



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Centro de Investigaciones en Ecosistemas

“Captura de carbono y dinámica de cambio
de uso de suelo en la Región Purépecha:
escenarios y opciones de mitigación
utilizando el modelo CO₂LAND”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

(BIOLOGÍA AMBIENTAL)

P R E S E N T A

BIOL. SANDRO CERVANTES NÚÑEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. OMAR RAÚL MASERA CERUTTI

MÉXICO, D.F.

FEBRERO, 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Dedicatoria

A mis seres amados...
...mi esposa, mi hija, mi madre y mis tías.

*“No hay que confundir nunca el conocimiento con la
sabiduría. El primero nos sirve para ganarnos la
vida; la sabiduría nos ayuda a vivir”*

Sorcha Carey

Agradecimientos

Al Posgrado en Ciencias Biológicas por permitirme la gran oportunidad de continuar mis estudios y preparación, en especial a Lilia Jiménez, Lilia Espinoza y Dolores Rodríguez por todo el apoyo y facilidades en este largo y tortuoso camino de titulación.

A CONACyT y a la DGEP por el apoyo económico sin el cual no hubiese podido sobrevivir para finalizar mis estudios.

Al Centro de Investigaciones en Ecosistemas-UNAM (CIEco) Campus Morelia (Directivos, Administrativos, Profesores Titulares y Técnicos Académicos), por brindarme todas las facilidades y conocimientos para realizar el presente trabajo.

Al Dr. Omar Masera por todos los conocimientos que me regaló, por su apoyo, comprensión y paciencia. Simple y complejamente gracias Dr. por haber sido mi Tutor Académico.

Al Dr. Bernaardus H. J. de Jong por esa gran capacidad de explicarlo todo tan claro y de lograr que hasta el más apático se interese en el tema más complejo. Gracias Ben

Al Dr. Víctor Jaramillo por hacer de la ecología y el conocimiento un arte exquisito, donde hasta el más mínimo detalle es enormemente disfrutable e importante. Gracias Víctor por tu visión.

Al Dr. Diego Pérez y a la Dra. Irma R. Trejo por sus valiosísimos comentarios y observaciones sobre mi tesis. Gracias por el tiempo y atención que me regalaron, y por la mejoría académica que he ganado de ustedes.

A mi esposa Carmen Godínez por su cariño y apoyo incondicional, por su tiempo, dedicación, paciencia, comprensión, amistad, sacrificios, alegrías y cientos de cosas más para las cuales necesitaría varios volúmenes solo para mencionarlas. Gracias por existir.

A mi hija Citlalli S. Cervantes por ser una de las luces más grandes al final del camino y por desbordar de alegría mi existencia.

A mi madre por el apoyo incondicional moral y económico, por estar ahí cuando ocurrían las peores y las mejores cosas. Por enseñarme a caminar en muchos tipos de caminos y en las condiciones más adversas. Gracias por darme las alas y por ser mi madre.

A mi tía Yolanda por todo el gran apoyo económico y por ser mi ángel guardián cuando más oscuro se volvía el día. Gracias por tantos años de tu vida.

A mi tía Esmeralda por su dedicación y empeño en dos de las fases más difíciles de mi vida.

A mis compañeros de laboratorio por sus consejos y observaciones y a mis amigos Rolando Prado y Gerard Chifert (Tuco) por honrar la palabra amistad.

