalo *et al.*, 1989).

La hidrología de la región está determinada por un patrón de drenaje heterogéneo, de forma radial en los volcanes, dendrítico en las lavas y lateral en los llanos.

De acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen modificado por García (1981), y en las cartas de clima, elaboradas por la Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP), Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), y la Dirección General de Geografía (DGG), hay un clima templado húmedo, (C (m) (w) big con variantes) con abundantes lluvias en verano y lluvia invernal menor del 5%. Existe una precipitación anual entre 1,500 y 2,000 mm, una frecuencia de heladas entre 20 y 40 días anuales y una frecuencia de granizadas de 3 días al año.

La temperatura media anual es de 12 a 14°C en los cerros más altos de la región (Tancítaro y Paricutín, entre otros); de 14 a 16°C en la mayor parte de la región y de 16 a 18°C en el área más cercana al pueblo de San Juan Nuevo (García, 1981).

Vegetación

La vegetación en su mayor parte está representada por bosque de pino y bosque de pino-encino. Madrigal (1982), menciona la existencia de bosque de oyamel y menciona la presencia de las coníferas *Abies religiosa* var. *emarginata*, *Pinus douglasiana*, *P. lawsonii*, *P. leiophylla*, *P. maximinoi*, y *P. michoacana*. Las especies de encino registradas por Bello y Labat (1987), para el municipio son *Quercus candicans*, *Q. castanea*, *Q. crassipes*, *Q. laurina*, *Q. obtusata* y *Q. rugosa*.

Uso del Suelo.

Los Bosques cubren una superficie total de 10,653 ha (59% de la superficie total). Los recursos forestales son considerados como el recurso más importante para la comunidad de Nuevo San Juan, toda vez que de él se aprovecharon en 1995, entre 90,000 y 100,000 m³ por año, sosteniendo una planta productiva de más de 850 empleos en los aspectos de extracción, abastecimiento, industrialización y comercialización de los principales productos maderables. El uso del suelo en la comunidad indígena de Nuevo San Juan se reporta en la tabla 1.

Tabla 1. Uso del suelo en la comunidad indígena de Nuevo San Juan, Michoacán (SARH, 1988).

Uso del suelo	Superficie (ha)
Forestal:	
Bosques densos	2,323
Bosques abiertos	6,554
Encinares y vegetación en malpaís	1,776
Total forestal	10,653
Agropecuaria:	
Granos y forrajes	4,020
Frutales	1,214
Descanso	800
Total agropecuario	6,034
Lavas y cenizas volcánicas	1,161
Sin definir	288
Total	18,318

Como segunda actividad importante se encuentra la actividad agropecuaria, la cual ocupó para 1995 una superficie de 6,034 ha. De ellas la mayor parte se aprovecha con fines agrícolas con cultivos de maíz, avena, y en menor superficie con plantaciones de frutales como aguacate y durazno. El resto de la superficie se encuentra bajo descanso o cubierto por lava y una pequeña parte actualmente no se aprovecha, debido a que presentan fuertes pendientes dificultando el manejo de los cultivos, la labranza y las labores de cultivo así como la extracción de la cosecha.

Manejo forestal.

La comunidad de NSJ inició desde 1988, un modelo de manejo forestal, con énfasis en la organización comunal, el establecimiento de una industria de transformación, reinversión de utilidades y capacitación permanente del personal técnico y administrativo. Desde el inicio del programa, la comunidad se ha propuesto como meta principal el manejo del arbolado, permitiendo su extracción y regeneración. Con base en un estudio del potencial dasonómico se establecieron los programas de manejo que

abarcen los aspectos de protección, fomento e industria forestal. Además se ha hecho una división de áreas para los aprovechamientos. Así, de las aproximadamente 11,000 ha forestales, se aprovecha un promedio de 1,000 ha al año para la extracción de 80,000 a 100,000 m³, de las especies de pino (*Pinus spp.*), Oyamel (*Abies religiosa*), encino (*Quercus spp.*), y otras especies (SARH, 1988).

A diferencia de otras comunidades de la región, en NSJ la relación entre el aprovechamiento real y el volumen autorizado se ha incrementado del 80% para 1988-1989 al 100% para 1993-1994. Tal incremento se debe al avance organizativo en el manejo del bosque, extracción y su industrialización, ayudado en mucho por la integración que se tiene de los servicios técnicos a través de la unidad de conservación y desarrollo forestal, la cual está integrada como una área más de trabajo dentro del organigrama de la comunidad.

Un aspecto relevante en la actividad forestal de la comunidad ha sido las plantaciones forestales para reforestación, especialmente en las áreas degradadas con arenales y terrenos abandonados. En un lapso de 5 años se han establecido viveros locales, con la colecta de semilla de los bosques comunales, desde donde se han reforestado cerca de 1,300 ha.

El bosque natural de la comunidad indígena de NSJ se aprovecha siguiendo el método conocido como Método de Árboles Padres (ver Grijpma, 1984), que consiste en la remoción de un porcentaje de arbolado, dejando en pie como árboles padres a los mejores individuos, distribuidos en toda el área o en pequeños grupos, con el objeto de asegurar el establecimiento de la regeneración natural.

En NSJ el bosque se encuentra dividido en rodales que son áreas del bosque formadas por árboles de la misma edad, aproximadamente, o de diferentes edades que tienen factores o características comunes como: pendiente, exposición al sol y tipo de suelo.

Los rodales se pueden dividir en subrodales si se comparten características distintivas en el área.

El bosque se aprovecha con un turno de 50 años con un tratamiento cada 10 años: tres aclareos, una corta de regeneración y una corta de liberación.

Descripción general del modelo

El modelo de fijación de carbono CO₂fix, fue desarrollado inicialmente por Mohren y Goldewijk en el Instituto de Investigaciones Forestales y de Ecología Urbana de Holanda en 1990. Está basado en una simulación del ciclo del carbono para rodales ("stands") forestales bajo manejo silvícola. Con el modelo se puede calcular el carbono total capturado a nivel de una plantación.

El modelo original fue programado en Fortran 77 por lo que hubo que adaptarlo a interfaces gráficas usando Borland C++ Ver 4.5. De esta forma el usuario sin mucha experiencia puede acceder y trabajar de forma iterativa con el modelo. Esta tarea de adaptación y mejora del modelo original se llevó a cabo entre el Laboratorio de Bioenergía del Instituto de Ecología de la UNAM y el Instituto Forestal y de Investigación Natural de Holanda y resultó en la versión 1.2 del modelo CO₂fix for Windows (para más detalles ver Mohren *et al.*, 1997).

El modelo CO₂fix se ha aplicado en diferentes ecosistemas forestales en el mundo, incluyendo: bosque tropical lluvioso, bosque boreal, y bosque templado decíduo con una representación de sistemas de silvicultura tradicional como el abeto *Norway spruce* en las montañas centrales de Europa y *Douglas-fir* en el pacífico noroeste de los Estados Unidos; el abeto *slash* en Brasil, el *Pinus caribbea* en Brasil y Venezuela, y el *Pinus radiata* en Nueva Zelanda y Australia (Nabuurs y Mohren, 1993).

OBJETIVO DEL ESTUDIO

Estimar el potencial de captura de carbono en un bosque templado utilizando el modelo de simulación CO₂FIX (Mohren y Goldewijk, 1990; Nabuurs y Mohren, 1993; De Jong *et al.*, 1995; Masera *et al.*, 1997; Ordóñez, 1997, 1998 y 1999).

Contribución de este estudio al conocimiento de la captura de carbono

En nuestro país, son muy pocos los estudios de caso realizados sobre la estimación del potencial de captura de carbono en ecosistemas forestales. Por este motivo, el presente estudio contribuye a: (a) desarrollar un método de estimación del potencial de captura de carbono, basado en un modelo de simulación; (b) indicar los parámetros necesarios para realizar la estimación; (c) sugerir estudios específicos para determinar parámetros que no han sido cuantificados a nivel regional y (d) mostrar el potencial de captura de carbono que tiene un bosque templado del centro occidente del país. Una aportación adicional del estudio es sugerir un método reproducible para obtener la curva de incremento de especies forestales.

Los análisis de sensibilidad realizados sobre cuatro grupos de parámetros claves, carbono contenido en humus, tiempo de residencia en productos forestales, coeficientes de humificación y descomposición y curvas de incremento (ICA), refuerzan la importancia de realizar más estudios detallados a nivel local. Específicamente, habrá que prestar atención especial a una determinación local o regional de los coeficientes de humificación y descomposición, puesto que presentan la mayor sensibilidad en los valores de la captura de carbono con respecto a la estimación base.

METODOLOGIA

Para realizar la estimación de captura de carbono del presente estudio se obtuvo en primer instancia los datos generales del plan de manejo forestal, la superficie forestal, volumen de extracción, productos, incremento corriente anual (ICA), incremento medio anual (IMA), existencias reales (ER), edad promedio, altura, diámetro, ciclo de corta, ciclo de rotación, aclareos, corta de regeneración, corta de liberación. Una vez integrados los datos de diferentes rodales, se procedió a obtener una curva de crecimiento con todos los valores de los rodales, a los datos se les sometió a un análisis estadístico, con la aplicación de regresiones (lineal y exponencial) para aplicar la que mejor represente el comportamiento (crecimiento).

Una vez terminado el análisis estadístico y la obtención de la curva de crecimiento, se procedió a integrar los valores al modelo CO₂FIX y se realizaron los cálculos integrativos de la especie, para estimar de captura de carbono en biomasa, productos, suelo y carbono total.

Parámetros

Los parámetros fueron extraídos del estudio dasonómico del plan de manejo forestal de la comunidad indígena de NSJ (SARH, 1988). Uno de los parámetros más importantes para el modelo es la curva de crecimiento de la especie analizada, es decir el ICA por categoría de edad. Estos datos no son usualmente accesibles directamente de los planes de manejo forestal, por lo que se requiere un trabajo intenso de síntesis e integración de la información de base. En el presente estudio se obtuvo la curva del ICA a partir del análisis estadístico del crecimiento registrado en 210 rodales y subrodales que integran el bosque de la NSJ. Parámetros fisiológicos (e.g., el incremento en volumen de las ramas, las raíces y el follaje, respecto al tronco) y contenido de carbono en suelo, detritus y humus, no estaban disponibles en el plan de manejo, por lo que se

utilizaron datos de estudios de caso comparativos a nivel nacional e internacional (De Jong et al., 1997; Nilsson y Schopfhauser, 1995; Nabuurs y Morhen, 1993).

Escenarios alternativos

Con los datos obtenidos, se generaron dos escenarios: escenario (a) se prolongó el turno de 50 a 80 años y escenario (b) se consideró que todo lo que se extrae del bosque se transforma en productos con un tiempo de vida media de 100 años; manteniendo el turno original de 50 años.

Análisis de sensibilidad

Dadas las incertidumbres y rango de variación de los parámetros necesarios para obtener la captura de carbono se consideró conveniente realizar un análisis de sensibilidad.

Para este fin se seleccionaron tres tipos de parámetros sobre los que se estima existe la mayor incertidumbre en la estimación del potencial de captura de carbono en NSJ. Se aplicaron variaciones en sus valores de -30% y +30% para compararlos con los valores base. El porcentaje de variación se aplicó a los siguientes parámetros:

a) Carbono contenido en el humus

b) Tiempo de residencia promedio en los productos:

tiempo de residencia promedio de madera muerta en el bosque,

tiempo de residencia promedio del papel,

tiempo de residencia promedio del aglomerado,

tiempo de residencia promedio de madera para energía,

tiempo de residencia promedio para empaque,

tiempo de residencia promedio para la construcción,

c) Coeficientes de humificación y descomposición:

Tasa de humificación,

Tasa de residencia promedio del detritus,

Tasa de residencia promedio del humus estable.

Adicionalmente se realizó un análisis de sensibilidad sobre los valores de la curva de ICA derivada estadísticamente, para el periodo entre 0 y 15 años. La razón de este procedimiento es que en NSJ no tienen registrados rodales con estas edades, por lo que existe cierta incertidumbre sobre la correspondencia entre la regresión estadística y los valores reales en esta parte de la curva de incremento. Específicamente, se observa que, para otras especies de *Pinus*, los máximos del incremento ocurren muchas veces en el año 15 y no en el 5 como se estableció para este estudio.

RESULTADOS

Comparando las curvas de incremento del *P. pseudostrobus*, con cuatro especies (*P. caribea*, *P. elliotii*, *P. radiata* y *P. taeda*) cuyo ICA se conoce (Morhen *et al.*, 1997), se encontró que los incrementos correspondientes al año 5 representan entre el 25% y el 53% del valor al año 15, mientras que los incrementos al año 10 representan entre el 71% y el 92% del valor al año 15.

A continuación se describen los principales resultados obtenidos de los cálculos realizados por el modelo CO₂Fix for Windows Ver. 1.2., observando lo siguiente:

a) El balance de carbono en toda el área de estudio (considerada por el modelo como una plantación) se ilustra en la figura 2. Se aprecia el contenido e incremento de carbono en la biomasa, en el suelo, en los productos y la suma de estos tres almacenes que representa el carbono total del bosque.

En la misma figura se aprecia que a los 80 años, la captura de carbono en biomasa y suelo comienza a estabilizarse, mientras que el carbono en productos alcanza esta estabilidad a los 100 años, debido a que el tiempo de producción y descomposición de los productos es diferente al ciclo natural del carbono en el ecosistema forestal. La captura total de carbono crece de forma constante entre los 50 y 100 años y comienza a estabilizarse a partir de este último año.

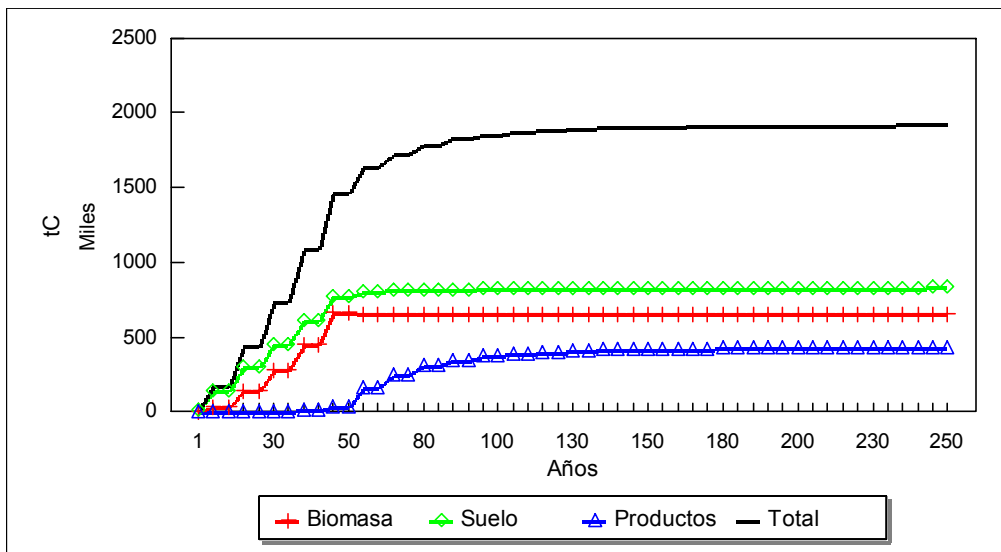


Figura 2. Balance del carbono contenido en la plantación de *Pinus* de NSJ.

b) La figura 3, muestra el balance de carbono en un rodal. Aquí se aprecia el incremento y decremento cíclico, es decir, la dinámica del carbono en cada uno de los diferentes almacenes.

La biomasa, el suelo y los productos presentan un incremento escalonado, donde cada escalón representa cada uno de los cinco tratamientos a los que se ve sometido el rodal. Al realizarse la corta de liberación (a los 50 años) y al ser removida la biomasa forestal, el contenido de carbono en la biomasa decrece hasta cero, mientras que el carbono en los productos y el suelo aumenta. Se observa que el carbono en el suelo, desde su inicio y hasta cinco turnos (250 años) después, se mantiene en cantidades constantes que

solo fluctúan al término de cada turno (cada 50 años). Por otra parte se observa un incremento del carbono en productos después del primer turno. A partir de entonces este reservorio muestra un comportamiento cíclico.

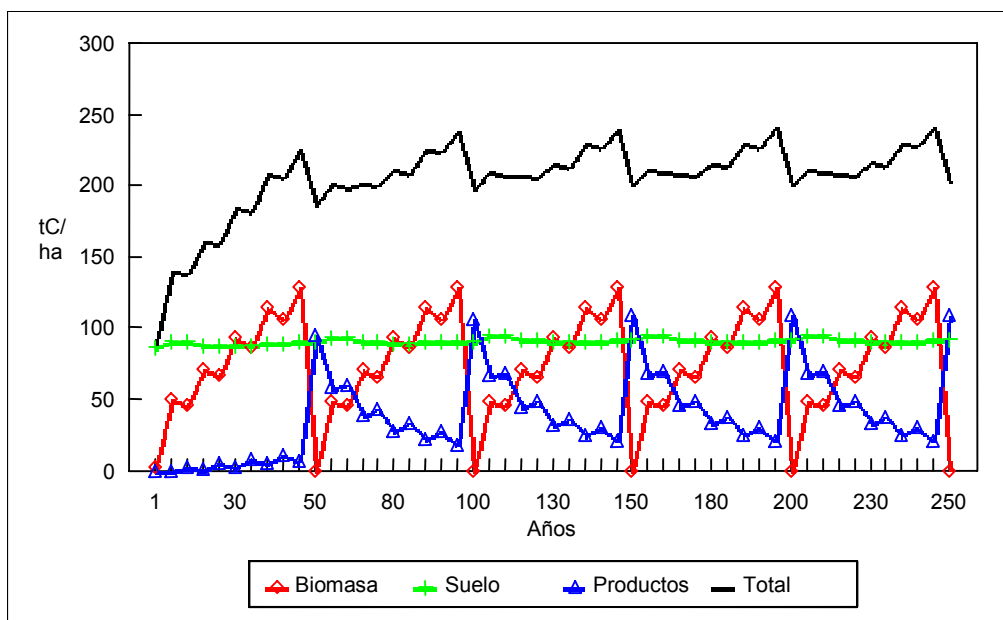


Figura 3. Balance de carbono en un rodal de *Pinus* en NSJ.

El potencial de captura total de carbono estimado para el bosque natural de la C.I. de NSJ mediante el empleo del modelo CO2Fix fue de 1.5 MtC³ a los 50 años, en una superficie de 8870 ha de *Pinus* (Tabla 2 y figura 4). En la tabla 2, se observa que a partir del primer turno, la biomasa presenta un incremento constante en los valores del contenido de carbono hasta los 100 años, momento en que se estabiliza. El contenido de carbono en suelo a partir del año 60 comienza a estabilizarse y se incrementa ligeramente respecto al tiempo; en cuanto al contenido de carbono en los productos es hasta el año 200 en que comienza a estabilizarse (ver representación en la figura 4).

³ 1 Mt (mega tonelada) es igual a un millón de toneladas.

Tabla 2. Captura potencial de carbono en el bosque natural de NSJ.

Años	Biomasa (10 ³ tC)	Suelo (10 ³ tC)	Productos (10 ³ tC)	Total (10 ³ tC)
0	0	0	0	0
10	35.9	141.1	0	177.1
20	139.1	301.1	2.2	442.4
30	278.3	458.3	8.5	745.1
40	455.5	616.1	19.1	1090.8
50	663.7	776.2	33.9	1474.1
60	661.9	810.4	168.7	1641.1
70	661.1	815.7	255.1	1732.1
80	660.6	819.2	311.8	1791.7
90	660.2	821.6	349.5	1831.3
100	659.8	823.3	374.8	1858.1
150	659.8	828.1	421.7	1909.7
200	659.8	831.2	430.3	1921.4
210	659.8	831.7	431.0	1922.6
250	659.8	833.7	432.2	1925.8

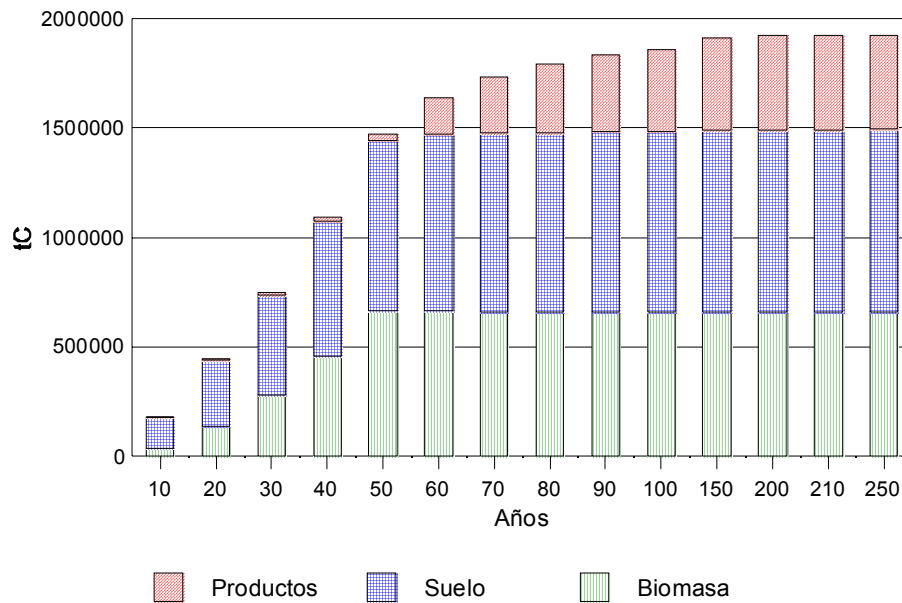


Figura 4. Captura potencial de carbono en el bosque natural de NSJP.

Respecto al contenido de carbono por hectárea, se obtuvo que a largo plazo, la captura total unitaria alcanza 217 tC/ha, de los cuales 94 tC/ha provienen del suelo, 74 tC/ha de biomasa y 49 tC/ha de productos (Tablas 3 y 4).

Tabla 3. Balance de carbono en el bosque natural de NSJ por ha.

Años	Biomasa (tC/ha)	Suelo (tC/ha)	Productos (tC/ha)	Total (tC/ha)
10	4	16	0	20
30	16	34	0	50
40	31	52	1	84
50	51	69	2	123
60	75	88	4	166
70	75	91	19	185
80	75	92	29	195
80	74	92	35	202
90	74	92	35	202
100	74	93	39	206
150	74	93	42	209
200	74	93	48	215
210	74	94	49	217
250	74	94	49	217

Tabla 4. Captura de carbono en el bosque natural de NSJ por ha en el largo plazo (250 años).

Captura de Carbono en el largo plazo (250 años) en tC/ha	
Biomasa	74
Productos	49
Suelo	94
Total	217

Escenarios alternativos

a) Al prolongar el turno a 80 años se observó que la captura total de carbono en el bosque a los cincuenta años era de 0.9 MtC mientras que en el turno de 50 años era de 1.5 MtC, también se observó que al término del turno de 80 años la captura total de carbono fue de 1.6 MtC (figura 5) todavía menos que la captura del bosque con el turno original de 50 años. Sólo en el largo plazo la captura de carbono con un ciclo de 80 años resulta marginalmente mayor que en el ciclo original.

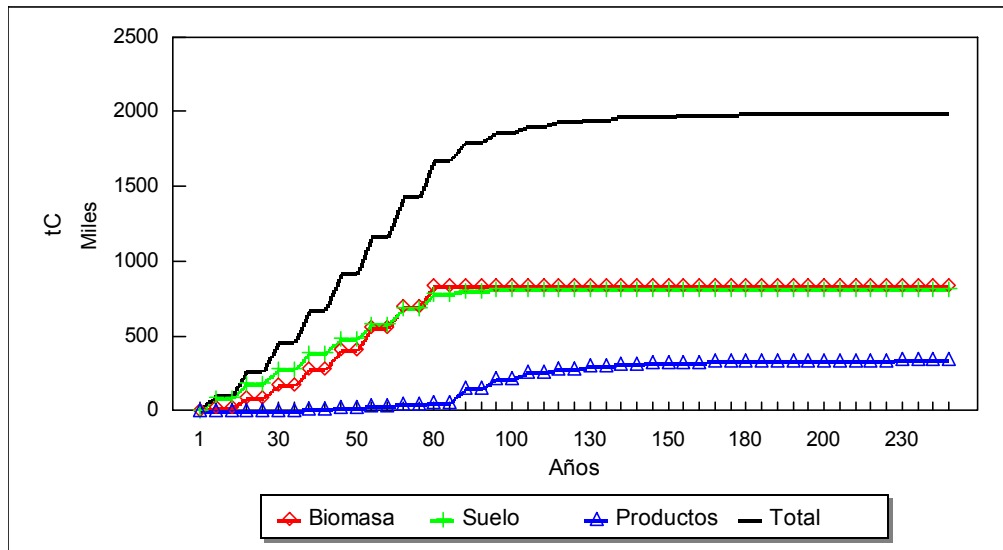


Figura 5. Captura de carbono en la plantación de NSJ, con un turno de 80 años.

b) Al considerar que todo el aprovechamiento del bosque se almacena en productos con un tiempo de vida de 100 años, la captura de carbono en lugar de estabilizarse a lo largo del tiempo continúa creciendo indefinidamente. Por ejemplo el carbono total almacenado se incrementa de 1.4 MtC a los 50 años a 3.0 MtC a los 250 años (figuras 6 y 7).

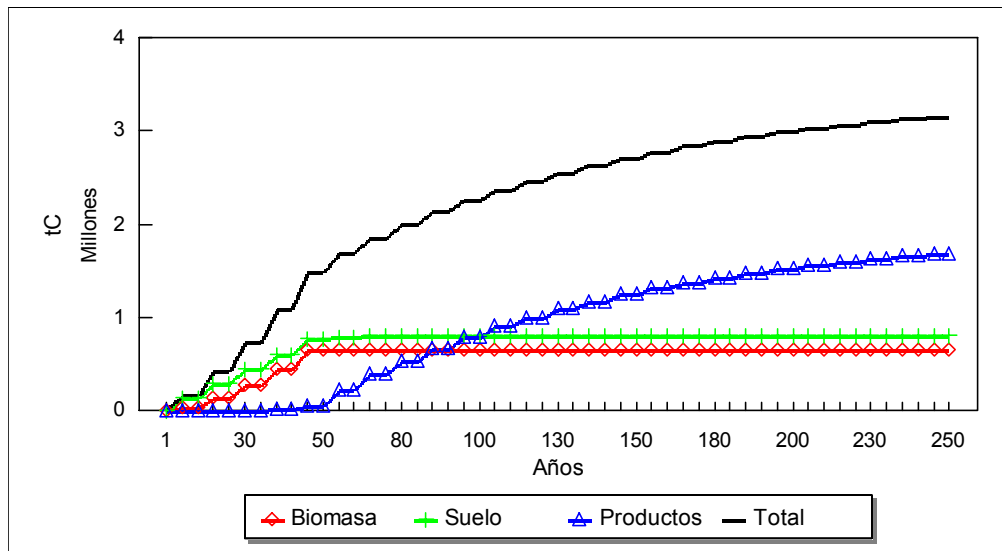


Figura 6. Contenido de carbono para un escenario donde los productos tienen un tiempo de duración de 100 años.

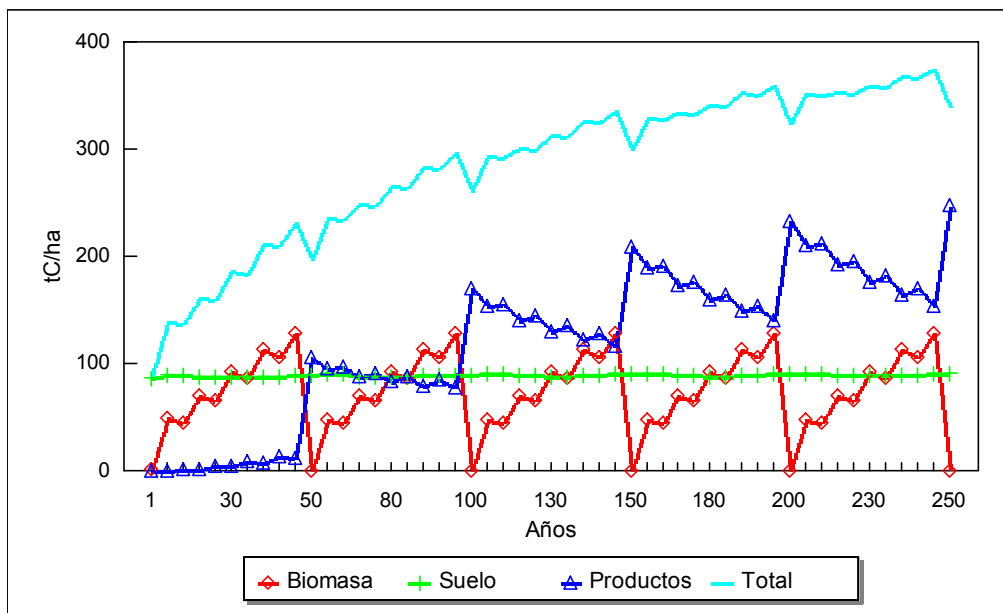


Figura 7. Contenido de carbono en un rodal con productos que tienen una duración de 100 años.

La sensibilidad observada en el análisis es como sigue:

- a) Para el carbono contenido en la biomasa inicial del humus se obtuvo una diferencia de ± 100 KtC con respecto a la estimación base. Esta diferencia (que se observa en la figura 8) tiende a estabilizarse en el largo plazo (cerca de los 500 años). Es decir que aún cuando el desarrollo del bosque comience con una diferencia de más 30% y de menos 30% en el contenido de carbono en el humus en el largo plazo, el carbono total será aproximadamente el mismo.

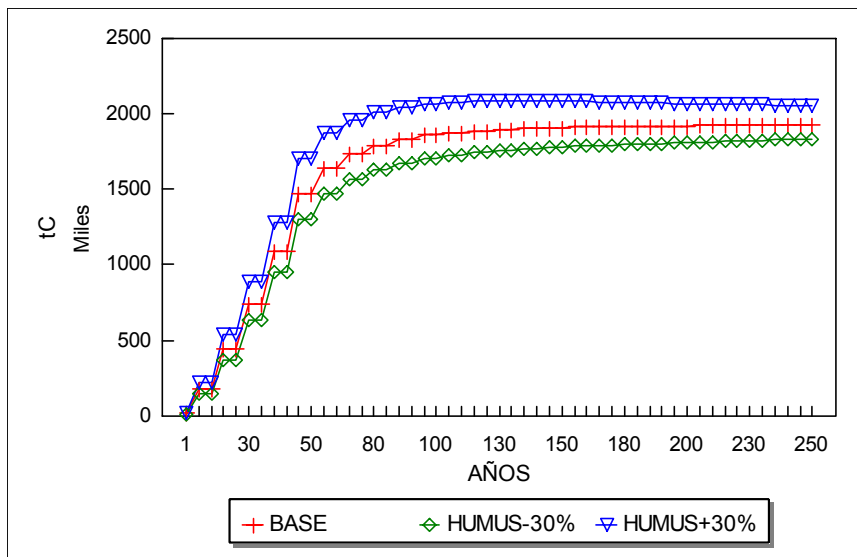
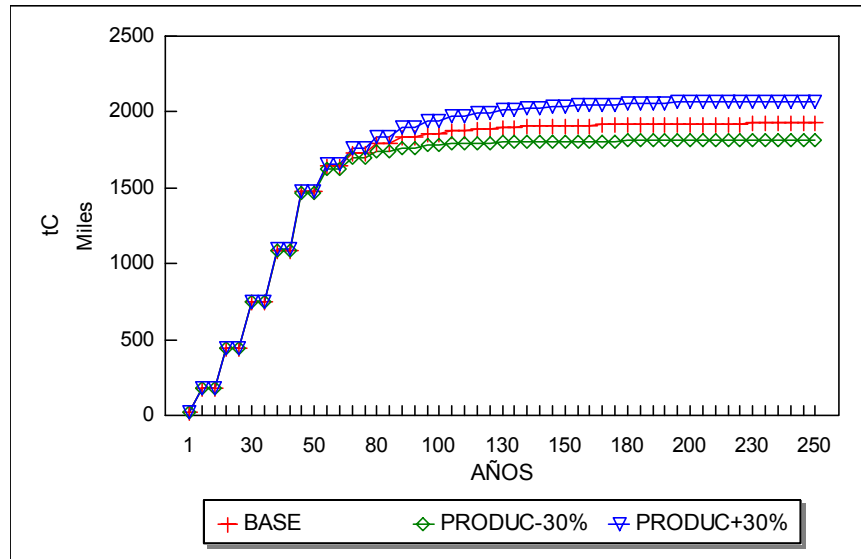


Figura 8. Sensibilidad del carbono contenido en la biomasa inicial del humus en tres casos: base, -30% y +30% respecto al base.

- b) Para el tiempo de residencia promedio en los productos se obtuvo una diferencia de ± 100 KtC en el largo plazo, considerado de 250 años (figura 9). Estas diferencias representan el equivalente a $\pm 5\%$ de la captura de carbono con respecto a la estimación base, por lo que podemos concluir que no es tan crítico utilizar estimaciones generales de los tiempos de residencia ante la ausencia de datos locales

Figura 9. Sensibilidad en el tiempo de residencia promedio en los productos en tres casos: base, -30% y +30% respecto al base.



c) Para los coeficientes de humificación y descomposición se obtuvo una diferencia de ± 300 KtC en el largo plazo. Al término de primer turno la diferencia se incrementa notablemente tanto que al término del quinto turno alcanza 300 KtC. En la figura 10 se observa su comportamiento señalando que el incremento tiende a ser mayor en el largo plazo, esa diferencia es una ganancia muy importante en la obtención de créditos en la captura de carbono mismos que se pueden perder en caso de tener un 30% menor en los coeficientes de humificación y descomposición.

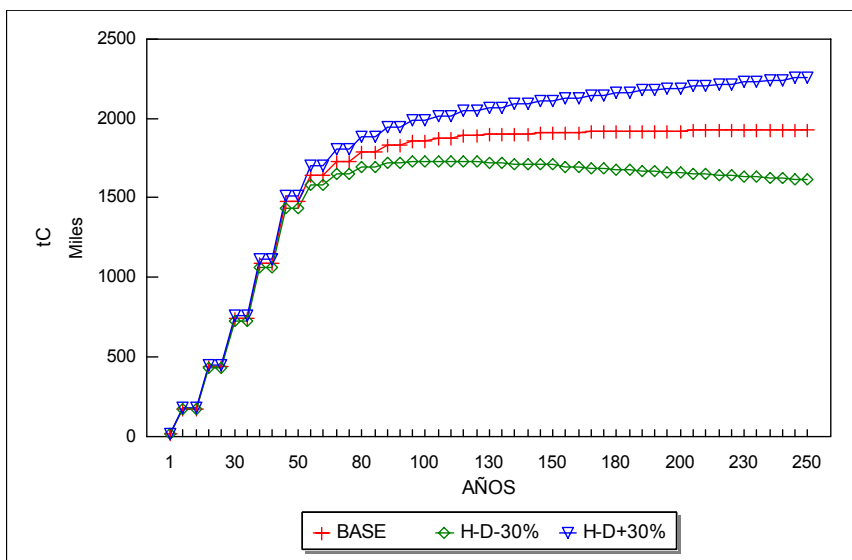


Figura 10. Sensibilidad en los coeficientes de humificación y descomposición en tres casos: base, -30% y +30% respecto al base.

Para observar la sensibilidad de la captura de carbono a posibles diferencias en la parte inicial de las curvas del ICA se ajustó la curva estadística utilizada en la simulación base de acuerdo a los porcentajes de variación indicados anteriormente (por ejemplo, para el ICA al año 5 se usaron valores de 25% y 53% del valor al año 15). El resultado de este análisis, mostró una diferencia en la captura de carbono que va de -10% a un 6% respecto a la estimación base. Como la diferencia no es cuantiosa, se consideró que los valores usados son adecuados para esta primera estimación del potencial de captura de carbono.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

El dióxido de carbono es el gas más importante en el efecto invernadero y por lo tanto uno de los responsables del posible cambio climático. Sin embargo, se tienen todavía incertidumbres muy importantes sobre las emisiones y captura de este gas, particularmente en los ecosistemas forestales. Por esta razón, se requiere de estudios de caso a nivel regional que conlleven a obtener datos más precisos sobre los flujos y almacenes de este gas en los bosques y selvas.

Como resultado del presente trabajo se estimó que:

- C Al término del turno (50 años) la captura potencial de carbono para el bosque de Nuevo San Juan (NSJ) es de 1.5 millones de tC, para una superficie de 8,870 ha del género *Pinus*. En el largo plazo (250 años) esta captura se estabiliza en 1.9 millones de tC, equivalentes a 217 tC/ha.

- C Si se quisiera aumentar la captura potencial de carbono en el área de bosques naturales, la línea más promisoría sería derivar la cosecha de madera a productos con tiempo de residencia muy largos.

- C El análisis de sensibilidad demuestra que la estimación base es bastante robusta a la variación de parámetros críticos. La mayor sensibilidad se presenta con respecto a las incertidumbres con las tasas de humificación y descomposición.

Comparación de estimaciones de captura potencial de carbono con otros estudios

Para saber si la estimación realizada por el modelo es cercana a estimaciones derivadas de muestreo directo, se compararon los resultados obtenidos en la captura de carbono en el largo plazo, con estudios previos. El valor estimado para otras especies de *Pinus* es cercano a la estimación realizada en este estudio, siendo las 217 tC/ha un dato conservador. Es importante resaltar que estudios anteriores no contemplan el carbono almacenado en productos forestales, a excepción del de Nabuurs y Morhen (1993) (Tabla 6).

Tabla 6. Comparación de resultados con estudios previos

Vegetación	Biomasa (tC/ha)	Suelo (tC/ha)	Productos (tC/ha)	Total (tC/ha)	Fuente
Bosque de pino	120	156	n.d.	276	a
Bosque de pino-encino	135	151	n.d.	286	a
Bosque de templado primario	123	134	n.d.	257	b
Bosque templado secundario	90	120	n.d.	210	b
<i>Picea abies</i>	225	121	c.b.	346	c
<i>Pinus radiata</i> en Plantación	136	81	c.b.	217	c
<i>Pinus caribaea</i>	145	91	c.b.	236	c
<i>Pinus pseudostrabus</i>	74	94	49	217	Este estudio

Fuente: a De Jong et al., 1997; b Nilsson y Schopfhauser, 1995; c Nabuurs y Morhen, 1993. n.d. No disponible; c.b. Contenido en la biomasa.

Comparación de escenarios alternativos de captura potencial

Los resultados obtenidos se compararon con dos escenarios: (a) se prolonga el turno de 50 a 80 años y (b) se asigna un tiempo de vida de 100 años a los productos. Como resultado de esta comparación, podemos concluir que alargar el ciclo de rotación produce solamente beneficios marginales en términos de la captura total de carbono y éstos se dan en el muy largo plazo. Por el contrario, transformar la madera extraída en productos de tiempos de vida muy largos produce una ganancia sustantiva en cuanto a la captura total de carbono en los bosques de la comunidad (figura 11).

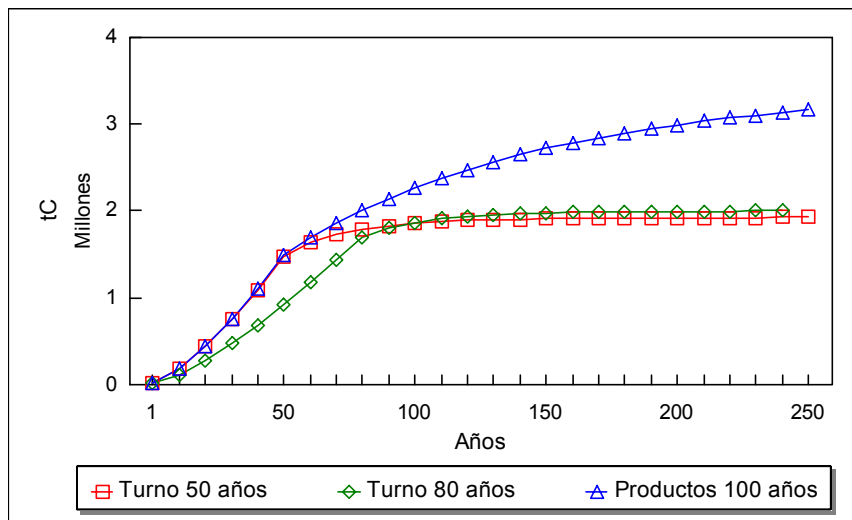


Figura 11. Análisis comparativo de los dos turnos y el incremento en la vida de los productos

Respecto al uso del modelo CO₂Fix, se pudo notar que su versión actual tiene ciertas limitaciones para la estimación de captura de carbono en bosques naturales. Específicamente, sólo trabaja con una especie forestal y no incluye la biomasa contenida en sotobosque. Sería conveniente que futuras versiones el modelo permitan integrar más especies forestales, incluir la biomasa contenida en sotobosque y estimar la captura neta al considerar la biomasa inicial y restarla de la biomasa final.

En cuanto a las ventajas del modelo, además de permitir estimar el potencial de captura de carbono, se tiene:

- C Permite generar escenarios predictivos de la captura de carbono, a corto, mediano y largo plazo, proyectando las tendencias del manejo forestal por tipo de especie forestal.
- C Por su estructura también permite realizar análisis de sensibilidad sobre parámetros que pueden presentar incertidumbre de una manera mejorada y relativamente sencilla.