Índice General

	Página
Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen	iii
Índice General	iv
Índice de tablas y Figuras	v
I. Introducción	1
II. Marco teórico	3
2.1. El cambio climático	3
2.2. Los bosques y el carbono	4
2.3. La deforestación por cambio de uso de suelo	5
2.4. La emisión y captura de carbono	7
2.5. Escenarios futuros de referencia y de mitigación	8
2.6. Los modelos y la dinámica de carbono	9
III. Objetivos	11
IV. Área de Estudio	11
V. Métodos	12
5.1. Los Modelos CO2Fix y CO2Land	12
5.2. Coberturas Vegetales consideradas en el estudio	15
5.3. Parametrización del Modelo CO2Fix	17
5.4. Parametrización del modelo CO2Land	20
5.5. Desarrollo de Línea base	22
5.6. Desarrollo de Escenario de Mitigación	22
VI. Resultados	22
6.1. Parametrización del CO ₂ Fix	22
6.2. Simulación a nivel de rodal o cobertura vegetal	24
6.3. Parametrización del modelo CO ₂ Land	29
6.4. Simulación a nivel de paisaje	30
VII. Discusión	34
7.1. Parametrización	34
7.2. Simulación a nivel de rodal	35
7.3. Cambio de uso de suelo y escenarios del CO ₂ Land	37
7.4. Deforestación versus Reforestación	38
7.5. Los modelos como herramientas útiles y económicas de análisis	39
VIII. Conclusiones	40
IX. Bibliografía	41

Índice de tablas y figuras.

Figuras

Fig. 1. Mapa que muestra los municipios de la Región Purépecha y su localización dentro del estado y del país.

Fig. 2. Representación simplificada de los flujos y almacenes de carbono en el modelo CO₂Fix.

Fig. 3. Interfase del modelo CO₂Land donde se puede apreciar la entrada para la matriz de transición y de los archivos CO₂Fix.

Fig. 4. Grafico que muestra las densidades de carbono por tipo de cobertura vegetal para la región Purépecha.

Fig. 5. Modulo de biomasa y base de datos del CO₂Fix.

Fig. 6. Mapa que muestra la estimación del área forestal perdida para la región Purépecha de 2000 a 2035.

Fig. 7a. Escenarios de acumulación de carbono en biomasa, suelo, productos y total, generados por el CO₂Fix para la cobertura vegetal agricultura.

Fig. 7b. Escenarios de acumulación de carbono en biomasa, suelo, productos y total, generados por el CO₂Fix para la cobertura vegetal pastizal.

Fig. 7c. Escenarios de acumulación de carbono en biomasa, suelo, productos y total, generados por el CO₂Fix para la cobertura vegetal frutales.

Fig. 7d. Escenarios de acumulación de carbono en biomasa, suelo, productos y total, generados por el CO₂Fix para la cobertura vegetal bosque degradado.

Fig. 7e, f, g y h. Escenarios de acumulación de carbono en biomasa, suelo, productos y total, generados por el CO₂Fix para las coberturas vegetales forestales.

Fig. 7i. Escenarios de acumulación de carbono en biomasa, suelo, productos y total, generados por el CO₂Fix para la cobertura vegetal matorral.

Fig. 8. Dinámicas Markovianas para las coberturas vegetales consideradas en el análisis del CO₂LAND.

Fig. 9. Gráfica que muestra la línea base regional por clase de cobertura vegetal.

Fig. 10. Gráfica que muestra la línea base regional total.

Fig. 11. Gráfica que muestra con más detalle la parte final de la línea base regional total y el proyecto de mitigación.

Fig. 12. Gráfica que muestra las emisiones anuales con y sin la aplicación del proyecto simulado de reforestación.

Tablas

Tabla 1. Tipos de coberturas vegetales consideradas para este estudio

Tabla 2. Parámetros necesarios para modelar cada cobertura vegetal en el modelo CO₂FIX V. 3

Tabla 3. Contenido de carbono (Ton) y relación biomasa radicular/biomasa aérea por cobertura vegetal utilizados en la modelación con CO₂Fix

Tabla 4. Parámetros por cobertura vegetal utilizados en la modelación con CO₂Fix

Tabla 5. Principales parámetros usados para simular las coberturas vegetales de la región Purépecha.

Tabla 6. Matriz de transición obtenida a partir de dinámicas Markovianas y porcentaje de cambio en superficie (pérdidas/ganancias) de cada cobertura.