El presente estudio brinda una primera aproximación al potencial de captura de carbono en la comunidad indígena de NSJ. En estudios posteriores deberá extenderse la estimación de este potencial de captura a otros géneros como los encinos y a las plantaciones que actualmente ha establecido la comunidad. Asimismo sería conveniente usar datos sobre el contenido de carbono en el suelo y sobre tasas de humificación y descomposición de la localidad y no de la literatura.

Para aplicar las estrategias de mitigación propuestas en los rubros de conservación y reforestación, sería conveniente evaluar la captura neta, estableciendo una línea base de captura de carbono en el bosque de NSJ, con el fin de monitorear las emisiones evitadas en base a las actividades que realiza la comunidad. En este trabajo, no fue posible desarrollar una línea de base por el costo que esto implica, además de la necesidad de integración de un equipo multidisciplinario (Tipper y de Jong, 1998; Tipper *et al.*, 1998).

Finalmente, si se toma en cuenta que a nivel internacional se ha fijado un precio aproximado de US \$10/tC por concepto de captura de carbono como "servicio ambiental" en proyectos forestales (Montoya *et al.*, 1995; De Jong *et al.*, 1998), se generaría una derrama económica considerable para la C.I. de NSJ. De hecho,

considerando una captura neta fuera de alrededor de 100 tC/ha, los beneficios estimados serían del orden de \$9 millones de dólares por lo menos. Este recurso ayudaría a conservar los bosques de la comunidad y seguir obteniendo otros beneficios como: conservación de suelo, acumulación de agua, almacenamiento y reciclaje de nutrientes, limpieza del aire y sobre todo conservación y mantenimiento de la riqueza y diversidad biológica del lugar.

REFERENCIAS

- Apps, M.J., W.A. Kurz, R.J. Luxmoore, L.O. Nilsson, R.A. Sedjo, R. Schmidt, L.G. Simpson, y T.S. Vinson. 1993. Boreal Forests and Tundra. In Wisniewski, J. y R.N. Sampson (Eds). Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂. Kluwer Academic Publishers. Holanda. p. 39-53.
- Bello, M.A. y J.N. Labat. 1987. Los encinos (*Quercus*) del Estado de Michoacán, México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. SARH y Centre D' Etudes Mexicaines et Centroamericaines. Collection Etudes Mesoamericaines. México. 98 p.
- Bolin, B., B.R. Döös, J. Jager y R.A. Warrick. 1986. The Green House Effect, Climate Change and Ecosystems. Ed. John Wiley & Sons.
- Brown, S., Ch. Hall, W. Knabe, J. Raich, M. Trexler, y P. Woome. 1993. Tropical Forest: their Past, Present and Potential Future Role In The Terrestrial Carbon Budget. Water, Air and Soil Pollution, 70: 71-94.
- Cherrill, A. and C. McClean. 1995. "An investigation of uncertainty in fiel habitat mapping and the implications for detecting land cover change. Landscape Ecology, 10(1): 5-21.
- Cuanalo de la C.H., E.T. Ojeda, A.O. Santos y C.A. Ortiz. 1989. Provincias y Subregiones Terrestres de México. Colegio de Postgraduados. Centro de Ecología. Chapingo, México. 624 p.
- De Jong, B., G. Montoya-Gómez, K. Nelson, L. Soto-Pinto, J. Taylor, y R. Tipper. 1995. Community Forest Management and Carbon Sequestration: a Feasibility Study from Chiapas, Mexico. Interciencia, 20:6, 409-416.
- De Jong, B., M.A. Cairns, N. Ramírez-Marcial, S. Ochoa-Gaona, J. Mendoza-Vega, P.K. Haggerty, M. González-Espinosa y I. March-Mifsut. 1998. Land-use change and carbon flux between the 1970s and 1990s in the central highlands of Chiapas. Mexico. Environmental Management (Accepted june, 4, 1998)
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler, y J. Wisniewski. 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. Science, 263, 185-190.
- García-Oliva, F. y A. Ordóñez. 1999. El Papel de los suelos forestales en la captura de carbono. Nuestro Bosque. Gobierno del Estado de Michoacán- Comisión Forestal del Estado, Vol. 1, N°1, Pág. 8-11, Oct-Dic.
- García, E. 1981. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). México, D.F. Offset Larios. 3ª ed. Corregida y aumentada 1988.
- Gay, C. y J. Martinez. 1995. Mitigation of Emissions of Greenhouse Gases in Mexico. Interciencia, 20:6, 336-342.
- Grijpma, I.P. 1984. Producción Forestal. Ed Secretaría de Educación Pública (SEP)/Trillas, 3ª Reimpresión. México, D.F. 134 p.

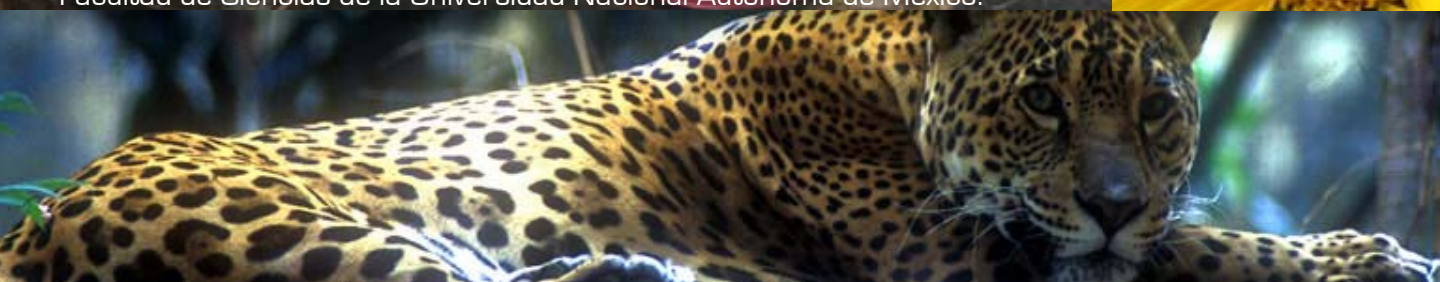
- Goudie, A. 1990. *The Human Impact on the Natural Environment*. Basil Blackwell Ltd, Oxford, U.K. 3th Edition. 388 p.
- Houghton, R.A. y C.M. Woodwell. 1989. Global Climate Change. *Scientific American*, 260:4, 36-40.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1995. *Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Krysanova, V., W. Mueller, and A. Becker. 1998. Development and test of a spatially distributed hydrological/ water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological-Modelling*, 106 (3-2): 261-289.
- Lashof, D.A y D.R. Ahuja. 1990. Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming. *Nature*, 344:5, 529-531.
- Madrigal-Sánchez, X. 1982. *Claves para la Identificación de las Coníferas Silvestres del Estado de Michoacán*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 100 pp.
- Mander, U., A. Kull, V. Tamm, V. Kuusements, and R. Karjus. 1998. Impact of climatic fluctuations and land use change on runoff and nutrient losses in rural landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 41 (3-4):229-238.
- Masera, O., M.R. Bellon, y G. Segura. 1995a. Forest Management Options for Sequestering Carbon in Mexico. *Biomass & Bioenergy*, 8:5, 357-367.
- Masera, O.R., T. Hernández, A. Ordóñez, and A. Guzmán. 1995b. "Land Use Change and Forestry". In: *Preliminary National Inventory of Greenhouse Gases: Mexico*. UNEP PROJECT GF/4102-92-01(PP/3011). Instituto Nacional de Ecología, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, U.S. Country Studies Program. September. Mexico City.
- Masera, O. 1996. "Desforestación y Degradación Forestal en México". Documento de Trabajo No. 19. GIRA, A.C. Pátzcuaro, México.
- Masera, O.R. y J.A. Ordóñez, 1996. *Bosques y Cambio Climático Global: Referencias Seleccionadas*. Reporte al Proyecto Estudio de País sobre Cambio Climático Global, Instituto Nacional de Ecología, U.S, Environmental Protection Agency.
- Masera O., M.J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change*, 35, 265-295.
- Mintzer, I.M. 1992. *Confronting Climate Change. Risk Implications and Responses*. Cambridge, University Press, Cambridge.
- Morhen, G.M.J., J.F. Garza, O. Masera y G.J. Nabuurs. 1997. *User's Manual CO2Fix For Windows: a Dynamic Model of the CO2-Fixation in Forest Stands Version 1.2*. IBN Research Report-Instituto de Ecología de la UNAM. 26 p.
- Mohren, G.M.J. y C.G.M. Klein Goldewijk. 1990. *CO₂ Fix: A Dynamic Model of The Co2 Fixation in Forest Stands*. Rapport NR. 624, Research Institute For Forestry and Urban Ecology, Wageningen.
- Nabuurs, G.J. y G.M.J. Mohren. 1993. *Carbon Fixation Through Forestation Activities: a Study of the Carbon Sequestering Potential of Selected Forest Types*, Commissioned by the Foundation Face.

- Report Ibn 93/4. Institute for Forestry and Nature Research, Forests Absorbing Carbondioxyde Emission. Netherlands. 206 p.
- Nilsson, S. y W. Schopfhauser. 1995. The Carbon-Sequestration Potential of a Global Afforestation Program. *Climatic Change*, 30, 267-293.
- Ordóñez, A. 1999. "Captura de Carbono en un Bosque Templado: El Caso de San Juan Nuevo, Michoacán". Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP. México DF. Junio. 72 p.
- Ordóñez, A. 1998. Estimación de la Captura de Carbono en un Estudio de Caso para Bosque Templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad de México.
- Ordóñez, A. 1998. El modelo CO₂Fix. Memorias del Taller de Metodologías para la Evaluación de la Captura de Carbono en el Area Forestal. México, D.F., Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP. marzo 19-20.
- Ordóñez, A. 1997. Estimación del Potencial de Captura de Carbono. Memorias del Taller de Captura de Carbono para la Región de los Tuxtlas. Veracruz, Ver., Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP. agosto 8.
- Ordóñez, A. 1997. El Modelo CO₂Fix. http://www.ine.gob.mx/INE/documentos/ucci/cam_clima/chi18.htm
- Ordóñez, A. 1997. Estimación del Potencial de Captura de Carbono para un Estudio de Caso de Bosque Templado en Nuevo Parangaricutiro, Mich. Resultados Preliminares. Memorias del Taller sobre Proyectos de Secuestro de Carbono e Implementación Conjunta. Tuxtla Gutierrez, Chiapas. abril 11-12.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1988. Estudio de Manejo Integral del Recurso Forestal en la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan, Michoacán, Municipio de Nuevo San Juan, Michoacán. Jefatura del Programa Forestal en el estado de Michoacán, Distrito de Desarrollo Rural Integral 087, Uruapan, Michoacán, Comisión de Silvicultura de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan, Michoacán. 800 p.
- Tipper, R. 1998. Update on carbon offsets-Apps, M.J., W.A. Kurz, R.J. Luxmoore, L.O. Nilsson, R.A. Sedjo, R. Schmidt, L.G. Simpson, y T.S. Vinson. 1993. Boreal Forests and Tundra. In Wisniewski, J. y R.N. Sampson (Eds). *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 39-53.
- Schneider, S.H. 1989. The Greenhouse Effect: Science and Policy. *Science*, 243:10, 271-281
- Varela, S., P. García, R. Cardoza y V. Sosa. 1995. Marco de Referencia sobre Estimaciones de Deforestación en México. Documento presentado al Grupo de Trabajo sobre Deforestación. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), México, D.F.
- Wilson E.O. 1999. The Diversity of life. W.W. Norton & Co. New York. 424 p. *Tropical Forest Update*, 8:1, 2-5.

Capítulo IV

Como entender: el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales¹

¹Publicado como: Ordóñez, J.A.B. 2008. Como entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago por servicios ambientales. Ciencias. Número 90: 37-42 (abril-junio). Facultad de Ciencias, UNAM. Aceptado el 22 de febrero del 2007, para su publicación en la revista **Ciencias** de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Como entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales¹

J.A.B. Ordóñez

Resumen

Este ensayo describe los diferentes métodos de manejo forestal usados en México y define los conceptos de contenido y captura de carbono. Dichos temas han cobrado especial relevancia, derivada tras el reconocimiento mundial del cambio climático y la valoración de los servicios ambientales que nos proveen los ecosistemas forestales.

Abstract

This essay discusses the different forest management methods used in Mexico, defining the concept of carbon content and sequestration, topics that have been acquired special relevance, with the global recognition of climatic change and the appreciation of the environmental services that the forests ecosystems provide.

Key words: Manejo forestal, captura de carbono, México, servicios ambientales.

¹ Aceptado el 22 de febrero del 2007, para su publicación en la revista **Ciencias** de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Citar como: Ordóñez, J.A.B. 2008. Como entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago por servicios ambientales. *Ciencias*. Número 90: 37-42 (abril-junio). Facultad de Ciencias, UNAM.

Justificación

Uno de los problemas ambientales más severos al que nos enfrentamos en el presente siglo, es el cambio climático, el cual se debe al incremento en las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono, clorofluorocarburos, óxidos de nitrógeno y metano; que se derivan de actividades tales como el uso de combustibles fósiles para la producción de energía y transporte; los procesos derivados del cambio en el uso del suelo, deforestación, incendios forestales y producción de cemento entre las principales.

La preocupación mundial para mitigar el efecto de dichos gases, ha dado lugar a una política internacional dirigida a entender los procesos de generación y absorción de ellos. Esto ha permitido reconocer la importancia de los ecosistemas terrestres y, en particular el papel que tiene la vegetación para captar el dióxido de carbono atmosférico por medio de la fotosíntesis, para incorporarlo a las estructuras vegetales y, de esta forma, reducir la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, mitigando, en el largo plazo el cambio climático. De ahí se desprende la importancia de entender el manejo forestal, el concepto de captura de carbono y aceptar la responsabilidad de nuestras emisiones a través del pago de servicios ambientales.

El manejo forestal

La palabra silvicultura que significa “cultivo del bosque” y es el arte de producir y manejar un bosque por medio de la aplicación de la biología y las interacciones ecológicas de la especie en cuestión de manera continua, con el fin de obtener de la corta de árboles utilidades sostenidas y otros beneficios. Por ello, la silvicultura es hoy considerada como una ciencia mediante la cual se crean y conservan no solo los bosques, sino cualquier masa forestal, aprovechándola de un modo continuo con la mayor utilidad posible y teniendo especial cuidado en su regeneración, ya sea de tipo natural o artificial.

El manejo forestal, implica la manipulación de las masas forestales con el propósito de obtener una serie de productos tales como madera, tablas, pilotes, morillos, leña, resina, celulosa, mejores semillas, entre otros, los cuales se utilizan directamente o se transforman y permiten un beneficio mediano (los productos que se obtienen son a largo plazo, ya que el aprovechamiento de los árboles va desde los cinco a los sesenta años, por ello es necesario tomar en cuenta el ciclo de vida de la especie o especies en cuestión, que se pretenda manejar). Aunado a esto, las masas forestales también nos ofrecen otros beneficios como protección del suelo, regulación microclimática, cortina de vientos, mitigación de la movilidad en sustratos arenosos, hace la función de pulmón en áreas urbanas, permiten de la conservación de la biodiversidad y la captación y almacenamiento de agua, además de la fijación o captación de carbono.

En nuestro país existen diferentes métodos de manejo forestal, que se adecuan a condiciones diferenciales como edad, composición, estructura, ubicación y pendiente - entre las principales variables-; y están enfocados a cubrir ciertos objetivos que demandan dichas variables, en conjunto con las demandas de los propietarios, por lo que son un claro ejemplo de la integración de intereses (cuadro 1).

Cuadro 1. Métodos de manejo forestal usados en México

a) **El Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI)**. Permite el aprovechamiento de un bosque irregular con poblaciones y rodales incoetáneos, es decir, una composición de árboles de diferentes edades y en algunos casos también de especies. Algunos de sus objetivos son mantener la productividad del bosque sin alteraciones, al final del ciclo de corta se recupera la existencia real inicial; regular la densidad, distribución y composición; crear las condiciones favorables para la regeneración natural, y mantener la condición de irregularidad y sanidad en los rodales bajo manejo.

b) **El Método de Desarrollo Silvícola (MDS)**. Logra el establecimiento de un bosque regular, el cual debe estar formado por un conjunto de poblaciones o rodales coetáneos, es decir, de árboles con edades uniformes, preferentemente de un mismo género. Sus objetivos son captar al máximo el potencial productivo del suelo (conocido también como calidad de sitio), con el uso de técnicas silvícolas apropiadas a las condiciones del bosque, y lograr un rendimiento sostenido en cada intervención programada, esto es, obtener igual volumen y distribución de productos al conseguir un bosque regular.

c) **El Sistema de Cortas Sucesivas de Protección (SICOSUP)**. Este sistema silvícola consiste básicamente en la aplicación regulada de las siguientes tres cortas periódicas de regeneración en el área que se designe para regenerar la masa forestal: semillación, secundaria y liberación. Los intervalos entre cada una de ellas pueden ser de cuatro a diez años, ya sea en rodales completos o en franjas continuas o alternas, donde se pretende establecer la regeneración en forma paulatina bajo la protección de un cierto número de árboles semilleros. En el resto del bosque se aplican cortas intermedias que pueden ser aclareo, corta de rescate o corta de saneamiento.

d) **El Sistema Silvícola de Selección (SISISE)**. Con la aplicación de éste método, se pretende conservar la irregularidad del bosque donde ya existe -o tratar de conseguir- una estructura regular incoetánea balanceada. Sus objetivos son lograr la normalidad de un bosque irregular, que consiste en una estructura compensada en términos de los diámetros y, con la composición volumétrica anterior y sus incrementos, propiciar en forma constante y sostenida el rendimiento más favorable.

e) **El Sistema Silvícola de Cortas a Matarrasa (SICOMA)**. Consiste en la remoción, de aquellas masas que van llegando a su madurez o final del turno; por lo que la regeneración natural se logrará a partir de semillas dejadas en el suelo y de los árboles en pie adyacentes al área de corta; también se puede hacer la regeneración artificial por medio de siembras o plantaciones. Con la aplicación del sistema de cortas a matarrasa se tiene previsto establecer un bosque regular; su objetivo es lograr la remoción del bosque en forma gradual, induciendo la regeneración natural o haciendo plantaciones para llegar a formar un bosque regular.

El carbono y su captura

La fijación de carbono por bacterias y animales, es otra manera de disminuir la cantidad de bióxido (o dióxido) de carbono disponible, aunque cuantitativamente menos importante que la fijación de carbono que realizan las plantas y el intercambio gaseoso de los océanos.

Dentro del contexto forestal, una vez que el dióxido de carbono atmosférico es incorporado mediante la fotosíntesis a los procesos metabólicos de la vegetación (e.g., cubierta vegetal, masa forestal, sistema agroforestal, cultivo, plantación entre los principales), este dióxido de carbono participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que una planta pueda desarrollarse, ya que, por ejemplo, el árbol al crecer va incrementando su follaje, sus ramas, flores, frutos, yemas de crecimiento, así como la altura y el grosor de su tronco (que en su conjunto conforman la copa). La copa necesita espacio para recibir energía solar sobre las hojas, lo que da lugar a una competencia entre las copas de los árboles por la energía solar, originando a su vez un dosel cerrado. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo (como la capa de hojas que reciben el nombre de mantillo), misma que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable, que a su vez aporta nuevamente dióxido de carbono al entorno y da continuidad a otros procesos conocidos con el nombre de ciclos biogeoquímicos.

Simultáneamente, los troncos, al ir incrementando su diámetro y altura, alcanzarán un tamaño adecuado para su aprovechamiento comercial; se extraen productos como tablas, tablones y polines, que darán origen a subproductos elaborados como muebles y casas. Estos productos finales tienen un tiempo de vida determinado después del cual se degradan, aportando dióxido de carbono al suelo o a la atmósfera.

Finalmente, durante el tiempo en que el carbono se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol y hasta que es reemitido (ya sea al suelo o a la atmósfera), se

considera que se encuentra almacenado. En el momento de liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica o la quema de la biomasa) el dióxido de carbono fluye para regresar al ciclo del carbono.

La estimación de la captura de carbono no es un tema simple, ya que presenta muchas variables que hacen este rubro un tanto un cuanto difícil de estimar; concretamente se refiere a la cantidad de carbono fijado en la biomasa de organismos vivos que se gana año con año (es decir crecimiento). Los estudios principalmente consideran a los ecosistemas forestales y la información previa para la estimación de la captura de carbono parte de un inventario forestal (detalle del cálculo en el cuadro 2) expresado en metros cúbicos por hectárea y el incremento corriente anual expresado en metros cúbicos por hectárea al año (es decir crecimiento o ganancia de biomasa).

Cuadro 2 Estimación del contenido y captura de carbono partiendo del inventario de las existencias reales por especie y por rodal.

Una vez rodalizada la masa forestal y teniendo el inventario, se aplica la siguiente ecuación:

$$C_{AER} = E.R. * \delta * CC$$

Donde:

C_{AER} = Carbono almacenado por especie y por rodal tC/ha

E.R. = Existencias Reales m³/ha

δ = Densidad de la madera para cada especie expresada en t/m³

CC = Contenido de carbono (valor por defecto IPCC, 2003) 0.45

Una vez estimado el carbono almacenado por especie y por rodal (C_{AER}), se suman los valores obtenidos de las especies contenidas en el rodal y el resultado es el carbono almacenado por rodal (C_{AR}) que se expresa en tC/ha, a continuación, para saber cuanto carbono se encuentra almacenado en cada rodal, se procede a multiplicar la superficie del rodal por el C_{AR} , y se obtiene tC (o Megagramos de carbono, MgC) por rodal.

El potencial de captura de carbono, se estima a partir del incremento corriente anual por especie, estimado para cada hectárea muestreada:

$$P_{CC} = I.C.A. * \delta * CC$$

Donde:

P_{CC} = Potencial de captura de carbono tC/ha/año

I.C.A. = Incremento corriente anual m³/ha/año

δ = Densidad de la madera para cada especie expresada en t/m³

CC = Contenido de carbono (valor por defecto IPCC, 2003) 0.45

El factor de expansión usado para incrementos dependerá de la especie o grupos de especies en cuestión; por defecto se usa el valor de 1.1 aproximadamente (chechar IPCC 2006).

Al final se multiplica con un factor de expansión que dependerá de la especie o grupos de especies en cuestión; por defecto se usa el valor de 1.3 aproximadamente.

Pago por servicios ambientales

Existen un mercado incipiente en el pago por los servicios ambientales y el precio por fijación de carbono es variable y dependerá de las oportunidades del mercado que rigen la oferta y la demanda o de las estrategias gubernamentales que se han desarrollado para este fin (detalle en el cuadro 3). El precio se paga por tonelada de carbono fijado por hectárea y existen cuotas mínimas de fijación para el mercado establecido en los mecanismos de desarrollo limpio, así como un mercado voluntario donde incide el grueso de los posibles proyectos de carbono y donde muchas empresas emisoras y comunidades poseedoras de áreas con vegetación que pueden ofrecer el servicio ambiental, necesitan de un esquema regulatorio, con monitoreo evaluación, certificación de la captura o fijación de carbono. Así mismo podrían en el corto, mediano y largo plazo tener una importante cartera de proyectos que retribuyan por este servicio ambiental.

Cuadro 3. Pago del servicio ambiental de captura de carbono en México.

El pago por servicios de captura de carbono para la mitigación del cambio climático, se inicia el año de 2004 con el fin de pagar por la producción de bióxido de carbono equivalente (CO₂ e) adicional a lo largo de los cinco años del Programa.

La aprobación del pago para la ejecución del proyecto de servicios ambientales por captura de carbono, deberá aplicarse a Proyectos de pequeña escala y sujetarse a los siguientes criterios:

- 1) La formulación de proyectos deberá apegarse a los lineamientos, modalidades y procedimientos del Fondo Prototipo de Carbono del Banco Mundial o a los sancionados por la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Cambio Climático de Naciones Unidas, conforme a los términos de referencia que la Comisión Nacional Forestal de a conocer en su página de la red.
- 2) Los proyectos deberán demostrar un potencial de captura anual adicional de entre 4,000 y 8,000 toneladas de dióxido de carbono equivalente o hasta 40,000 toneladas de captura distribuida en un periodo de cinco años.
- 3) La superficie de cada Proyecto podrá integrar diferentes sistemas de producción forestal o agroforestal, incluyendo áreas de restauración o reforestación, a menos que éstos ya reciban algún pago del Gobierno Federal por la prestación de otro servicio ambiental.
- 4) Los pagos anuales se realizarán con los resultados del estudio del potencial de captura por arriba de la línea base presentados en el proyecto. Se harán cuatro pagos anuales equivalentes al 20% de la captura adicional total estimada en los cinco años, y un pago de finiquito que estará en función de la captura adicional verificada al final del quinto año. Cada pago deberá ser instruido por el comité. Al finalizar el periodo contratado en la carta de adhesión, se realizará la verificación de captura de carbono total alcanzada en el periodo de cinco años, a partir de la cual se realizará un ajuste final de los cuatro pagos realizados cada año, con la finalidad de balancear la correspondencia entre pagos realizados y existencias de carbono adicional con respecto a la línea base.
- 5) Las superficies bajo manejo para el aprovechamiento de recursos maderables en bosques, selvas, zonas áridas y semiáridas, podrán ser elegibles únicamente en sus áreas de aprovechamiento en estado de reposo durante al menos los próximos siete años, lo cual deberá demostrarse con el respectivo Programa de Manejo autorizado por la Semarnat.
- 6) El pago por tonelada se determinará en función del cumplimiento de criterios ambientales y sociales que además de constituirse en parámetros de calificación de solicitudes, ayudarán a determinar un precio base, el cual otorgará valoración diferenciada que refleje las preferencias del mercado. Por cada punto acumulado con base en los conceptos para valoración diferenciada, se pagarán 1.19 pesos M.N. adicionales al precio base de 50 pesos M.N. por tonelada de dióxido de carbono equivalente, de tal manera que se pagará un mínimo de 50 y máximo de 100 pesos M.N. por tonelada de dióxido de carbono equivalente.

Fuente: Diario Oficial de la Federación con fecha del miércoles 24 de noviembre del año 2004, Segunda Sección, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Breves conclusiones

El sector forestal en nuestro país y a nivel internacional, es la segunda fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (principalmente dióxido de carbono), debido a procesos como deforestación, tala ilegal, cambio en el uso del suelo e incendios forestales. Es por ello que, el manejo forestal, es una de las opciones más importantes para promover por un lado, la mitigación de emisiones de dióxido de carbono y por otro, el desarrollo forestal sustentable, por medio de la puesta en marcha del pago de servicios ambientales y del posible mercado que se genere a través de los mecanismos de desarrollo limpio. Es importante, por tanto entender y definir claramente la relación que existe entre el manejo forestal, la captura de carbono y el pago por servicios ambientales.

En la Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, efectuada en Río de Janeiro en 1992, se adoptó una declaración no formal que enfatiza la importancia de incorporar los costos y beneficios ambientales en los mecanismos de mercado con el fin de lograr una mejor aceptación para la conservación y manejo sostenible de los recursos forestales en el ámbito local, nacional e internacional.

Además los acuerdos hacen hincapié en que para disminuir los incrementos de niveles de emisiones de gases con efecto invernadero se puede descontar en los balances nacionales la captura que se genera por medio de proyectos forestales financiados en cualquier lugar. Con estos acuerdos se abrió la posibilidad de incluir costos y beneficios ecológicos en los sistemas de manejo de los recursos naturales (en especial los recursos forestales, dado que representan los más altos niveles de servicios ecológicos, como son la captura de carbono y la conservación de biodiversidad, suelo y agua).

Esto a su vez abre la oportunidad de incluir estos servicios ecológicos en los mecanismos de mercado. Para el sector forestal implicaría un aporte sustancial en la

relación de costo-beneficio en las áreas de producción de materia prima. Es decir, se puede establecer un acuerdo entre una institución que tiene la obligación de reducir sus niveles netos de emisión de carbono y un productor o grupos de productores forestales para manejar sus recursos forestales con uno de los fines: la fijación de carbono o la captación de agua.

Dependiendo de los niveles de captura de carbono y el destino final de producto se puede calcular, bajo diferentes escenarios de manejo, la cantidad total del carbono fijado en un tiempo definido.

Cabe señalar que los análisis económicos para evaluar los sistemas productivos sólo incluyen los precios de los productos cosechables -como árboles en el caso de sistemas forestales- y en general no incluyen el valor que representa el remanente después de la cosecha ni los valores ecológicos de los sistemas.

Afortunadamente, en México se ha puesto en marcha un Acuerdo publicado en el Diario Oficial de la Federación con fecha del miércoles 24 de noviembre del año 2004, donde establece las Reglas de Operación para el otorgamiento de pagos del Programa para desarrollar el mercado de servicios ambientales por captura de carbono y los derivados de la biodiversidad, y para fomentar el establecimiento y mejoramiento de ecosistemas forestales y sistemas agroforestales (PSA-CABSA). La finalidad es realizar una evaluación eficiente y objetiva de las solicitudes para la elaboración de estudios y la ejecución de proyectos de captura de carbono y reducción de emisiones. Por ello establece términos de referencia para la elaboración de proyectos de captura de carbono y reducción de emisiones -con nueve puntos a considerar- así como los términos de referencia para la ejecución de tales proyectos -que contempla once puntos a considerar para su evaluación.

Podemos concluir que el pago por el servicio ambiental de captura de carbono, es el pago por un proceso fisiológico que ocurre en la vegetación, el cual se cuantifica por

medio del crecimiento (incremento) de los árboles (principalmente) y el manejo forestal *per se*; este último implica la aplicación del conocimiento del ciclo biológico de la vegetación con el fin de tratar de aumentar la masa forestal en menor tiempo y extraer de ella productos, sin dejar de lado la diversidad del germoplasma.

Nuestro país ha dejado de lado el desarrollo forestal integral, siendo que tiene una gran aptitud forestal. Ahora tenemos tasas de deforestación que rebasan las 800,000 hectáreas al año. La tala clandestina no es manejo forestal y da lugar al deterioro ambiental y pérdida de los servicios ambientales con un costo que no podemos pagar.


Referencias:

- Burstein, J., G. Chapela, J. Aguilar y E. de León. 2002. Informe sobre la propuesta de pago por servicios ambientales en México. 101p.
- Carrillo, A. 2001. Disponibilidad de pago por servicio ambiental que suministra el Cerro de Cacahuatique en la microcuenca del Río Guayabo, en la Provincia de Morazán, El Salvador.
- Christensen Jr., N. y J. Frankling. 1997. Ecosystem function and ecosystem management. En: R. D. Simpson y N. Christensen Jr. (editores). Ecosystem function and human activities: reconciling economics and ecology. International Thomson Publishing, New York, N.Y.
- Comisión Forestal de Michoacán (COFOM). 1998. Modelo de promoción para la organización de unidades socio-productoras de materias primas forestales. Gobierno del Estado de Michoacán, Comisión Forestal, Dirección de Planeación y Desarrollo forestal. Morelia, México. Pp. 1 – 43.
- Constanza, R., R. Darge, R. Degroot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V.O'Neil, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton, and M. Vandenbelt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, núm. 387, pp. 253-260
- Daily, G.C., S. Alexander, P.R. Ehrlich, L. Goulder, J. Lubchenco, P.A. Matson, H.A. Mooney, S. Postel, S.H. Shneider, D. Tilman y G.M. Woodwell. 1996. Ecosystems services: Benefits supplied to human societies by natural ecosystems. *Issues in Ecology*, núm. 2, pp. 1-16.
- Diario Oficial de la Federación con fecha del miércoles 24 de noviembre del año 2004, Segunda Sección, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry.
- Fragoso, P. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea de las especies maderables del predio Cerro Grande municipio de Tancítaro Michoacán, México. Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez". UMSNH. 65 p.
- 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, Cuadernos de Trabajo núm. 4. México, D.F.
- Scott, M. J., G.R. Bilyard, S.O. Link, C.A. Ulibarri, H.E. Westerdahl, P.F. Ricci y H.E. Seely. 1998. Valuation of ecological resources and functions. *Environmental Management*, núm 22(I), pp. 49-68.



Capítulo V

Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico¹



¹Publicado como: 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. Received 13 September 2005, received in revised form 29 November 2007; accepted 5 December 2007.

Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different
land-use and land-cover classes in the Central Highlands of
Michoacan, Mexico¹.

J. A. B. Ordóñez¹, B. H. J. de Jong², F. García-Oliva³, F. L. Aviña³,
J. V. Pérez³, G. Guerrero³, R. Martínez³ and O. Maserá³

¹ Corresponding author. Estudiante del Programa Doctoral en Ciencias Biomédicas, Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Address: Sur 127 N° 43 Colonia Minerva, México Distrito Federal, C.P. 09810 Telephone: 52+ 55 55822462 fax: 52+ 55 55822462
e-mail: bordonez@oikos.unam.mx

² El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Villahermosa. A. P. 1042, Admin. de Correos 2, Col. Atasta, Villahermosa, Tabasco, México. C. P. 86100.

³ Centro de Investigación en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), A. P. 27-3 Xangari, Morelia, Michoacán, México. C. P. 58120.

KEY WORDS: Carbon stocks, aboveground biomass, litter, soil, Highlands, Central Mexico, montane forest.

¹ Please cite this article as: Ordóñez, J.A.B., B.H.J. de Jong, F. García-Oliva, F.L. Aviña, J.V. Pérez, G. Guerrero, R. Martínez and O. Maserá. 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.
Received 13 September 2005, received in revised form 29 November 2007; accepted 5 December 2007.

ABSTRACT

In this study we estimated the carbon content in vegetation, litter, and soil, under ten different classes of land-use and land-cover classes (LU/LC) in the Purepecha Region, located in the Central Highlands of México. Forests in this area are representative of the montane forests of Central and Southern Mexico and are subject to rapid degradation and deforestation by human pressure.

Carbon data for each of the LU/LC classes and the main pools (vegetation, soil and litter) were collected at 92 sites in 276 field plots of 0.1ha each, based on a “nested” design which allows the collection of samples and their replicates. The following LU/LC classes were identified: Pine forest, Oak forest, Pine-oak forest, Fir forest, Plantation, Agricultural fields, Grasslands, Scrublands, Avocado plantation and Degraded Forests.

The following results were obtained: a) carbon content in vegetation ranged from 0.2 (grasslands) to 169.7 (fir forest) Mg C ha⁻¹; b) carbon content in litter ranged from 0.6 (agriculture) to 4.1 (fir forest) Mg C ha⁻¹, and c) carbon content in soil from the 0 to 30 cm depth, ranged from 72.8 (degraded forest) to 116.4 (oak forest) Mg C ha⁻¹.

Forest classes (Pine, Oak, Fir and Pine-oak forest) presented the highest total carbon stocks with values ranging between 220.7 to 266.9 Mg C ha⁻¹; Degraded forest contained 169.2 Mg C ha⁻¹; Plantation 142 Mg C ha⁻¹ and Avocado orchards reported 156.1 Mg C ha⁻¹; scrublands 121 Mg C ha⁻¹; grasslands 90.8 Mg C ha⁻¹ and agriculture 82.7 Mg C ha⁻¹; The total carbon stock in the last three classes was mainly found in the soil. The results of the present study are relevant for national inventories of carbon stocks and can be used to derive greenhouse gas emissions (GHG), once the land-cover change dynamics are known.

INTRODUCTION

During the last century, the carbon dioxide (CO₂) concentration in the atmosphere has increased from 280 to 367 parts per million (IPCC, 2001). The land use-land cover change sector is the second most important source of CO₂ emissions (IPCC, 2001) as forest areas are rapidly changing into agriculture, livestock, and other man-made vegetation and degraded areas (Lambin, 1994). Additionally, studies at the regional level are needed to improve national greenhouse gas inventories, and could be developed as a basis for regional baselines of carbon sequestration projects in the forestry sector (Brown *et al.*, 2004).

Deriving more accurate estimates of emissions from LU/LC change processes is particularly important for Mexico as this sector constitutes the second largest source of CO₂ emissions after fossil fuel emissions (Ordóñez and Masera, 2001). Emissions from the land-use, land-cover and forestry sector (LULUCF), estimated at 43 GgC/yr (Masera *et al.*, 2000), come mostly from deforestation and forest degradation. Annual deforestation rates in Mexico are among the highest in the world, and were estimated at more than 500,000 ha per year in the 1990s (Velazquez *et al.*, 2002).

A critical first step in assessing carbon emissions from deforestation and forest degradation is the estimation of carbon stocks in the main forest and non-forest LU/LC classes. These studies should attempt to include both above and below-ground carbon stocks, using integrated sampling approaches (IPCC, 1996).

Currently few comprehensive studies of this kind are available in developing countries and only one is available in the montane regions of Mexico (de Jong *et al.*, 1999; Jaramillo *et al.*, 2003; Figueroa-Navarro *et al.*, 2005).

This study estimates the carbon stocks in ten dominant LU/LC classes of the Region Purepecha (central Highlands of Mexico), separating carbon in vegetation, litter and soil pools. Carbon in vegetation is further subdivided into above- and below-ground for trees, shrubs and herbaceous components. The Purepecha region is representative of the montane forest of Central and Southern Mexico. The present study shows the first results of a larger research effort oriented to estimate the current and future long-term regional land use change dynamics and associated carbon emissions as well as to identify priority areas for carbon sequestration projects.

STUDY AREA

The central Highlands of Michoacan, also known as the "Purepecha Region", comprise 538,000 hectares and are located in the central-northwest portion of the state of Michoacan between the coordinates 20°00' N, 102°45' W and 19°15' N, 101°15' W (figure 1). They are located in the physiographic province of the Transversal Volcanic System or Neovolcanic Mountains, Mexico. The total population is 588,666 inhabitants (INEGI, 2000), of which less than 20% are active in the agriculture sector (INEGI, 2000).

The geomorphology is complex, with elevations ranging from 1,050 m in the valleys to 3,860 m in the highest parts, with slopes varying from flat to very steep. Geological materials in the area are basalt, andesite, rhyolite, and feldspar tuffs, as well as clastic materials like sands, ashes, fine tuffs and breccias (Bello, 1993). There are a variety of volcanic soils dominated by andosols, with a high variation in soil textures (Bello *op cit*).

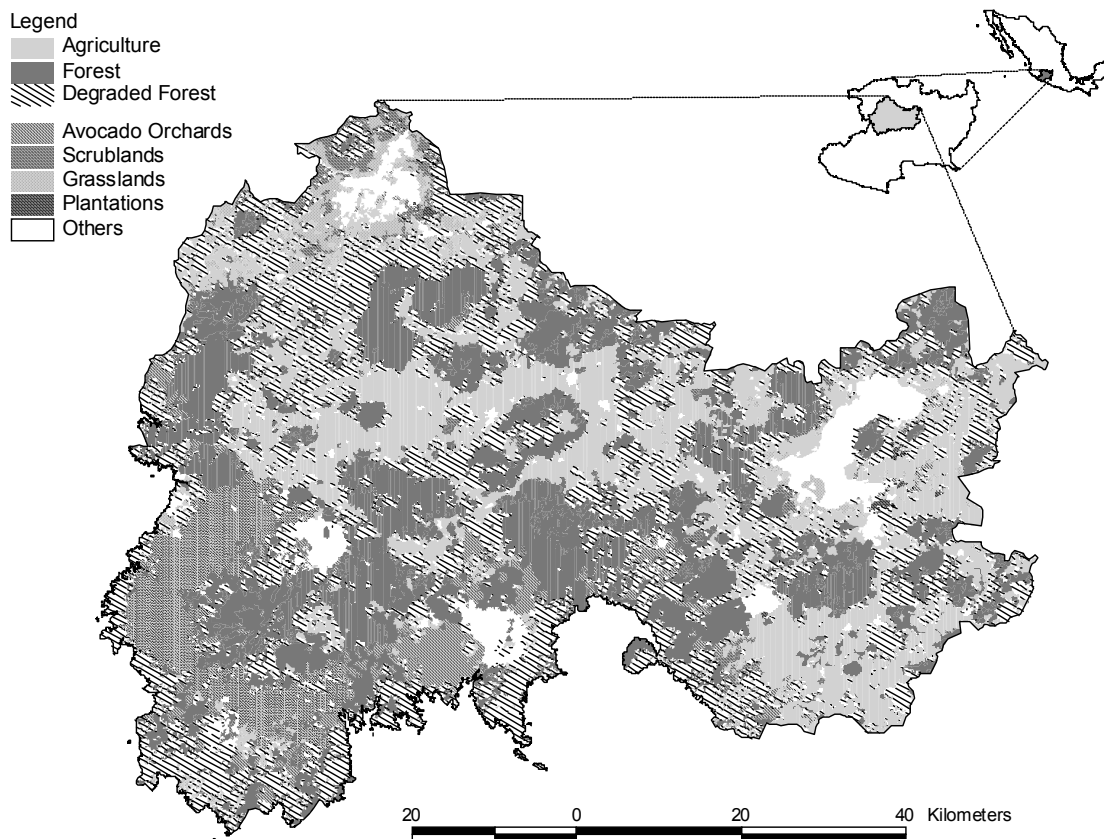


Figure 1. Location of the study area. Land cover and land use classes represented.

The altitudes above sea level fluctuate between 1050 and 3,860m. A montane climate prevails with rains in summer, annual average precipitation being of 900 to 2,000 mm and one annual average temperature of 12 to 18 °C (García, 1981).