Resumen

Las actividades humanas están alterando el clima del mundo. Estamos incrementando la concentración atmosférica de gases que amplifican el "efecto invernadero" natural que hace habitable la Tierra. El más importante de estos gases es el bióxido de carbono (CO₂), cuya concentración atmosférica, se ha incrementado en los últimos 15 años debido principalmente tanto a la quema de combustibles fósiles, como al cambio de uso de suelo, particularmente a la deforestación. El rápido avance de la deforestación a una escala global, resulta en significantes emisiones de CO₂ a la atmósfera. Conocer los flujos y captura de carbono a nivel de paisaje, es crucial para la adecuada implementación de medidas de mitigación. En este estudio se construyó un escenario de referencia (línea base) y uno de mitigación (proyecto de reforestación) para la región Purépecha, utilizando los modelos de simulación CO₂Fix y CO₂Land, para un periodo de 28 años (1986 – 2014). Se analizaron 7 coberturas vegetales de clima templado para la construcción de los escenarios, y los modelos fueron alimentados con parámetros reportados en publicaciones nacionales e internacionales. Los resultados del análisis muestran que en la región se presentará una marcada disminución de sus coberturas forestales originales y un aumento de los bosques degradados. En el escenario de referencia la región funcionará hasta el 2012 como una fuente de carbono emitiendo 7.7 Tera gramos de carbono (TgC) durante los 28 años del estudio y un promedio de 277 Giga gC anual. El contenido de carbono a nivel regional se comienza a recuperar a partir del 2014 pero nunca llegando a los niveles en los que inició en el año 1986. El escenario de mitigación consiste en reforestar 2000 hectáreas anuales con pino a partir del año 2000, que se traduce en una reducción en las emisiones totales de 1.2 TgC. En este caso, la región se vuelve sumidero de carbono en el 2011. Una de las soluciones más adecuadas para reducir la deforestación y degradación forestal, sería fomentar la conservación y reducir la degradación forestal, y convertir al sector forestal en fuente de divisas, empleo y grandes beneficios ambientales. Ambos modelos resultaron ser una herramienta útil para crear escenarios sobre la dinámica regional del Carbono.

Abstract

The human activities are altering the climate of the world. We are increasing the atmospheric gas concentration that amplifies the natural "greenhouse effect" that makes habitable our planet. Most important of these gases is carbon dioxide (CO₂), whose atmospheric concentration has been increased in the last 15 years, due mainly as much to burns of fossil fuels as to the land use change, particularly to the deforestation. The fast advance of the deforestation on a global scale, results in significant emissions of CO₂ to the atmosphere. To know the flows and capture carbon at landscape level is crucial for the suitable implementation of carbon mitigation measures. In this study was constructed a reference scenario (Baseline) and one of mitigation (reforestation project) for the Purépecha region, using the models of simulation CO₂Fix and CO₂Land, for a period of 28 years (1986 - 2014). 7 climate tempered vegetal covers were analyzed for the construction of the scenarios, and the models were fed with parameters reported in national and international publications. The results of the analysis showed that in the region will have a remarkable diminution of its original forest covers and an increase of the degraded forests. In the reference scenario shown that the region will work until the year 2012 as a carbon source, emitting 7,7 Tera grams of carbon (TgC) during the 28 years of the study and a average of 277 annual Giga gC. The content of carbon at regional level begun to recover at 2014 but never arriving at the levels in which it initiated in 1986. The mitigation scenario consists of reforesting 2000 hectares annually with pine beginning in the year 2000, that is translated in a total emissions reduction of 1,2 TgC. In this case, the region becomes a carbon sink at 2011. One of the solutions more suitable to reduce the deforestation and forest degradation would be, to foment the conservation and to reduce the forest degradation, and to turn the forest sector in source of currencies, employment and great environmental benefits. Both models could be a useful tool to create scenarios about the regional dynamics of Carbon.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, es un fenómeno que ha venido ganando la atención de la comunidad científica desde hace poco más de 2 décadas y actualmente, a nivel mundial, representa uno de los problemas más serios a los que se enfrenta la humanidad. Conscientes de ello, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) constituyeron en 1988 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). La misión de este Grupo es evaluar en términos exhaustivos, objetivos, abiertos y transparentes la información científica, técnica y socioeconómica disponible sobre el cambio climático en el mundo. Los informes del IPCC tratan de dar a conocer de manera equilibrada los diferentes puntos de vista sobre el cambio climático. Desde su creación, el IPCC ha producido una serie de publicaciones que son ya obras de referencia en la materia y que utilizan gran número de responsables de políticas, científicos, otros expertos y estudiantes.