The natural vegetation is representative of montane forests of central and southern Mexico, including the following forests classes: fir, pine, pine-oak, and oak forests (Madrigal-Sánchez, 1982; Caro, 1987, Caballero *et al.*, 1992). Other vegetation types include *Baccharis* shrubs, xeric shrubs, and induced grasslands (Caballero *et al.*, 1992). Man-made land-use classes include rainfed agriculture (Corn), avocado orchards and pasture lands.

MATERIALS AND METHODS

Land-use and, Land-cover Classes

The vegetation map for this study was derived from a Landsat ETM+ image of the year 2000. All areas were manually classified on screen from 1:250,000 mosaic color composites, with 137 georeferenced control points to verify the classification. We used ArcView 3.2 for processing the data and the imagery to estimate the total area by the different LU/LC classes.

The classification system we used was based on the Mexican National Forest Inventory 2000 (Palacio-Prieto *et al.*, 2000); we re-grouped their classes into ten composite LU/LC classes (Table 1). The following classes were adopted:

- Agriculture which includes seasonal (rainfed) agricultural systems, and cultivated land;
- Grassland which includes improved, alpine and natural grasslands,
- Scrubland which includes subtropical scrublands with shrubs, herbs, and secondary vegetation,
- Avocado orchard which includes avocado plantations and, to a much lesser extent, perennial crops,
- Plantations which includes areas that have been recently reforested;
- Degraded forest which includes secondary forests and open forests (coming from pine, pine-oak, and oak forests) with shrubs, herbs, and secondary vegetation,
- Pine forest
- Pine-oak forest which includes pine-oak and oak-pine forests
- Oak forest which includes oak and broadleaf forests,
- Fir forest.

Table 1. Legend used for land cover and land use classes in this study and their equivalence with the National Forest Inventory 2000 classes.

Classes	Abbreviations	National Forest Inventory Classes (2000)
Agriculture	AGR	Rain fed agriculture
Grasslands	GRA	Improved grasslands
Scrublands	SCR	Subtropical scrublands Subtropical scrublands with shrubs, herbs, and secondary vegetation
Avocado orchards	FRP	Permanent Agriculture and semi permanent crops
Plantation	REF	Forest plantations Pine forest with shrubs, herbs, and secondary vegetation
Degraded forest	DF	Oak forest with shrubs, herbs, and secondary vegetation Pine-oak forest with, shrubs, herbs and secondary vegetation
Pine forest	PIF	Pine forest
Pine-oak forest	POF	Pine-oak forest includes oak-pine forest and montane cloud forest
Oak forest	OAF	Oak forest
Fir forest	FIF	Fir Forest
Lands without vegetation*	WVL	Lands without vegetation
Human settlements*	HUS	Human settlements
Water bodies*	WAB	Pátzcuaro lake Zirahuén lake
Other*	OTH	Irrigated agriculture
Without classification*	WIC	Tropical deciduous and sub deciduous forests with shrubs, herbs, secondary vegetation, and riparian vegetation

Note: * Not included in the analysis.

Sampling Sites

We selected a total of 92 sites covering the ten LU/LC classes. The sites were distributed within the region to include the spatial variability. To conduct the sampling, the area was first stratified into four sub-regions. In each subregion the sites were chosen taking into account the following criteria: a) physical and social accessibility (permission from the land-owners), and b) a minimum area of four hectares per land-use fragment. The sampling area in each LU/LC class varied according to their expected variability in carbon densities (i.e., 1,000 m² plots for all forest classes, plantations and avocado orchards, and 500 m² plots for agriculture, grassland and scrubland classes). Of

the total sites, fifty three were in the various forest classes (including plantations) and thirty in the non-forest classes (including avocado orchards).

Inventory design

A field inventory design and collection protocol was established after Brown and Roussopoulos (1974), Brown & Delaney (2000) and Jaramillo *et al.* (2003). The aim was to measure aboveground biomass, litter, and soil all in the same sampling plot. Three circles of 1,000 m² were established on each sampling site (radius = 17.84 m, applying a slope compensation where necessary, Brown & Delaney, 2000). Three squares of 50 x 50 cm were established in each plot along the circumference of an interior circle of 500 m².

Carbon content in aboveground biomass

To estimate aboveground biomass (AB) of trees in the full 1,000 m² circles were established for the classes of forest, plantations and avocado orchards, and three circles of 500 m² for the agriculture, grassland and scrubland classes. Within each circle, the diameter at 1.3 m above ground (DBH) was measured for all trees taller than 1.30 m; while trees less than 1.30 m height were counted and identified by genus.

Data were recorded by genus and by diametric class, with intervals of 5 cm. For each diameter class, we used each diametric class to make the conversion to above-ground biomass. We use the following allometric equations based on southern Mexican forest species (Ayala, 2001):

$$AB_{(pine)} = 0.084 * DBH^{2.47} \dots\dots\dots(1)$$

$$AB_{(oak)} = 1.91 * DBH^{1.782} \dots\dots\dots(2)$$

$$AB_{(fir)} = Basal Area * h * TF * W\delta * EF \dots\dots\dots(3)$$

Where AB = aboveground biomass

DBH = diameter at breast height at 1.30 m above ground

Basal area

h = highest

TF = taper factor

Wδ = wood density

EF = expansion factor

In circles of 500 m², shrub biomass was estimated by measuring two perpendicular diameters (crown area) and total height; these were subsequently converted to above-ground biomass, applying the following locally developed allometric equation:

$$AB_{(shrub)} = 0.363\text{Ln}(\text{Vol}) + 0.7829 \quad R^2 = 0.8024 \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{Where Vol}_{(shrub)} = (\text{diameter}_a * \text{diameter}_b * \text{height}) * 4 * (\pi/24) \dots\dots\dots(4)$$

All biomass values were converted to carbon using a factor 0.5 MgDM/MgC (IPCC, 1996).

Carbon content in roots

We used the expansion factors proposed by Cairns et al. (1997), to estimate root biomass from aboveground biomass for all the forest classes and avocado orchards (Table 2); for grasslands we used the data from Jaramillo *et al.* (2003); and for agriculture and shrubs we used our own estimates coefficient.

Table 2. Root / shoot ratio for differences forests types cover and land use cover.

Forest cover / Land use cover	Root/shoot ratio	Source
Oak and avocado orchards	0.25	Cairns, 1997
Pine	0.26	Cairns, 1997
Shrubs	0.26	Own estimate
Agriculture	0.10	Own estimate
Pasture	0.18	Jaramillo <i>et al.</i> , 2003

Carbon content in litter

The carbon content in litter was estimated by collecting all the litter samples in three squares of 50 x 50 cm along the circumference of the 500 m² circle. Samples were dried and weighed individually for 48 hours at 80°C. Portions of dried samples of each circle were mixed and ground. The carbon concentrations of the resulting powders were measured in a carbon analyzer (UIC, INC. Mod. 5012). Eighty three litter samples were randomly selected from the seven hundred and forty seven samples collected. The carbon content in litter was estimated by multiplying its mass by the carbon concentration in dry matter and converted to Mg C ha⁻¹.

Carbon content in soil

Within each square from which litter samples were taken, three samples of mineral soil were collected using an AMS Compact Slide Hammer (Forestry Suppliers, INC. Item # 67349). Soil samples were obtained from three different depths: 0-5 cm, 5-15 cm, and 15-30 cm. A total of twenty seven soil samples were collected per site and used to estimate the carbon content in soil per unit volume. Fresh soil samples were individually weighed and dried for 48 hours at 105°C. Once dried, samples were re-weighed to estimate their bulk density, taking into account the known volume of the AMS Compact Slide Hammer used to collect the sample.

The three dried samples of soil from the same depth and the same circle were mixed together to obtain a composite sample. This composite sample was sieved in a 2 mm

mesh to remove coarse sands while soil aggregates were broken. In the next step, the sample was ground and the total organic carbon content measured by dry combustion at 950°C in a carbon analyzer (CA; UIC, model CM 5012). These concentrations, combined with bulk density, were used to estimate the amount of carbon per unit area.

Total carbon stocks

The total carbon stocks per unit area were estimated as (Ordóñez and Masera, 2001):

$$C_t = C_v + C_l + C_s \dots\dots\dots (\text{Mg C ha}^{-1}) \dots\dots\dots (5)$$

Where, C_t : total carbon content, C_v : carbon content in vegetation, which is the sum of carbon content in the aboveground biomass and roots, C_l : carbon content in litter and C_s : carbon content in soil.

The total carbon pools at the regional level were estimated, for each LU/LC class, by adding the carbon content of each reservoir (vegetation, litter, and soil) and then multiplying the total carbon stock by the area of each class, as follows:

$$C_{t_i} = (C_{v_i} + C_{l_i} + C_{s_i}) * A_i \dots\dots\dots (6)$$

Where: "i" represents the average carbon stock of each LU/LC class, and A_i the area of each class.

RESULTS

Land use and land cover

From the total study area, a 34.1% is covered by pine and pine-oak forests, 27.6% corresponds to degraded forests, 22.3% is occupied by agriculture, 9.3% by avocado orchards, and 3.9% by grassland and scrublands; the remaining forest classes (oak and fir forests) occupying 2.5% of the total area (Table 6, Figure 1). In other words, forests classes occupy 36.7%, non forests classes 35.5% and degraded forest 27.6% of the total study area, respectively.

Carbon in trees

Large differences were obtained in the above-ground tree carbon stocks within the eight LU/LC classes that had trees (Table 3). Scrublands presented the lowest carbon stock (28.7 Mg C ha⁻¹), followed by plantation and avocado orchards (50.5 and 53.2 Mg C ha⁻¹ each). Degraded forest reached 72.7 Mg C ha⁻¹, while the rest of the forest classes presented values ranging from 91.5 Mg C ha⁻¹ (Pine-oak forest), to 134.5 Mg C ha⁻¹ (Fir Forest).

Table 3. Total carbon content (Mg C ha⁻¹) in vegetation in 10 land cover and land use classes per stock (Aboveground biomass: tree, shrubs and herbaceous and belowground biomass: roots).

LU/LC Class	Aboveground biomass			Belowground biomass			Total carbon		
	Tree	Herbaceous	Shrubs	Roots	Vegetation				
Agriculture									
n		10	10	10	10				
Mean	Without	0.10 ± 0.09	0.21 ± 0.2	0.2 ± 0.1	0.5 ± 0.4				
Range		0.0001 - 0.35	0.04 - 0.4	0.1 - 0.3	0.1 - 1.0				
Grasslands									
n		3	3	3	3				
Mean	Without	0.09 ± 0.08	0.14 ± 0.1	0.02 ± 0.02	0.2 ± 0.3				
Range		0.0001 - 0.26	0.002 - 0.3	0.01 - 0.04	0.01 - 0.6				
Scrublands									
n	9	9	9	9	9				
Mean	28.7 ± 24.8	2.3 ± 0.42	1.7 ± 0.4	2.67 ± 3.6	35.3 ± 43.0				
Range	2.8 - 78.3	0.022 - 4.01	0.02 - 4.2	0.27 - 7.18	3.1 - 93.7				
Avocado orchards									
n	9	9	9	9	9				
Mean	53.2 ± 8.1	0.36 ± 0.18	0.38 ± 0.2	13.6 ± 5.3	67.5 ± 21.6				
Range	15.3 - 80.0	0.001 - 0.6	0.001 - 0.6	3.9 - 20.4	19.2 - 101.5				
Plantation									
n	5	5	5	5	5				
Mean	50.5 ± 11.9	0.04 ± 0.01	0.06 ± 0.01	13.1 ± 6.96	63.7 ± 26.7				
Range	30.7 - 97.1	0.0001 - 0.08	0.03 - 0.1	8.0 - 25.4	38.7 - 122.6				
Degraded forest									
n	11	11	11	11	11				
Mean	72.7 ± 3.9	0.55 ± 0.5	1.23 ± 0.6	13.1 ± 1.3	87.5 ± 32.1				
Range	38.8 - 82.6	0.09 - 1.0	0.01 - 22.3	9.5 - 22.3	48.4 - 128.2				
Pine forest									
n	19	19	19	19	19				
Mean	100.5 ± 10.4	0.15 ± 0.03	0.16 ± 0.03	26.0 ± 11.5	126.8 ± 45.3				
Range	38.6 - 203.7	0.03 - 0.44	0.03 - 0.5	10.0 - 53.3	48.6 - 257.8				
Pine-oak forest									
n	12	12	12	12	12				
Mean	91.5 ± 8.9	0.1 ± 0.03	0.31 ± 0.03	23.7 ± 7.8	115.7 ± 30.9				
Range	65.2 - 154.5	0.0001 - 0.3	0.02 - 0.3	16.7 - 41.16	81.9 - 196.3				
Oak forest									
n	8	8	8	8	8				
Mean	112.8 ± 10.9	0.3 ± 0.1	0.31 ± 0.1	28.6 ± 7.68	142.1 ± 31.0				
Range	61.2 - 143.7	0.01 - 0.7	0.01 - 0.7	15.5 - 36.5	76.7 - 181.7				
Fir forest									
n	6	6	6	6	6				
Mean	134.5 ± 14.8	0.2 ± 0.04	0.19 ± 0.04	34.8 ± 9.6	169.7 ± 36.5				
Range	84.3 - 180.4	0.07 - 0.3	0.07 - 0.3	21.6 - 46.9	106.0 - 228.0				

n = number of sites by class; Mean = carbon content average per class sampled; Range = minimum and maximum values of carbon content by class sampled; ± = Standard error

Carbon in scrubland

A total of 3,515 scrubs were measured within the different LU/LC classes. Significant differences were obtained in the various LU/LC classes (Table 3). The carbon stocks in scrubs ranged from 0.06 Mg C ha⁻¹ in the non-forest classes, to 1.7 Mg C ha⁻¹ in Scrublands; Pine and fir forest 0.16 and 0.19 Mg C ha⁻¹ each and Oak and pine-oak 0.31 Mg C ha⁻¹.

Carbon in herbaceous vegetation

Herbaceous plants were also sampled and measured within the different LU/LC classes. In this case, the carbon stocks ranged from <0.04 Mg C ha⁻¹ for Plantations to 2.3 Mg C ha⁻¹ in Scrublands. The rest of the forest classes showed values ranging between 0.09 and 0.55 Mg C ha⁻¹ (Table 3). It should be noted that the biomass in croplands and grasslands is very low because the sampling was conducted after the harvest and therefore only residues were measured.

Carbon in roots

Using root/shoot ratios (Table 2), we obtained estimates of the carbon stocks in roots by LU/LC class. The stocks ranged between 0.02 Mg C ha⁻¹ and 0.2 Mg C ha⁻¹ for grasslands and agriculture, respectively, and up to 13.6 Mg C ha⁻¹ for avocado orchards. Within forest classes root carbon stocks were as follows: Scrublands 2.6 Mg C ha⁻¹, plantation and degraded forest 13.1 Mg C ha⁻¹, pine-oak forest 23.7 Mg C ha⁻¹, pine forest 26 Mg C ha⁻¹, oak forest 28.6 Mg C ha⁻¹, and fir forest 34.8 Mg C ha⁻¹.

Carbon in vegetation

Total carbon stocks in vegetation were obtained by adding the carbon content in trees, scrubs, herbaceous understory and roots for each LU/LC class. Total carbon in vegetation (Table 3) ranged from 0.2 Mg C ha⁻¹ to 0.5 Mg C ha⁻¹ in grasslands and agriculture, respectively, to 67.5 Mg C ha⁻¹ in avocado orchards. With the exception of plantations, forest classes showed more than 100 Mg C ha⁻¹, with a maximum of 169.7 Mg C ha⁻¹ for fir forest. The large differences in total vegetation carbon between man-made land classes and forest classes show the vulnerability of this particular carbon pool to land-use change processes.

Carbon in Soil

The most important variations in carbon content in soil occurred in the bulk density. This reveals significant differences derived from soil compaction associated with the percentage of carbon content. Soil carbon was analyzed at three depths, 0-5 cm, 5-15 cm, and 15-30 cm for each LU/LC class (Table 4).

Table 4. Total carbon content (Mg C ha⁻¹) in soil in 10 land cover and land use classes.

LU/LC Class	Depth (cm)									Total carbon		
	0 - 5			5 - 15			15 - 30			Soil		
Agriculture	n 9			n 9			n 9			n 9		
Mean	14.7	±	2.2	22.3	±	3.6	44.6	±	6.8	81.6	±	24.0
Range	7.1	-	23.9	10.1	-	47.0	19.2	-	73.3	36.4	-	144.2
Grasslands	n 3			n 3			n 3			n 3		
Mean	23.1	±	3.7	26.0	±	4.8	40.8	±	2.9	89.9	±	11.7
Range	15.9	-	28.4	16.4	-	30.8	37.1	-	46.6	69.4	-	105.8
Scrublands	n 8			n 8			n 8			n 8		
Mean	19.4	±	3.6	22.4	±	4.4	42.3	±	7.3	84.2	±	26.2
Range	8.0	-	35.0	8.8	-	42.0	21.1	-	70.9	37.9	-	148.0
Avocado orchards	n 8			n 8			n 8			n 8		
Mean	21.3	±	2.6	21.8	±	2.6	41.8	±	3.5	84.9	±	14.3
Range	14.0	-	37.1	14.4	-	33.5	29.6	-	53.5	58.0	-	124.1
Plantation	n 5			n 5			n 5			n 5		
Mean	14.2	±	3.6	24.2	±	7.8	37.8	±	9.4	76.2	±	28.5
Range	6.2	-	26.0	3.9	-	46.6	14.8	-	68.2	24.9	-	140.9
Degraded forest	n 11			n 11			n 11			n 11		
Mean	18.1	±	3.0	21.5	±	1.9	33.1	±	3.9	72.8	±	12.8
Range	7.9	-	37.8	11.0	-	43.0	19.3	-	63.7	30.2	-	144.6
Pine forest	n 15			n 15			n 15			n 15		
Mean	24.0	±	3.1	24.0	±	3.3	45.0	±	3.8	93.1	±	23.0
Range	9.4	-	46.4	2.7	-	49.0	22.6	-	77.8	34.6	-	173.2
Pine-oak forest	n 11			n 11			n 11			n 11		
Mean	30.5	±	3.6	29.3	±	5.2	41.4	±	4.4	101.3	±	25.6
Range	9.9	-	58.2	9.4	-	60.3	22.6	-	71.3	41.9	-	189.8
Oak forest	n 8			n 8			n 6			n 8		
Mean	34.5	±	6.1	27.8	±	4.3	54.1	±	9.1	116.4	±	30.5
Range	16.2	-	61.2	9.8	-	43.5	28.5	-	88.1	54.6	-	192.8
Fir forest	n 3			n 3			n 3			n 3		
Mean	19.7	±	1.6	23.5	±	5.4	49.9	±	5.8	93.1	±	14.0
Range	17.6	-	22.8	15.3	-	33.7	42.1	-	61.3	75.0	-	117.8

n = number of sites by class; Mean = carbon content average per class sampled; Range = minimum and maximum values of carbon content by class sampled; ± = Standard error

The percentage of Soil Organic Matter (SOM) in the first 5 cm ranged from 3.2 % in agriculture class to 7.1 % in oak forest class; for the second 5-15 cm of depth, ranged

from 1.18 % in degraded forest to 2.9 % in oak forest; the last 15-30 cm of depth ranged from 2.19 % in degraded forest to 3.3 % in agriculture.

Within the first five cm of depth, the class with the highest carbon content was oak forest (34.5 Mg C ha⁻¹) while the lowest soil carbon content was found in plantations (14.2 Mg C ha⁻¹) and agriculture (14.7 Mg C ha⁻¹). In the second depth - from 5 to 15 cm-, the class with the highest carbon content was pine-oak forest (29.3 Mg C ha⁻¹) while the lowest was degraded forest (21.5 Mg C ha⁻¹). Differences among LU/LC classes were less pronounced than for the second soil depth (Table 4). Finally, the class with the higher carbon content in the third depth -from 15 to 30 cm-, was again oak forest (54.1 Mg C ha⁻¹), and the one with the lowest was degraded forest (33.1 Mg C ha⁻¹).

Adding the carbon content of the three soil depths, oak forest and pine oak forest showed the highest carbon content (116.4 Mg C ha⁻¹ and 101.3 Mg C ha⁻¹, respectively). Most of the other classes had total soil carbon contents of between 76.2 and 93.1 Mg C ha⁻¹. The lowest value was for degraded forest with only 72.8 Mg C ha⁻¹ of soil carbon (Table 4).

Carbon in litter

Agriculture shows the lowest carbon content in litter (0.6 Mg C ha⁻¹), followed by grasslands (0.7 Mg C ha⁻¹). On the other hand, avocado orchards had substantial carbon in litter (3.7 Mg C ha⁻¹). Within forest classes, carbon in litter ranged from 1.4 Mg C ha⁻¹ for scrublands to 4.1 Mg C ha⁻¹ in fir forest (Table 5).

Table 5. Total carbon content by vegetation and soil stocks by LU/LC classes.

LU/LC Class	Vegetation Mg C ha ⁻¹			Soil Mg C ha ⁻¹			Litter Mg C ha ⁻¹			Total carbon Mg C ha ⁻¹		
Agriculture												
n	10			9			5			7		
Mean	0.5	±	0.4	82	±	24.0	0.6	±	0.3	82.7	±	5.0
Range	0.1	-	1.0	36	-	144.2	0.1	-	1.3	36.7	-	146.5
Grasslands												
n	3			3			2			3		
Mean	0.2	±	0.3	90	±	11.7	0.7	±	0.6	90.8	±	3.5
Range	0.0	-	0.6	69	-	105.8	0.1	-	1.3	69.5	-	107.7
Scrublands												
n	9			8			4			8		
Mean	35.3	±	43.0	84	±	26.2	1.4	±	0.2	121.0	±	8.3
Range	3.1	-	93.7	38	-	148.0	0.8	-	1.8	41.8	-	243.4
Avocado orchards												
n	9			8			2			8		
Mean	67.5	±	21.6	85	±	14.3	3.7	±	0.0	156.1	±	6.0
Range	19.2	-	101.5	58	-	124.1	3.7	-	3.7	80.9	-	229.3
Plantation												
n	5			5			3			5		
Mean	63.7	±	26.7	76	±	28.5	2.1	±	0.6	142.0	±	7.5
Range	38.7	-	122.6	25	-	140.9	1.1	-	3.3	64.7	-	266.8
Degraded forest												
n	11			11			11			11		
Mean	87.5	±	32.1	73	±	12.8	2.6	±	0.7	162.9	±	6.8
Range	48.4	-	128.2	38	-	144.6	0.4	-	11.3	87	-	284.1
Pine forest												
n	19			15			19			15		
Mean	126.8	±	45.3	93	±	23.0	3.0	±	0.5	222.9	±	8.3
Range	48.6	-	257.8	35	-	173.2	0.2	-	8.3	83.5	-	439.4
Pine-oak forest												
n	12			11			9			11		
Mean	115.7	±	30.9	101	±	25.6	3.8	±	0.7	220.7	±	7.6
Range	81.9	-	196.3	42	-	189.8	1.2	-	6.8	125.0	-	393.0
Oak forest												
n	8			8			8			8		
Mean	142.1	±	31.0	116	±	30.5	3.2	±	0.6	261.6	±	7.9
Range	76.7	-	181.7	55	-	192.8	1.6	-	6.6	132.9	-	381.1
Fir forest												
n	6			3			6			3		
Mean	169.7	±	36.5	93	±	14.0	4.1	±	1.2	266.9	±	7.2
Range	106.0	-	228.0	75	-	117.8	0.1	-	7.1	181.1	-	352.8

n = number of sites by class; Mean = carbon content average per class sampled; Range = minimum and maximum values of carbon content by class sampled; ± = Standard error

Total carbon by LU/LC class

Table 5 shows the carbon stocks in vegetation, soil, litter and total for each LU/LC class. Total carbon stocks show a progression from man-made land-use classes –which have less than 100 Mg C ha⁻¹- scrublands with 121 Mg C ha⁻¹, to forest plantations and avocado orchards –in the range from 121 to 156.1 Mg C ha⁻¹-, to degraded forest -162.9 Mg C ha⁻¹- to the more conserved forest classes –averaging between 220 Mg C ha⁻¹ for pine-oak forest and up to 267 Mg C ha⁻¹ for fir forest. The relative importance of the different carbon pools varies with the LU/LC class. For example, soil carbon accounts for >90% of total carbon stocks for agriculture and grasslands, to about 30% for fir forest (Figure 2). Litter constitutes from 0.8 to 2.4% of total carbon stocks by LU/LC class. The largest differences in carbon pools among LU/LC classes are those from vegetation carbon, which shows the vulnerability of this pool to changes in land-use (Figure 2).

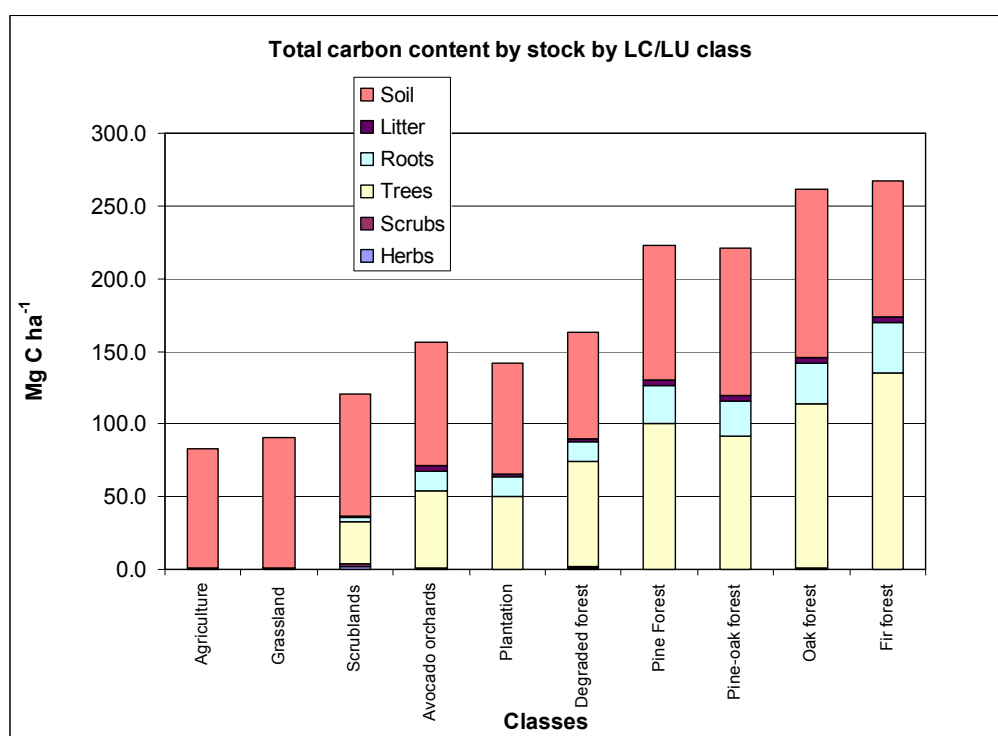


Figure 2. Total carbon content by stock by class in the region

Total Carbon Stocks at the Regional Level

We used the average carbon stocks by LU/LC class and their respective area to estimate the total carbon stocks in the study area. The total regional carbon stock reached 89.7 TgC (Table 6). The classes with the largest contribution to these regional stocks were degraded forest (24.2 TgC, or 27.6% of the total), pine-oak forest (23.9 TgC, or 20.1% of the total), and pine forest (16.8 TgC or 14% of the total). We observe that man-made classes (including degraded forests) currently constitute 62% of the regional area and 50% of the total carbon stock. Also, 50% of the total regional carbon is stored in vegetation, and can therefore be considered highly vulnerable to land-use changes and natural disturbances.

Table 6. Total carbon content per LU/LC class in the Purépecha Region for the year 2000.

Classes	Area cover in 2000 (ha)	ha in %	Carbon content (Mg C ha ⁻¹)	Total Carbon Region (Tg C)
Agriculture	120,158	22.3	82.7	9.9
Grasslands	14,279	2.7	90.8	1.3
Scrublands	6,887	1.3	121.0	0.8
Avocado orchards	49,850	9.3	156.1	7.8
Plantation	760	0.1	142.0	0.1
Degraded forest	148,706	27.6	162.9	24.2
Pine forest	75,566	14.0	222.9	16.8
Pine-oak forest	108,154	20.1	220.7	23.9
Oak forest	6,505	1.2	261.6	1.7
Fir forest	7,140	1.3	266.9	1.9
	538,005	100.0		88.5

DISCUSSION

This study constitutes the first comprehensive analysis of regional carbon stocks by LU/LC class in montane forests of Central Mexico. The information generated will, on one hand, contribute to better regional and national carbon inventories while on the other, it will aid in establishing the basis for subsequent studies and scenarios on carbon emissions, baselines and mitigation scenarios associated with the land use change process.

We followed an integrated and comprehensive approach that is based on the measurement of different major carbon pools in the forest ecosystem for differentiated major land use/land cover classes within the Region. Below we discuss the major study findings for the specific pools and topics examined:

Carbon Stocks

Results show that carbon in vegetation presents the largest differences among LU/LC classes. There is a steady gradient that goes from cropland and grassland at the lower end (0.2 to 0.5 Mg C ha⁻¹), to restoration plantations and avocado orchards (63-67 Mg C ha⁻¹), to degraded forests (approximately 88 Mg C ha⁻¹), to native forests (from 115 to 169 Mg C ha⁻¹) at the higher end. In other words, conversion of forests to more intensively managed land-uses is associated with large losses of regional vegetation carbon. Considering that most agriculture and grasslands, in the region arises from previously forested land, our results suggest that carbon storage capacity is quickly reduced by the processes of land use change that combine deforestation and degradation of forest ecosystems.

The same general progression is valid for litter –with the exception of avocado orchards, where litter is kept high to help nutrient dynamics-, which increases by almost an order

of magnitude between agriculture/grasslands and native forests (from 0.6 to 4.1 Mg C ha⁻¹). Despite its modest contribution to total carbon, litter plays a very important role in the carbon biogeochemical cycle as the interface between carbon in vegetation and in soil.

Soil carbon, on the other hand, shows a different picture. Differences in average total soil carbon are not significant among LU/LC, despite an indication of a slight increase from man-made LU/LC classes to the more conserved forest classes (from 91 to 116 Mg C ha⁻¹). Differences among classes also vary slightly with soil depth, being more marked at the 0-5cm level, with the lowest values for agriculture –due to cultivation practices- and forest restoration plantations –that are usually established on degraded lands. Differences in soil carbon content gradually vanish for the first and the third level (15-30 cm).

Comparison with other studies

There are few available estimates on the carbon content of montane forests in Mexico (Table 7). The most comprehensive study comes from de Jong *et al.* (1999) and was conducted in the Chiapas Highlands, in Southern Mexico. The three remaining studies (Cairns *et al.* 1995, Masera *et al.* 1997, and Masera *et al.* 2001) proposed nation-wide average carbon densities for the major forest formations of Mexico, based on secondary sources such as conventional forest inventories. We find, for most forest classes, higher carbon content than those obtained by nation-wide studies. This fact is not surprising as the latter studies include large areas of forests located in more arid and colder conditions. On the other hand, our estimates are within the range of values found by de Jong *et al.* (1999) with slightly lower averages for pine and pine-oak forests. The oak forests sampled by de Jong *et al.* (1999) include cloud forests and thus the reported carbon content is higher. Our estimates for cultivated land and pastures are also lower than those found in de Jong (1999) as we did not include the carbon content of the annual crop and grass yield. The larger disparities with the rest of the studies

correspond to degraded forests, which show much higher carbon densities in our case. This is almost certainly connected with differences in the definition of this forest class as well as the small sample size of our study. Because of differences in the sampling methodologies and definitions with the rest of the studies, it was not possible to compare the remaining carbon pools, particularly soil carbon.

Table 7. Estimates of vegetation carbon content in Mexican montane forests (includes above and belowground biomass), in Mg C ha⁻¹.

Forest type	Averages (Mg C ha ⁻¹)	Ranges (Mg C ha ⁻¹)	Source
Coniferous forest	50	50 – 118	Cairns <i>et al.</i> , 1995
	70		Masera <i>et al.</i> , 1997
	118		Masera <i>et al.</i> , 2001
Pine forest	120	79.7 - 244	De Jong <i>et al.</i> , 1999
Pine forest	126.8	48.6 – 257.8	This study
Broadleaf forest	60	53 – 105	Cairns <i>et al.</i> , 1995
	53		Masera <i>et al.</i> , 1997
	105		Masera <i>et al.</i> , 2001
Oak and evergreen cloud forest	189	108.4 - 302	De Jong <i>et al.</i> , 1999
Oak forest	142.1	76.7 – 181.7	This study
Pine-oak forest	135.4	77.6 – 168.6	De Jong <i>et al.</i> , 1999
Pine-oak forest	115.7	81.9 – 196.3	This study
Degraded forest	42	n.a.	Masera <i>et al.</i> , 2001
Degraded and fragmented forest	29.1	9.6 – 106.2	De Jong <i>et al.</i> , 1999
Degraded forest	103.3	94.8 – 111.8	This study
Cultivated land	9	n.a.	Masera <i>et al.</i> , 2001
Cultivated land	6	4 – 8.1	De Jong <i>et al.</i> , 1999
Cultivated land	0.5	0.1 - 1	This study
Pasture	16	n.a.	Masera <i>et al.</i> , 2001
Pasture	18.1	4.1 – 37.1	De Jong <i>et al.</i> , 1999
Pasture	0.2	0.0 – 0.6	This study

Notes: n.a. not available

Carbon Emissions

Human activities in the highlands have altered close to 65% of the total land area. Between 1986 and the year 2000, the Purepecha Region lost on average 1,869 ha/yr of forest area. As a result of this process, forest areas are currently more fragmented and increasingly located in less accessible sites. Projecting these historic deforestation rates to the period 2000-2014, assuming the same patterns of land-use change, and using the carbon content in vegetation by LU/LC class found in this study, we can conclude tentatively that up to 10 TgC may be emitted from a vegetation cover decrease in the main carbon stocks.

CONCLUSION

In order to formulate viable strategies for climate change mitigation, it is critical to understand, on one hand, the LU/LC change dynamics in forest ecosystems. On the other hand, it is essential to examine the changes in carbon fluxes derived from land use change patterns. One of the first crucial steps to achieve these goals is to obtain basic information on the carbon content associated with the various stocks of the natural and man-made LU/LC classes at the regional level.

Completing the present study involved a comprehensive effort above all in the integration of different methodologies for field work and data processing. The study generated unique information, both in terms of stocks, but also on allometric equations for scrublands and other parameters. It is thus a valuable first step for advancing our knowledge of the carbon cycle in montane forest ecosystems of tropical countries.

Future efforts should consider larger sample sizes, to be able to determine more precisely the differences between pools and LU/LC classes. We are conducting further work to determine the carbon content of dead wood by LU/LC class. This will help to

create an inventory of all the regional carbon pools associated with forest and man-made classes. Also, we are generating short and medium term scenarios, based on carbon simulation models, for which the present study provides very valuable parameters and data for validation.

The variation observed in the quantity of carbon stored in each reservoir and in each land use and land cover class, permits to appreciate that although at the beginning they were very similar classes, the changes occurring in the land, have been associated to land ownership, the type of cover class and the governmental programs or market options offered to the land owners..

Applying the Montecarlo model, no changes in the concentrations of carbon in a time span of a hundred years were observed, this due to the variances associated with the data obtained.

The carbon content variation in the degraded forest class is related to the phase of succession in which each reservoir is found, because each patch of this class has a different process of land use, land cover change and traditional land use.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Raúl Ahedo, Heberto Ferreira, Alejandro Flamenco and Miguel Espejel for their assistance in processing data; Luci Mora, Maribel Nava Mendoza and Manuel Hernández for their assistance in the laboratory analyses; to the laboratories of Análisis Ambiental y Unidad de Ambientes Controlados de la Facultad de Ciencias; Erika Tapia, Juan Velarde and his team, Jaime Navia and GIRA, A. C., for their assistance in the field work; Luis Gerardo Ruíz, Irene Teresa Rodríguez, María de Jesús Ordóñez, Gordon Filby and Mercedes Otegui for reviewing the manuscript and comments. This study was funded in part by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT project No. 32715-N) and Universidad Nacional Autónoma de México 18252-537-27-IV-06 with Instituto Nacional de Ecología: INE/A1-014/2006.

REFERENCES

- Ayala, R. A. 2001. Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la meseta central de Chiapas. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo, División de Ciencias Forestales. 70 p.
- Bello, M. A. 1993. Plantas útiles no maderables de la sierra Purépecha, Michoacán, México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Uruapan, Michoacán, México. 150 p.
- Brown, J. K. and P. J. Roussopoulos. 1974. Eliminating biases in planar intersect method for estimating volumes of small fuels. *Forest Science* 20: 350-356.
- Brown, S. and M. Delaney. 2000. Standard Operating Procedures for Measuring Carbon in Forests and Agriculture Projects. Version: 1.00 Winrock International 51p.

- Brown, S., Hall, M., Andrasko, K., Ruiz, F., Marzoli, W., Guerrero, G., Masera, O., Dushku, A., de Jong, B., Cornell, J. 2007. Baselines for Land-Use Change in the Tropics: Application to Avoided Deforestation Projects. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12 (6), 1001-1026
- Caballero, J., N. Barrera, and C. Mapes. 1992. La Vegetación Terrestre. *In: Plan Páztcuaro 2000*. Friedrich Ebert Stiftung, México, D. F. 71-90 p.
- Cairns, M. A., T. P. Kolchuniga, D. P. Turner, and J. K. Winjum. 1995. The contribution of forest land use to total national carbon flux: case studies in the former Soviet Union, United States, Mexico and Brazil. EPA/600/R-95/044. U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, OR. 212 pp.
- Cairns, M. A., S. Brown, E. H. Helmer, and G. A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forest. *Oecologia* 111: 1-11.
- Caro, R. 1987. Caracterización de la Industria Maderable en el Área de Influencia de la UAF 6: Meseta Tarasca. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México. 180 p.
- De Jong, B. H. J., M. A. Cairns, P. K. Haggerty, N. Ramírez-Marcial, S. Ochoa-Gaona, J. Mendoza-Vega, M. González-Espinosa, and I. March-Mifsut. 1999. Land-use change and carbon flux between 1970s and 1990s in the central highlands of Chiapas, México. *Environmental Management* 23(3): 373-285.
- García, E. 1981. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. México, Distrito Federal. 217 p.
- Figueroa Navarro, C., J. D. Etchevers Barra, A. Velázquez Martínez Y M. Acosta-Mireles. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra Latinoamérica*. 23: 57-64.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. Estados Unidos Mexicanos: XII Censo General de Población y Vivienda, Resultados Preliminares. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags. México. 375 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1996. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 5. Land-use change and forestry. Guidelines for National Green house Gas Inventories : Reference Manual.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. Climate Change 2001. The Synthesis Report. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. 397 p.
- 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.
- Lambin, E. F.1994. Modelling deforestation processes: a review Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites, TREES Series B, Research report No. 1. Office of the European Commission, Directorate-General XIII. Luxemburg. 113 pp.
- Madrigal-Sánchez, X. 1982. Claves para la Identificación de las Coníferas Silvestres del Estado de Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 100 p.
- 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.
- Masera O., M. J. Ordóñez, and R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35: 265-295.
- Masera, O., R. D. Martínez, T. Hernández, A. Guzmán y A. Ordóñez. 2000. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1994-1996. Parte 6: Cambio en el uso del suelo y bosques. Laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ecología de los Recursos

Naturales del Instituto de Ecología de la UNAM, Campus Morelia- INE, SEMARNAT, México, D.F. 44 p.

Ordóñez, A. and O. Maser. 2001. La captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1): 3-12.

Palacio-Prieto, J.L., G. Bocco, A. Velásquez, J.F. Mas, F. Takaki-Takaki, A. Victoria, L. Luna-González, G. Gómez-Rodríguez, J. López-García, M. Palma-Muñoz, I. Trejo-Vázquez, A. Peralta-Higuera, J. Prado-Molina, A. Rodríguez-Aguilar, R. Mayorga-Saucedo, y F. González-Medrano. La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.* 43:183-203.

Velázquez, A., J.F. Mas, J.R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P.C. Alcántara, T. Castro, T. Fernández, G. Bocco, y J.L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio del uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica INE* 62, 21–37.



Capítulo VI

Árboles para reciclar carbono: La guerra contra el calentamiento global¹

¹Ordóñez-Díaz, J.A.B. 2007.

“Árboles para reciclar carbono: la guerra contra el calentamiento global”. ProNATURA, por la gente por la tierra. Número 25 Oct-Nov. Pág. 46-51.

Árboles para reciclar carbono: La guerra contra el calentamiento global¹

José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz

Nuestra forma de vida ha llevado al uso intensivo de los recursos naturales, lo que ha desatado grandes procesos de deterioro ambiental. Desertificación, deforestación y agotamiento de acuíferos son términos que ya nos resultan familiares.

Un resultado neto de numerosas actividades productivas es la generación de los llamados gases de efecto invernadero (GEI) cuya importancia radica en que tienen la posibilidad de aumentar la temperatura de la atmósfera y, por consiguiente, de modificar los patrones climáticos del planeta.

No hay que olvidar que el cambio climático es el problema ambiental más severo que enfrentaremos en este siglo y los que vienen, y será mucho más difícil de solucionar si no mitigamos las emisiones de GEI y buscamos procesos más limpios y menos contaminantes.

Es necesario precisar que las actividades humanas aumentan la concentración de GEI y también generan y emiten gases mucho más potentes, en cuanto a su potencial de calentamiento, que antes no existían. Por otra parte, hay que señalar que, sin el efecto invernadero natural, no habría vida en la Tierra.