La Primera Conferencia Mundial sobre el Clima reconoció en 1979 que el cambio climático era ya un problema grave. Este encuentro científico investigó cómo el cambio climático puede afectar la actividad del hombre y formuló una declaración en la que se exhortaba a todos los gobernantes "a controlar y prever potenciales cambios en el clima provocados por el hombre que pudiesen resultar adversos al bienestar de la humanidad" (IPCC, 2001a). El último informe del IPCC (2007) ha confirmado la gravedad del problema. La evidencia científica muestra que las concentraciones atmosféricas globales de bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) se han incrementado marcadamente como resultado de las actividades humanas desde 1750 (Revolución Industrial). El incremento global en las concentraciones de CO_2 es el principal motor del cambio climático y se debe principalmente al uso de combustibles fósiles y al cambio de uso de suelo, mientras que las emisiones de CH_4 y N_2O se deben principalmente a la agricultura.

En nuestro país se han llevado a cabo estudios de caso sobre la dinámica de cambio de uso del suelo y emisiones de carbono asociadas a este proceso, para estimar el contenido de carbono en los diferentes reservorios forestales (Biomasa, Suelos y Mantillo) (De Jong y col., 1999, 2000a, 2000b; Maser y col., 1992, 1995a, 1995b; Ordóñez, 2003; entre otros). En estos trabajos, se estudia la dinámica del carbono en los ecosistemas forestales, es decir, las modificaciones a los flujos y almacenes de carbono derivadas de los patrones de cambio de uso del suelo, pero en ninguno de estos estudios se han utilizado modelos de simulación por computadora, que permitan generar una línea base de carbono entre las diferentes coberturas vegetales y una línea base del carbono total de una región determinada. A la fecha, para nuestro país existen pocos trabajos en los que se emplean modelos de simulación para estudiar alguna fase de la dinámica del carbono. Sólo existen tres trabajos (Maser y col., 2003; Ordóñez, 1999; De Jong y col., 1996; y Olguín y col., sometido), que utilizan el modelo de simulación

CO₂Fix para escenificar la acumulación de biomasa y carbono, en distintas especies de árboles, bajo condiciones específicas.

Tomando en cuenta lo anterior, se pretende con este trabajo evaluar 2 modelos de simulación por computadora, los cuales podrían ser bastante útiles para generar de forma práctica y confiable, líneas base de emisión/captura de carbono a nivel regional, tomando en cuenta el cambio de uso de suelo que ocurra dentro del periodo de tiempo de interés.

Por otro lado, debido a la carencia de información detallada de los flujos netos de carbono, derivados de los patrones de cambio de uso del suelo a escala regional y temporal para nuestro país, se considero trascendental la elaboración de este tipo de estudio donde se integre la información disponible y se genere información que pueda utilizarse en estudios posteriores más profundos y avanzados que generen bases de datos confiables y detalladas sobre la dinámica de dicho carbono regional. La información que se generó con este estudio podría considerarse aproximada, debido a que algunos de los parámetros utilizados se manejaron de forma conservadora, atendiendo al tiempo disponible para elaborar este estudio, a la profundidad del estudio (maestría) y a la estabilidad de los modelos.

De forma general, en este trabajo se utilizaron los datos regionales disponibles sobre CUS, clasificación de coberturas vegetales, parámetros (regionales, nacionales e incluso internacionales), climáticos y eco-biológicos de las especies dominantes de dichas coberturas, y se probó la utilidad de dos modelos de simulación por computadora (CO₂Fix y CO₂Land), para crear dos escenarios posibles de línea base de carbono a nivel regional global y a nivel regional por cobertura vegetal. También se modeló un escenario usando un proyecto extensivo de reforestación como opción de mitigación.

La tesis consta de 8 capítulos. En el primer capítulo se presenta una breve introducción sobre el problema de estudio, su origen, su importancia, su situación actual y la falta de información al respecto. En el segundo capítulo se presenta un marco teórico sobre el problema de estudio. En el se definen y explican los conceptos, teorías y modelos utilizados en este trabajo. En el tercero se mencionan el objetivo principal de este trabajo y sus objetivos particulares. En el cuarto se lleva a cabo una breve descripción del área de estudio tanto a nivel fisiográfico como socioeconómico. En el quinto se detalla la metodología llevada a cabo para parametrizar los modelos y crear los escenarios de línea base y mitigación. En el sexto se presentan los resultados obtenidos en el trabajo y se detalla la información obtenida con los modelos. En el séptimo se lleva a cabo la discusión de los resultados, se comparan con los resultados obtenidos por otros autores, se discuten los problemas técnicos experimentados durante la parametrización del modelo y se mencionan las posibles implicaciones y consecuencias de los mismos en los resultados. En el octavo capítulo se presentan las conclusiones del trabajo y las recomendaciones para estudios próximos. Al final del escrito se proporciona la bibliografía consultada durante la realización de esta tesis.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 El Cambio Climático

El cambio climático es una alteración significativa del clima global, resultado del aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI's), tales como el bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y clorofluorocarbonos (CFCs) (Houghton *et al.*, 1990, 1992). Estos gases absorben y reemiten la radiación de onda larga, devolviéndola a la superficie terrestre, causando el aumento de temperatura a nivel planetario. Este aumento de temperatura lleva consigo cambios en los patrones de evapotranspiración y de precipitación globales, aumento en el nivel del mar, derretimiento de glaciares y masas de hielo polares, así como en un sin número de otros fenómenos. Aunque existe un acuerdo general sobre estas conclusiones, hay una gran incertidumbre con respecto a las magnitudes y las tasas de estos cambios a escalas regionales (EEI, 1997).

De todos los GEI's, el CO_2 es el que más contribuye al cambio climático global debido a su concentración atmosférica. De forma natural, este gas se libera a través de fenómenos tectónicos y a través de la respiración aerobia, también, a través de procesos de formación de suelos y combustión de compuestos con carbono y la evaporación oceánica. Se captura al disolverse en los océanos y consumirse en los procesos fotosintéticos (IPCC, 2007). La concentración atmosférica de CO_2 , ha aumentado de aproximadamente 280 ppm (pre-industrial) a 379 ppm en 2005. Lo alarmante es que la concentración actual de CO_2 jamás se había alcanzado en la historia de la humanidad y mucho menos sobrepasado en los últimos 650,000 años (180 a 300 ppm). La tasa de incremento de la concentración del CO_2 fue la más grande durante los últimos 10 años (1995-2005 promedio: 1.9 ppm por año), comparada con la el promedio obtenido de las mediciones continuas desde 1960 (1960-2005 promedio: 1.4 ppm por año). Las emisiones anuales de CO_2 por quema de combustibles fósiles, se han incrementado de un promedio de 6.4 PgC en la década de los 90's, a 7.2 PgC en lo que llevamos de la década actual. Las emisiones anuales de CO_2 asociadas con el cambio de uso de suelo, se han estimado en un promedio de 1.6 PgC durante la década de los 90's (IPCC, 2007).

Los cambios y consecuencias del cambio climático que se proponen para los próximos 100 a 150 años, se basan íntegramente en modelos de simulación. Comprensiblemente la gran mayoría de los modelos se han concentrado sobre los efectos de la contaminación antrópica de la atmósfera por GEI's. La mayor preocupación presente, es determinar cuánto se calentará la Tierra en un futuro cercano.