¹ Ordóñez-Díaz, J.A.B. 2007. "Árboles para reciclar carbono: la guerra contra el calentamiento global". ProNATURA, por la gente por la tierra. Número 25 Oct-Nov. Pág. 46-51.

Secuestro de carbono

De los GEI, el dióxido de carbono (CO₂) existe también en la naturaleza y por lo mismo puede ser incorporado –el término que se usa ahora es secuestrado– por las estructuras vegetales: ramas, hojas, tallo, tronco y raíces. Así que los ecosistemas forestales desempeñan un papel importante en la conservación por la cantidad de carbono que pueden retirar de la atmósfera, mientras que las áreas que han sufrido deterioro ambiental se pueden revertir a ser aptas para el secuestro de carbono, mediante el establecimiento de plantaciones, la reforestación y la restauración.

Con base en los procesos de secuestro de carbono se han generado esquemas de pago por servicios ambientales que han beneficiado a un gran número de poseedores de áreas forestales.

Servicios invaluable

El concepto de servicios ambientales forestales busca reconocer los servicios asociados al bosque (provisión de agua en cantidad y calidad, generación de oxígeno, recreación, protección de la biodiversidad y de suelos entre otros) y retribuir al que garantiza su conservación y desarrollo. En México están coordinados y financiados por la Comisión Nacional Forestal.

Los servicios ambientales se pagan a los propietarios que realizan proyectos de reforestación, manejo y/o protección del bosque, normalmente pequeñas comunidades que, de otro modo, se ven obligadas a utilizar materia prima que les proporciona el bosque para subsistir. Esto último contribuye a la deforestación de los lugares donde viven.

Existen cuatro categorías de servicios ambientales: hidrológicos, de conservación de la biodiversidad, de belleza escénica, y de captura y almacenamiento de carbono. El monto

que se paga por los mismos depende del lugar geográfico y el tipo de emisión, ya que el costo varía dependiendo del proceso industrial al que ésta se encuentra asociada.

El mercado de carbono

Para reducir las emisiones de GEI en un 5% con respecto a las de 1990, como propone el Protocolo de Kyoto, se han implementado tres mecanismos que consisten, a grandes rasgos, en que los países desarrollados puedan financiar proyectos de captura de carbono o abatimiento de estos gases en otras naciones –principalmente en vías de desarrollo-, acreditando tales disminuciones como si hubieran sido hechas en sus propios territorios. De esta manera, si una empresa logra reducir sus emisiones de GEI puede vender esta disminución a otra empresa que necesite bajar sus emisiones.

La negociación de estos créditos de reducción de emisiones, también conocidos como Bonos de Carbono, impulsa el Mercado de Carbono. La unidad de medida utilizada es la tonelada de carbono capturado (tC) o su equivalente medido en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e).

La ventaja de que los países industrializados se hagan responsables de sus emisiones (ya sea a través del pago de bonos por captura de carbono o de CO₂e) es que abre una oportunidad para que los que están en vías de desarrollo le den mantenimiento a sus ecosistemas forestales y que generen fuentes de empleo. Una desventaja de los bonos es que el precio que se paga en países en desarrollo es bajo: en México, una tonelada de CO₂e se paga entre 50 y 100 pesos. Por otra parte, el costo de las emisiones en países desarrollados es alto. Por ejemplo, mitigar en Europa una tonelada cuesta cerca de 60 euros.

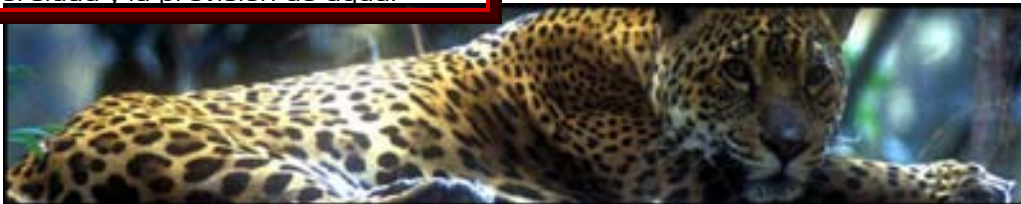
México ya cuenta con algunas experiencias exitosas en el cobro y pago de servicios ambientales, mismos que están comenzando a tener un efecto multiplicador. Tal es el caso del proyecto “Scolel Té” en Chiapas y Coatepec en Veracruz.

En nuestro país, el Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (Comegei) es la autoridad nacional para el comercio de reducciones de emisiones de GEI.

Bajo una adecuada política de apoyo, nuestro sector forestal tiene la capacidad de reducir el crecimiento de las emisiones de CO₂ generadas por el sector energético, convirtiéndose en una de las opciones de mitigación más importantes a corto y mediano plazos. Opción de mitigación es cualquier acción que tenga por resultado una reducción del incremento neto en las emisiones de carbono de un área determinada. En el sector forestal, se identifican dos opciones básicas de mitigación de carbono: la conservación y la reforestación.

Afortunadamente, varias empresas asentadas en México se están comprometiendo a realizar sus inventarios de emisiones de GEI y en breve las mitigarán por las vías disponibles. Para ello, CONAFOR y Pronatura están preparando esquemas y opciones de mitigación. En nuestro país, un esquema de mercado voluntario de reducción de emisiones y venta de bonos de carbono, aunado al pago de servicios ambientales, puede representar una alternativa real en el corto plazo para contribuir a controlar en alguna medida el calentamiento global.

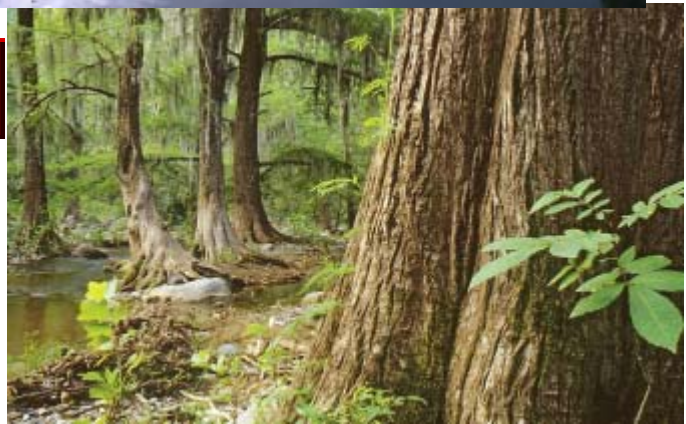
Entre los servicios que nos presta la naturaleza están la conservación de la biodiversidad y la provisión de agua.



Los ecosistemas forestales desempeñan un papel importante en la conservación por la cantidad de carbono que pueden retirar de la atmósfera.



Los árboles del género *Taxodium* crecen a la orilla de ríos y evitan su desecación



Mujeres en Michoacán cargan tule que recolectan en la orilla del Lago de Pátzcuaro para elaborar sus artesanías



Las hojas, ramas, tronco, tallo y raíces secuestran o incorporan el dióxido de carbono y lo retiran de la atmósfera

Bosque en Isla Guadalupe de al menos 500 años de edad



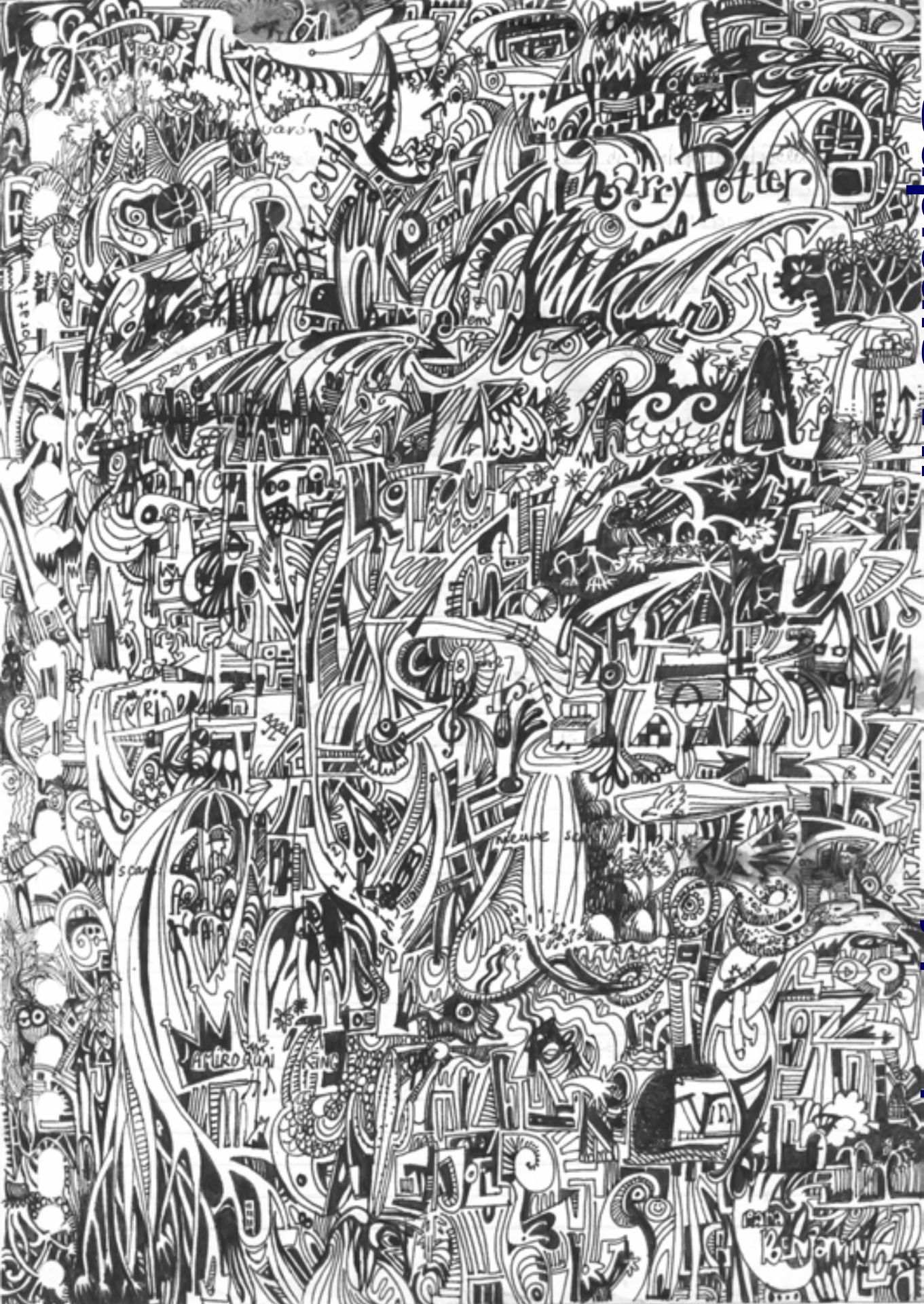
La reserva del Pedregal (Ciudad Universitaria, UNAM) es la más grande que existe dentro de una gran urbe.



Agradecimientos

A Adrián Fernández, Julia Martínez y Aquileo Guzmán del INE, por su compromiso y apoyo en la investigación del cambio climático en México.

José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz es biólogo candidato a doctor en Ciencias Biomédicas de la UNAM. Consultor internacional, experto en el tema de cambio climático, captura de carbono, servicios ambientales y manejo de recursos naturales. Es también asesor del programa de Cambio Climático de Pronatura México, A.C.



Capítulo VII

Síntesis y perspectiva

Síntesis

El presente proyecto, se formuló con dos años de antelación, derivado del trabajo en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero en el sector cambio en el uso del suelo y forestería (CUSyF) y de la estimación de la captura de carbono en estudios de caso; se identificaron necesidades específicas para: a) entender los procesos de cambio de uso del suelo, que promueven la disminución de los contenidos de carbono (C) almacenado en los ecosistemas, tanto en biomasa aérea, mantillo, raíces y suelo, así como las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera que generan estos cambios y que contribuyen directamente al calentamiento global; b) estimar el carbono almacenado por clase de cobertura vegetal y uso del suelo (CVyUS), ya que los valores usados en los inventarios provienen de estudios de caso en otros lugares del orbe y, c) reducir las incertidumbres sobre los almacenes de carbono por clase de CVyUS.

En cuanto a la temática de cambio climático, 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 pocos los estudios detallados a escala regional sobre la dinámica de las emisiones y del potencial de captura de carbono asociados con los procesos de cambio de uso del suelo (Daily, 1995; FAO, 1995; Lambin, 1997; García-Oliva y Ordóñez, 1999; de Jong *et al.*, 1999; de Jong, 2001; Masera *et al.*, 2001). La falta de datos confiables en estos procesos ha generado gran incertidumbre en las estimaciones globales (Brown y Rousso-pulous, 1974; Dixon *et al.*, 1994; IPCC, 1995; Masera *et al.*, 1997; Ordóñez, 1999; Sathaye *et al.*, 2001; de Jong, 2001; Ordóñez *et al.*, 2008).

Este estudio fue parte del proyecto CONACYT 32715-N, titulado: "*Dinámica de emisiones de carbono a nivel regional, en un ecosistema templado del centro de México*". El propósito de este proyecto fue contribuir en: a) la generación de nuevo

conocimiento e hipótesis sobre contenido y emisiones de carbono en ecosistemas forestales; b) desarrollo de una metodología que permita cuantificar el contenido de carbono de los diferentes almacenes de los ecosistemas; c) un análisis detallado de la dinámica de emisiones y captura de carbono asociada a los procesos de cambio de uso del suelo en la región Purépecha, d) la aportación de elementos para determinar una línea base de emisiones a nivel regional, e) la formación de recursos humanos especializados en esta área del conocimiento y, f) aplicación de los conocimientos adquiridos para el desarrollo de un mercado alternativo de la venta del servicio ambiental "captura o secuestro" de carbono.

En este sentido, se planteó como objetivo: estimar las emisiones de carbono derivadas de la dinámica del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en la Región Purépecha en Michoacán, México.

Para alcanzar dicho objetivo se identificaron tres metas: 1.-Estimar el cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo en la región de estudio, para el periodo comprendido entre los años 1986 y 2000; 2.- Cuantificar el contenido de carbono en mantillo, suelo y biomasa aérea en cada una de las clases de cobertura vegetal y uso del suelo seleccionadas en el área de estudio; y 3.- Estimar los cambios de los contenidos de C de los principales almacenes por clase de cobertura vegetal y uso del suelo, asociados a los procesos de cambio en el uso del suelo a nivel regional en el periodo de estudio.

Primera meta

Estimar el cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo en la región de estudio, para el periodo comprendido entre los años 1986 y 2000

Para ello se parte de las siguientes premisas:

a) Tener identificada la clase de cobertura vegetal y / o uso del suelo a trabajar.

- b) Contar con una superficie mínima de 4 ha en cada sitio de muestreo,
- c) Que la clase seleccionada, contenga el mayor número de clases de CvyUS contiguas,
- d) Tener el permiso del o de los propietarios para realizar las mediciones y
- e) Georeferenciar el sitio en cuestión y seguir los procedimientos establecidos para iniciar el registro de datos.

Por lo extenso de la región, se realizó una Subregionalización. Con base en la fisiografía y los cambios dominantes del uso del suelo se identificaron cuatro subregiones en el área de estudio: Pátzcuaro, Meseta, Uruapan y Tancítaro (Cuadro 1);

Cuadro 1. Subregiones que comprenden la región Purépecha y criterios para delimitarlas.

Fisiografía	Criterios Cambios dominantes del uso del suelo	Subregión	Municipios
Cuenca lacustre	Tierras con cubierta boscosa que se cambiaron a uso agrícola y posteriormente se abandonaron y hoy presentan una regeneración natural, existe una veda forestal permanente.	Pátzcuaro	Pátzcuaro, Quiroga, Tzintzuntzan, y Villa Erongarícuaro y Escalante.
Meseta	Tierras que originalmente estaban cubiertas de bosques que actualmente son agrícolas.	Meseta	Tangancícuaro, Chilchota, Paracho, Nahuatzén, Charapan y Los Reyes.
Vertiente del Balsas	Tierras que originalmente estaban cubiertas de bosque y ahora hay plantaciones y huertos.	Uruapan	Uruapan, Tingambato, Ziracuaretiro y Taretán.
Volcán Tancítaro	Tierras con cobertura forestal que se están transformando a plantaciones.	Tancítaro	Periban, Nuevo San Juan Parangaricutiro y Tancítaro.

Determinación de las clases de cobertura vegetal y uso del suelo.

Una vez delimitadas las subregiones se procedió a clasificar la imagen de satélite landsat TM del año 2000, a fin de identificar las diferentes clases de cobertura vegetal y uso del suelo y posteriormente seleccionar los posibles sitios de muestreo.

Se tomó como base el mapa y leyenda del Inventario Nacional Forestal (INF) del mismo año y a la misma escala (Palacio-Prieto *et al.*, 2000), identificando las mismas clases de CVyUS. Para los fines de este estudio dichas clases (21) fueron reagrupadas en 15 clases (Cuadro 1, capítulo 5). Se realizó la verificación de campo mediante 137 puntos de control para corroborar la clasificación de la imagen. Desde el punto de vista de los almacenes de carbono, se consideró importante analizar las diez primeras clases de cobertura vegetal y uso del suelo, de las quince clases obtenidas.

Los resultados del análisis del cambio de uso del suelo a nivel regional en el periodo 1986-2000, muestran una pérdida neta de clases forestales a no forestales de 22,130 ha en el periodo analizado (equivalentes a 1,581 ha/año usando un promedio simple). Las clases que más superficie perdieron fueron los bosques con vegetación secundaria (50,026 ha), mientras que las clases que más aumentaron su superficie en términos absolutos fueron los bosques de pino (20,587 ha).

Se realizó un análisis más detallado mediante una matriz de cambios en cada una de las diferentes clases para el periodo 1986 – 2000 a nivel regional, donde se aprecia que la clase: bosque degradado (BD) aportó la mayor superficie a la agricultura (17,447 ha), a la clase de bosque de pino (14,159 ha) y a la clase bosque de pino-encino (10,879 ha); la superficie de la clase de bosque de pino para el año 2000 se incremento a razón de 20,587 ha provenientes de las clases BD, BPE BE, OY y AGR.

Al sobreponer las imágenes de los mapas de 1986 con la del 2000, se analizó el proceso del cambio en la superficie (figura 1), observando que los cambios mas grandes se manifiestan en la subregión Meseta, Tancitaro y Uruapan (con mayores áreas deterioradas). La subregión Pátzcuaro presentó una superficie de deterioro ligeramente mayor que la de recuperación.

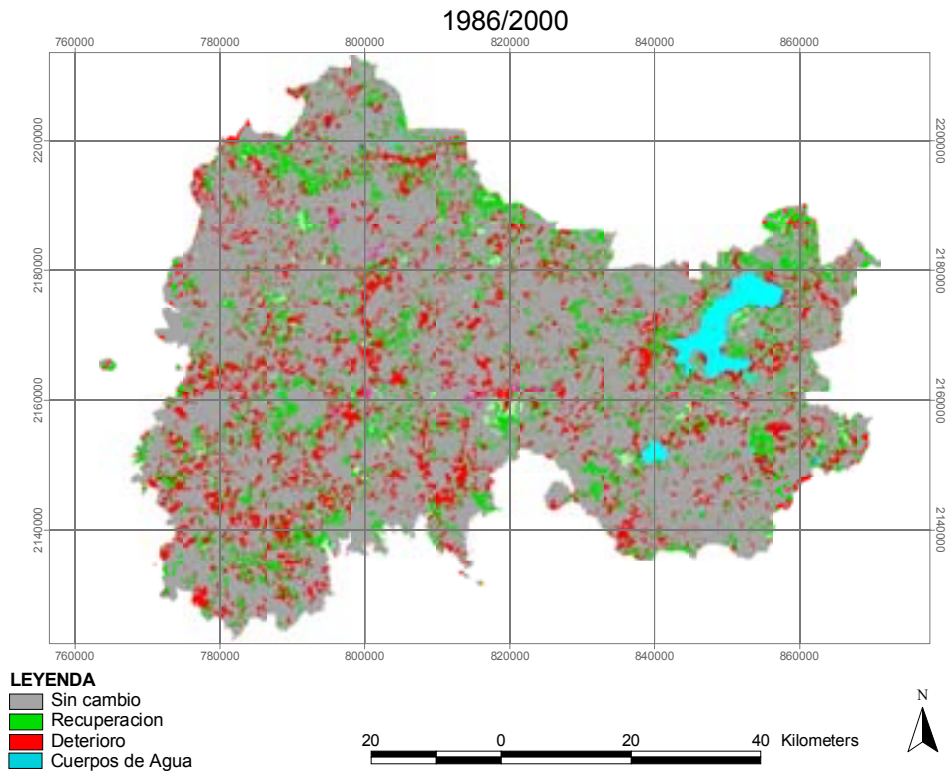


Figura 1. Cambios en cobertura vegetal y uso del suelo.