Según los últimos datos reportados en el sumario para tomadores de decisiones publicado por el IPCC (2007), el clima ha sufrido los siguientes cambios debido a las actividades humanas:

- Según el registro instrumental de la temperatura superficial global, los últimos 11 años se consideran los más cálidos desde 1850.
- La tendencia lineal de calentamiento durante los últimos 50 años (prom. 0.13 °C por década) es casi el doble de la estimada para los últimos 100 años.
- El incremento total de la temperatura desde 1850 hasta el 2005 es de 0.75 °C en promedio.
- El nivel global promedio del mar se elevaba a un promedio de 1.8 mm por año durante 1961 a 2003, pero mediciones recientes (1993-2003) han confirmado que la tasa de elevación ha aumentado a un promedio de 3.1 mm por año.
- Se ha observado un incremento significativo en la precipitación en zonas orientales de Norteamérica y Sudamérica, en la parte norte de Europa y en el norte y centro de Asia. Una disminución en la humedad se ha observado en la parte sur del Sahara, en el mediterráneo, en el sur de África y en partes del sur de Asia. La actividad de los ciclones ha aumentado en el atlántico norte desde 1970. Sequías más intensas se han registrado sobre amplias áreas desde 1970, particularmente en los trópicos y subtrópicos.

Como conclusión, la temperatura global promedio podría aumentar en 6 °C para el año 2100, si el desarrollo global continúa a los ritmos actuales. Si se incorpora la influencia de los aerosoles atmosféricos a los modelos, el calentamiento disminuye a aproximadamente 0.2 °C por década, en los próximos 100 años. Esta tasa de cambio climático, aún así, es más rápida que en cualquier otro momento de la historia de la Tierra (Glick, 1997)

Asociados a estos potenciales cambios, habrá grandes alteraciones en los ecosistemas globales. En todo el mundo, los glaciares están desapareciendo debido al calentamiento global, no sólo en los trópicos, sino también en las zonas templadas (UNEP, 2007). Trabajos científicos sugieren que los ámbitos de distribución de especies arbóreas, podrán variar significativamente como resultado del cambio climático global. Por ejemplo, estudios realizados en Canadá proyectan pérdidas de aproximadamente 170 millones de hectáreas de bosques en el sur Canadiense y ganancias de 70 millones de hectáreas en el norte de Canadá, por ello un cambio climático global como el que se sugiere, implicaría una pérdida neta de 100 millones de hectáreas de bosques (Sargent, 1988).

2.2 Los bosques y el carbono

La FAO ha definido al bosque como aquella superficie arbolada que posee una densidad del dosel mayor o igual a 10% o cuyos árboles poseen una altura mayor o igual a 5 m. También se considera bosque aquellos rodales naturales jóvenes y todas aquellas plantaciones con propósitos forestales que cumplan con cualquiera de los requerimientos citados arriba. Finalmente, se consideran dentro de la definición, aquellas áreas que normalmente formaban parte del área forestal, cuya

cobertura fue removida como resultado de la intervención humana o por causas naturales, pero se espera se regeneren nuevamente a bosque (FAO/UNEP, 1999). Los bosques cubren hoy en día cerca de 4,000 millones de hectáreas, el equivalente a un 30 por ciento de la superficie terrestre. Hay 10 países que concentran dos tercios de este patrimonio forestal: Australia, Brasil, Canadá, China, República Democrática del Congo, India, Indonesia, Perú, Federación Rusa y Estados Unidos (FAO, 2005).

En México, el 72% de la superficie es de aptitud forestal con un total de 141.7 millones de hectáreas. La superficie total arbolada nacional se estima en 56.8 millones de hectáreas, la cual se integra por bosques de coníferas y hojosas que cubren 30.4 millones de hectáreas y por selvas altas, medianas y bajas en una extensión de 26.4 millones de hectáreas (CONAFOR, 2006).

Los bosques tienen un efecto directo en el clima tanto a escala local como regional y continental, debido a su influencia en la temperatura del suelo, la evapotranspiración, la calidad del suelo, el albedo (o reflectividad) de la superficie, la formación de nubes y las precipitaciones (Latif et al., 1994). Además, constituyen un reservorio fundamental de carbono (Maser y col., 1992). Se entiende como sumidero al ecosistema capaz de absorber más CO₂ del que emite, actuando como una trampa de carbono.

Si se les maneja adecuadamente, los bosques pueden funcionar como sumideros de carbono, lo cual contribuiría significativamente a reducir las emisiones producidas por el sector energético (Maser y col., 1992). Por otro lado, algunas opciones de captura de carbono, ofrecen una alternativa bastante viable y competitiva con las medidas tomadas por el sector energético y otros sectores para reducir las emisiones de CO₂. Para nuestro país, es particularmente relevante el examinar los costos de efectividad de las opciones de manejo forestal, que permiten una reducción a las emisiones de CO₂ y un incremento en la captura del mismo (Maser y col., 1992). De esta forma, al hacer de los bosques, sumideros netos de carbono, se logra ganar tiempo mientras se desarrollan alternativas de disminución de emisiones en el sector energético, el cual depende mayormente de los combustibles fósiles.

2.3 La deforestación por cambio de uso de suelo

La deforestación se entiende como la remoción a largo plazo o permanente de la cobertura forestal y su conversión a un uso de suelo no forestal (Lund, 1999 citado en Watson y col., 2000). La FAO (2005), además de lo anterior, también considera deforestación, a la reducción a largo plazo de la cubierta forestal por debajo del 10% de la cobertura original.

A nivel mundial, la superficie forestal se reduce cada año en unos 13 millones de hectáreas a causa de la deforestación, aunque el ritmo de pérdida neta disminuye gracias a las plantaciones forestales y la expansión natural de los bosques. La pérdida anual neta de superficie forestal entre 2000 y 2005 fue de 7,3 millones de

hectáreas anuales, mientras que entre 1990 y 2000 fue de 8,9 millones de hectáreas. El estimado más reciente equivale a una deforestación neta del 0,18 por ciento de la superficie mundial cada año (FAO, 2005).

Para México los estimados de deforestación no son muy confiables; varían de 370,000 Ha/año (SARH, 1994) a 1.5 millones de Ha/año (Toledo, 1989). Velásquez y col. (2002), calculan una pérdida de 2,976,500 Ha de bosque de 1976 a 1993 (175,000 Ha/año), y de 5,430,600 Ha de 1993 a 2000 (319,000 Ha/año). La FAO documentó una deforestación de 314 mil hectáreas anuales de 2000 a 2005 (FRA, 2005).

Sin embargo, la reforestación anual no supera las 200,000 hectáreas. La SARH (1994) reportaba una reforestación de 120,000 Ha/año, mientras que la SEMARNAP (1999), SEMARNAP – CONAFOR (2003, 2004) y la misma SARH reportan cerca de 200,000 Ha/año para el intervalo de 1997 – 2002. Desafortunadamente se estima que el 20% de la superficie reportada como reforestada no se reforesta (UACH 2004), lo cual disminuiría la superficie reforestada en dicho intervalo, a cerca de 160,000 Ha/año. La meta global de reforestación para 2005 sumó 170 mil hectáreas, y ésta contempló apoyar alrededor de 140 mil vía PROCOREF, otras 15 mil con apoyo del Ejército y 15 mil más a través del método de siembra aérea (CONAFOR, 2006).

La deforestación depende de distintos factores, entre los más importantes están la presión demográfica, la expansión de la agricultura tanto de pequeña como de gran escala, el establecimiento de pastizales para la ganadería, la extracción de productos maderables, la expansión de la infraestructura vial, la pobreza y de factores institucionales como la estabilidad política, la corrupción, y los derechos de propiedad de la tierra (Barbier y Burgess, 2001; FAO, 2001; Barbier, 2004). Las diferentes variables sociales, políticas, económicas, tecnológicas y culturales involucradas interactúan de manera compleja y se manifiestan de manera diferencial en las distintas regiones y países (Geist and Lambin, 2001).

Para reducir la deforestación, existen propuestas de crear incentivos económicos que se podrían establecer a nivel nacional, como el otorgar pagos o recompensas por evitar la deforestación (únicos o con determinada periodicidad, especialmente en áreas cuya deforestación es inminente), poner impuestos a la deforestación en los que los propietarios tendrían que pagar para poder convertir sus bosques a otro tipo de coberturas (lo cual podría fracasar en áreas donde se produce tala o extracción ilegal de madera), o la implementación de fondos o programas que promuevan la tecnificación de la actividad agrícola o el mejoramiento de las prácticas de manejo de uso del suelo (Schlamadinger y col., 2005). Actualmente, como alternativa a la deforestación en el sector forestal nacional se busca lograr un adecuado manejo y conservación de los bosques nativos, reforestar tierras degradadas o deforestadas, y promover sistemas agroforestales.