La dinámica regional de cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo, muestra diferencias subregionales muy significativas. Se observa que en las subregiones Tancítaro y Uruapan domina el cambio de bosque a plantaciones de frutales (específicamente aguacate); en la Meseta se da el cambio de bosque a agricultura con recuperación del bosque de pino; en Pátzcuaro se presenta la recuperación del bosque de pino y áreas abandonadas, con reducción de la agricultura, bosques con vegetación secundaria, bosques de encino y oyamel, pese a la veda forestal en esta última subregión.

Segunda meta

Cuantificar el contenido de carbono en mantillo, suelo y biomasa aérea en cada una de las clases de cobertura vegetal y uso del suelo, seleccionadas en el área de estudio.

Se aplico un método de muestreo jerárquico, estratificado, anidado, con distribución sistemática, producto de la compilación y síntesis de métodos usados por varios autores (Brown and Roussopoulous, 1974; Castellanos *et al.*, 1991; Rentería, 1997; Tipper and De Jong, 1998; Escandón-Calderón *et al.*, 1999; De Jong *et al.*, 1999; Hughes *et al.*, 1999 y 2000; Brown and Delaney, 2000; Ahedo, 2001; De Jong, 2001; Jaramillo *et al.*, 2003), a fin de realizar la determinación de biomasa en diferentes almacenes, realizar inventarios forestales y análisis del cambio en la cobertura vegetal y uso de suelo e integrarla con el contenido de carbono en biomasa aérea, mantillo y suelo (figura 2).

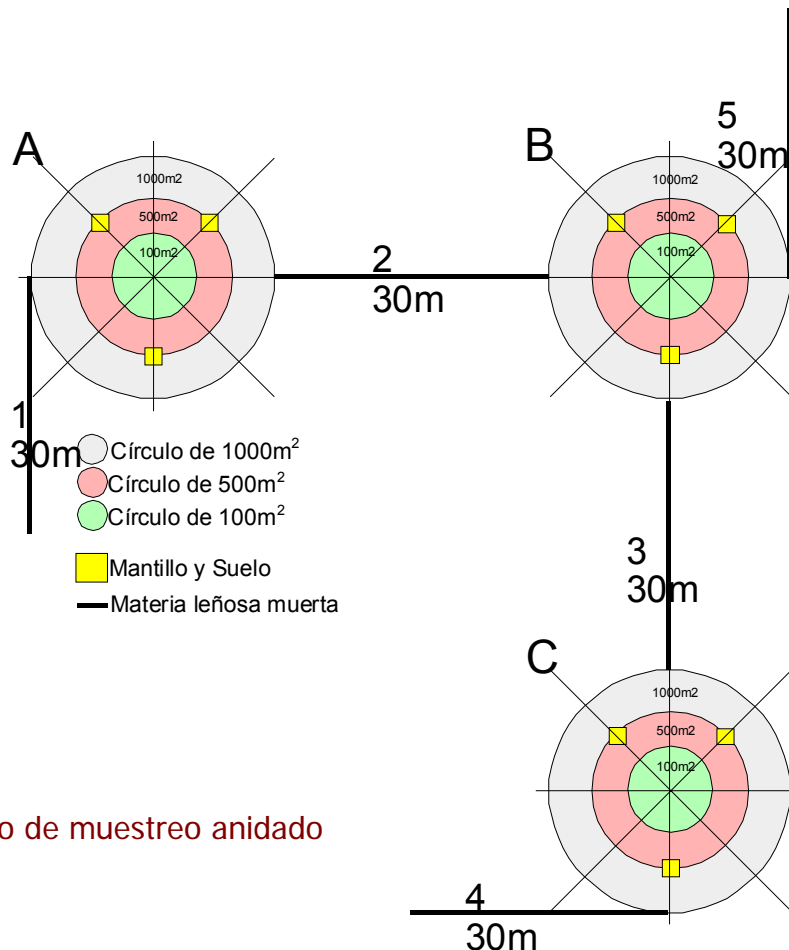


Figura 2. Diseño de muestreo anidado

Aplicando el método de muestreo y las premisas, se seleccionaron 92 sitios con 276 círculos de 1000m² cada uno, en los cuales se registraron 11,833 árboles; se colectaron 828 muestras de mantillo (Pérez, 2007) y 2,484 muestras de suelo (Aviña, 2007).

Los contenidos de carbono (C) en cada una de las clases analizadas, presentan diferencias significativas en el C almacenado en biomasa aérea y mantillo principalmente, derivadas del estado de conservación que tiene cada una de ellas y de las actividades que los propietarios de dichas clases desarrollan, afectando su predio y las vecindades de las otras CVyUS, que se observa en particular con aquellos que tienen ganado. Los resultados de las estimaciones del carbono contenido por clase, permite retirar incertidumbres generadas en estudios globales, aplicar criterios sobre la selección de índices de carbono para otras clases similares de CVyUS y el desarrollo de estudios de línea de base.

Tercera meta

Para estimar los cambios de los contenidos de C de los principales almacenes por clase de cobertura vegetal y uso del suelo, asociados a los procesos de cambio en el uso del suelo a nivel regional en el periodo de estudio, se combinó la matriz de transición de usos del suelo con el contenido promedio de carbono de cada una de las clases seleccionadas (cuadro 6, capítulo 5).

Para la estimación del carbono almacenado en cada clase de CVyUs para el año de 1986, se le asignó a cada clase el valor del contenido de carbono promedio; agrupando la información en una matriz de cambio en el uso del suelo se calcula la diferencia entre las superficies para el año de 1986 y 2000; al multiplicar la superficie con el carbono promedio contenido en cada años, los valores obtenidos permiten apreciar cuanto carbono se pierde cuando se pasa de una clase a otra; los almacenes de carbono más vulnerables son biomasa aérea y mantillo; el suelo no presentó diferencias significativas durante un proceso de cambio.

Perspectiva

Cambio en el uso del suelo

La dinámica del cambio en el uso del suelo observada en la región Purépecha, nos permite apreciar que se carece de un proyecto de ordenamiento territorial, ya que se da un crecimiento anárquico, ejerciendo una presión a las coberturas vegetales remanentes y dando lugar a la fragmentación del paisaje.

En este sentido, se extendieron las áreas destinadas a la agricultura en la parte alta de la subregión Meseta, registrando un desarrollo más tecnificado (presencia de maquinaria agrícola, mejores caminos y casas con más servicios), los bosques degradados están dando lugar a nuevos bosques de pino (que se promueve por las campañas de reforestación que favorecen la dominancia de especies de *Pino spp*; estas áreas tienen una distribución aleatoria en toda la región, que refleja por un lado el abandono de prácticas agrícolas y pecuarias, y por otro, el que sus dueños las dejen en recuperación); pero, hay áreas como en Tingambato, Uruapan y Nuevo San Juan, que los bosques de pino, encino y pino-encino, se modifican para sembrar aguacates (favorecida por el cambio en los factores climáticos como la temperatura y precipitación registrando huertas de aguacate en el Estado de Michoacán a una altura entre 1,800 y 2,200 msnm; Echánove, 2008). Lo mismo pasa en la parte baja del Tancítaro, pero ahí, es el bosque de Oyamel (*Abies religiosa*) que es el que se encuentra mas presionado por el cambio de la cobertura vegetal original hacia un uso del suelo agrícola, pecuario e incluso de asentamientos humanos; en los municipios mencionados, la apertura de áreas agrícolas es muy importante.

Los cambios de la cobertura vegetal, están asociados también a los mercados, por ejemplo: en 1914 (Echánove, 2008) cuando se cerró en Estados Unidos la importación del aguacate Hass (*Persea americana* Mill.), muchas personas empezaron a desarrollar

otros huertos y floricultura quitando los árboles de aguacate. En 1990 se retoma el cultivo del aguacate y a finales de 1997 se reanudan las exportaciones de aguacate fresco a Estados Unidos (Echánove, 2008). La producción registrada en el año de 2006 de aguacate en Michoacán fue de 1,006,129 t/año (Sagarpa, 2007 en Echánove, 2008); Michoacán produce más del 90% del total nacional (Echánove, 2008).

Según Bocco *et al.* (2001), reportan una tasa de deforestación de 2% para los bosques y una tasa de 1.8% para selvas en Michoacán; en la región se registra una transformación de bosques a huertos de aguacate (Ordóñez *et al.*, 2008); esto, en el corto y mediano plazo ejerce mas presión sobre los recursos hídricos aunado al incremento en el uso de fertilizantes y pesticidas que, se necesitan para mantener en producción las plantaciones.

La región Purépecha, presenta un desarrollo claramente diferenciado por subregión y por localidad, con grandes contrastes económicos y sociales que afectan directamente las diferentes coberturas vegetales y el aprovechamiento de los recursos naturales (Toledo *et al.*, 1992; Maserá *et al.*, 1998). La comunidad indígena de San Juan Nuevo Parangaricutiro, esta bien organizada con 24 empresas y aproximadamente mil empleados permanentes; basado en el manejo sostenible de los bosques que son propiedad de la comunidad; ahora, es necesario también considerar la conservación biocultural (Rigoberta Menchu, *pers com*; Otegui-Acha, 2007) en las localidades que conforman la región.

El factor humano, en el contexto del cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo (CVyUS), determina la permanencia, extensión y distribución de cada una de las clases de CVyUS. El incremento de las áreas urbanas (como Uruapan y Pátzcuaro), genera gran cantidad de desechos que son tirados en rellenos sanitarios que no fueron planeados y adecuados para este fin, contaminando el entorno. Es necesario y urgente desarrollar un ordenamiento territorial y un plan estratégico para: normar, regular, incentivar, promover, conservar, proteger, el manejo, uso, empoderamiento y

conocimiento de los recursos naturales, servicios ambientales y de todas las actividades relacionadas (como el turismo), que dependen del estado en la conservación de las coberturas vegetales y los recursos asociados, con la participación de los diferentes actores que conforman los diferentes sectores en la región Purépecha.

Almacenes de carbono

En todas las clases de CVyUS, el suelo es el almacén de carbono más estable, ya que presenta variaciones mínimas en su contenido (figura 2, capítulo 5); se observó que al retirar la cobertura vegetal y dejar al descubierto el suelo, es vulnerable a procesos de lixiviación y erosión (ejemplo: eutricación en el Lago de Pátzcuaro). En algunas áreas, la calidad del suelo ha bajado mucho y los productores de maíz, registran una producción de 0.48 t maíz/ha (*pers com*), el promedio nacional según Vega y Ramírez (2004), es de 2.55 t maíz/ha (con un mínimo de 1.33 y un máximo de 3.82 t maíz/ha).

La biomasa aérea (Ordóñez *et al.*, 2008) y el mantillo (Pérez, 2006), son los almacenes que se pierden más rápido durante el proceso de cambio de la cobertura vegetal hacia un uso de suelo (Ordóñez *et al.*, 2008). Los bosques de encino, son los más afectados porque en las campañas de reforestación se concentran en sembrar especies de *Pinus spp.* (Ordóñez *et al.*, 2008; Galeana, 2008) afectando la composición y estructura de estos bosques y por ende un detrimento a la biodiversidad de la región.

Método

El ejercicio de búsqueda, compilación, análisis, selección, validación y aplicación de una o unas metodologías, encaminadas al desarrollo de una línea base, para saber cuanto carbono hay en una cobertura vegetal, debe ser consistente, reportar los resultados en unidades homologadas, comparables con otros estudios, especificar la escala en la que se desarrolla la investigación y la temporalidad, para que en caso de repetirse, se realice

con la mejor precisión posible (se deben incluir también variables ambientales como: temperatura, precipitación y suelo entre otras).

El diseño de muestreo que se aplicó en este proyecto, tiene elementos estadísticos robustos que permiten definir la hectárea tipo en cuanto a los almacenes de carbono se refiere, pero se eleva su costo si se analizan los almacenes suelo y mantillo en laboratorio, al nivel de detalle en que se desarrollo. En este estudio se diseño un muestreo anidado, jerárquico, estratificado con distribución aleatoria (Ordóñez *et al.*, 2008).

El método desarrollado, se aplicó en Oaxaca 10 comunidades (Santiago Xiacuí, Calpulálpam de Méndez, La Trinidad, San Bartolomé Loxicha, Santa María Zoogochi, San Juan Yagila, Santiago Teotlaxco, San Miguel Maninaltepec y San Juan Metaltepec) con bosque mesófilo de montaña y otras coberturas forestales, a fin de desarrollar su línea base de contenido de carbono en biomasa aérea, establecieron una parcela de monitoreo permanente (se han establecido un promedio de 50 parcelas de monitoreo con una superficie de 500 m² en los predios en las 10 comunidades, a fin de que se pueda medir el volumen de biomasa que se incrementa cada año y su equivalente en Mg de CO₂ capturado).

La aplicación del conocimiento adquirido y del trabajo desarrollado en Oaxaca en esta misma temática, permitieron la apertura del “Mercado Voluntario de Carbono en México” el 8 de mayo del 2008, recibiendo el apoyo y reconocimiento por parte de los titulares de la Secretaría del Medioambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional Forestal y Pronatura México, A.C. (Notimex, 2008; La Jornada, 2008; Guadarrama, 2008).

El 14 de mayo del 2008, se realiza el pago a 10 comunidades de Oaxaca por la primera venta del servicio ambiental: “secuestro o captura de carbono”, logrando colocar 15 mil Mg de CO₂ con diferentes compradores (Farmacéutica Chinoin, Televisa, Manifest, +Nescafé, Ben & Jerrys, entre otros), a un costo de \$10 dólares por Mg y entregando a

las comunidades un monto total de 150 mil dólares (Martínez, 2008). En este momento, existen los instrumentos legales para la compra -venta del servicio ambiental: secuestro de carbono (Pronatura México A.C.; CONAFOR programa de pago por servicios ambientales); la perspectiva crece, más familias y comunidades se suman al proyecto.

La generación y aplicación del conocimiento adquirido es un reto para todos los profesionales en nuestro país y en todo el mundo; en la medida que alcancemos esta meta, el crecimiento y el desarrollo sostenible en armonía con la naturaleza y con nuestros vecinos, será una realidad.

Al concluir este proyecto, me doy cuenta de que la investigación apenas comienza y éste, es un buen inicio.



Referencias

- Ahedo, L.R. 2001. Biomasa y almacenes de carbono radical en la región de los Tuxtlas, Veracruz: variaciones con el cambio de uso del suelo. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad de México.
- Aviña, F. 2007. Estimación del contenido de carbono en suelo en diferentes clases de cobertura vegetal y uso del suelo en la región Purépecha, Michoacán. Facultad de Ciencias, UNAM. Nivel Licenciatura. 78 p.
- Brown, S. y Roussopoulos. 1974. Estimating biases in the planar intersect method for estimating volumes of small fuels. *Forest Science*. 20:350-356.
- Brown, S. and M. Delaney. 2000. Standard operating procedures for measuring carbon in forests and agriculture projects. Version: 1.00 Winrock International, October.
- Castellanos, J., J.M. Maass and J. Kummerow. 1991. Root biomass of a dry deciduous tropical forest in Mexico. *Plant and Soil*. 131:225-228.
- Daily, G.C. 1995. Restoring value to the world's degraded lands. *Science*, 269:350-354.
- de Jong, B.H.J., M.A. Cairns, P. Haggerty, N. Ramirez-Marcial, S. Ochoa-Gaona, J. Mendoza-Vega, M. González-Espinosa and I. March-Mifsut. 1999. Land-Use Change and Carbon Flux Between 1970s and 1990s in Central Highlands of Chiapas, Mexico. *Environmental Management*. 23, 373-385.
- de Jong, B. H. J. 2001. Uncertainties in estimating the potential for carbon mitigation of forest management. *Forest Ecology And Management*. 154, 85-104.
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler, y J. Wisniewski. 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, 263, 185-190.
- Echánove, F. 2008. Abriendo fronteras: el auge exportador del aguacate mexicano a Estados Unidos. *Anales de Geografía*. 28 (1), 9-28.
- Escandón-Calderón, J., B.H.J. de Jong, S. Ochoa-Gaona, I. March-Mifsut and M.A. Castillo-Santiago. 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* 40, 71-84.
- FAO. 1995. Forest resources assesment 1990, FAO forestry paper 124, Roma.
- García-Oliva, F. y A. Ordóñez. 1999. El Papel de los suelos forestales en la captura de

carbono. Nuestro Bosque. Gobierno del Estado de Michoacán- Comisión Forestal del Estado, Vol. 1, N°1, Pág. 8-11, Oct-Dic.

Guadarrama, R. 2008. Once Noticias. 8 de Mayo.

Hughes R.F., J.B. Kauffman and V.J. Jaramillo. 1999. Biomass, carbon, and nutrient accumulation in tropical evergreen secondary forest of the Los Tuxtlas region, Mexico. *Ecology* 80:1892–907.

Hughes F., J.B. Kauffman and V.J. Jaramillo. 2000. Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Me´xico. *Ecol Appl* 10:515–27.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 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. Biomass, carbon, and nitrogen pool in Mexican Tropical Dry Forest landscapes. *Ecosystems*. 6:609-629.

La Jornada. 2008. <http://www.jornada.unam.mx/2008/05/09/index.php?section=sociedad&article=048n2soc>

Lambin, E.F. 1994. Modelling deforestation processes: a review *Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites, TREES Series B, Research report No. 1*. Office of the European Commission, Directorate-General XIII. Luxemburg. 113 pp.

Martínez, R. 2008. Reciben comunidades pago por captura de carbono. *Noticias Oax*. Domingo 18 de mayo.

Masera O., M.J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from mexican forests: 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*. 1a Ed. 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.

Notimex. 2008. <http://www.exonline.com.mx/XStatic/excelsior/template/content.aspx?se=nota&id=213481>

- Ordóñez, A. 1999. Estimación de la Captura de Carbono en un Estudio de Caso. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP. México DF. 72p.
- Ordóñez, A. y O. Maser. 2000. La sustentabilidad, el manejo de recursos naturales y sus repercusiones globales. Vinculación. Edición especial de ensayos N° 7, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Año 4:17-21. Morelia, Michoacán.
- Ordóñez, A. y O. Maser. 2001. La Captura de carbono ante el cambio climático. Madera y Bosques 7 (1): 3-12. Departamento de Productos Forestales y Conservación de Bosques del Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México.
- Ordóñez-Díaz, J.A.B. 2007. Árboles para reciclar carbono: la guerra contra el calentamiento global. ProNATURA, por la gente por la tierra. Número 25 Oct-Nov. Pág. 46-51.
- Ordóñez, J.A.B., B.H.J. de Jong, F. García-Oliva, F.L. Aviña, J.V. Pérez, G. Guerrero, R. Martínez and O. Maser. 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. 255, 2074-2084.
- Otegui-Acha, M. 2007. Developing and testing a methodology and tools for the inventorying of Sacred Natural Sites of Indigenous and Tradicional Peoples in Mexico. Pronatura México-The Rogorta Menchu Tum Foundation, in Collaboration with IUCN. 107 p.
- Palacio-Prieto, J.L., G. Bocco, A. Velásquez, J.F. Mas, F. Takaki-Takaki, A. Victoria, L. Luna-González, G. Gómez-Rodríguez, J. López-García, M. Palma-Muñoz, I. Trejo-Vázquez, A. Peralta-Higuera, J. Prado-Molina, A. Rodríguez-Aguilar, R. Mayorga-Saucedo, y F. González-Medrano. (2000), La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. No 43:183-203.
- Pérez, J. 2006. "Estimación del contenido de carbono en el mantillo en diferentes clases de cobertura vegetal y uso del suelo en la región Purépecha, Michoacán". ENEP Cuautitlán. Nivel Licenciatura. 53 p.
- Rentería, L.Y. 1997. Biomasa y almacenes de carbono radical en tres comunidades vegetales en la costa de Jalisco, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad de México.
- Sathaye J. A., W.R. Makundi, K. Andrasko, R. Boer, N.H. Ravindranath, P. Sudha, S. Rao, R. Lasco, F. Pulhin, O. Maser, A. Ceron, J. Ordóñez, X. Deying, X. Zhang and S. Zuomin. 2001. Carbon mitigation potential and cost of forestry options in Brazil, China, India, Indonesia, Mexico, The Philippines and Tanzania. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 6: 185-211.

- Tipper, R. and B.H. De Jong. 1998. Quantification and regulation of carbon offsets from forestry: comparison of alternative methodologies, with special reference to Chiapas, Mexico. *Commonwealth Forestry Review* 77: 219-228.
- Toledo, V., P. Álvarez-Icaza y P. Ávila (ed). 1992. Plan Pátzcuaro 2000 Investigación Multidisciplinaria para el desarrollo sostenido. Fundación Friedich Ebert Stiftung. 320 pp.
- Vega, D y P. Ramírez. 2004. Situación y perspectivas del maíz en México. Universidad Autónoma de Chapingo. 56 p.