2.4 La emisión y captura de carbono

El manejo forestal y el cambio de uso de suelo pueden ocasionar cambios en los flujos y los almacenes de carbono, los cuales son muy difíciles de medir con precisión. Dentro de los almacenes de carbono se encuentran la atmósfera, los océanos, el suelo y la vegetación. De forma natural, el carbono fluye entre ellos por medio de la síntesis o descomposición de la materia orgánica.

Entre la atmósfera y los demás almacenes, el carbono fluye en forma de gas CO₂. Las concentraciones de este gas en la atmósfera se han incrementado desde la revolución industrial como consecuencia de las actividades humanas. La atmósfera acumula anualmente entre 2 y 3 Pg de carbono. Esta cifra es relativamente menor si se le compara con la cantidad de carbono que circula anualmente a través del ciclo respiración-fotosíntesis de los organismos terrestres, que es del orden de 60 Pg anuales. Esto significa que un incremento relativamente pequeño en la fotosíntesis (que absorbe carbono) con relación a la respiración (que libera carbono) podría contribuir significativamente a la compensación de la acumulación anual de carbono en la atmósfera, que es de solamente de 2 a 3 Pg (Martino, 2001).

Durante la última década, casi un 45 por ciento de las emisiones antropogénicas han permanecido en la atmósfera, el resto ha sido absorbido por los ecosistemas oceánicos y terrestres. La comunidad científica está mayormente de acuerdo, al menos en las bases cualitativas, en que los ecosistemas forestales del trópico han sido fuentes netas de C y que los bosques templados del norte y boreales son un importante sumidero de C (Kauppi *et al.*, 1992, Sedjo 1992). De cualquier manera, resultados de investigaciones recientes muestran que los bosques tropicales maduros pueden acumular carbono con una tasa de 1-2 Mg/ha/año (Lugo y Brown 1992, Grace *et al.*, 1995), la cual puede desviar las emisiones que producen la deforestación y degradación (Brown *et al.*, 1996)

La deforestación y la extracción maderera producen CO₂ a corto plazo, debido a la descomposición de la hojarasca y a largo plazo debido a la descomposición de la madera y de la materia orgánica del suelo (Sundquist, 1993). En países tropicales, cuando el bosque es cortado para convertirlo en agricultura o pastizales, una gran porción de la biomasa aérea es generalmente quemada, esto libera también de forma rápida carbono hacia la atmósfera. De esta forma, el bosque se vuelve una fuente de carbono, porque su emisión de carbono es mayor a su captura. Cuando la madera cortada se destina a otros usos finales, tales como leña, papel y material de construcción, entre otros, el carbono es liberado a distintas tasas dependiendo del uso final, el reciclado, el clima, el tipo de madera, etc. (Vooren, 1999 citado en de Jong, 2000).

Después de ser talado, si no se establece un nuevo uso y se abandona, o si se lleva a cabo una plantación, el bosque puede regenerarse en algunos años. Cuando la regeneración se completa, la liberación neta de carbono a la atmósfera se vuelve cero o cercana a cero y posteriormente comienza a capturar más carbono del que libera debido a la respiración. Entonces el bosque se transforma en sumidero de carbono (Kauppi y col., 1992).

Actualmente, se considera que la cantidad de carbono almacenado en la biomasa forestal mundial es de unas 283 gigatoneladas de carbono (PgC), aunque descendió a nivel mundial en 1,1 PgC anuales entre 1990 y 2005. El carbono almacenado en la biomasa, la madera muerta, los desechos y el suelo, es aproximadamente un 50 por ciento más que la cantidad almacenada en la atmósfera (FAO, 2005).

El rápido avance de la degradación de los bosques y la deforestación a una escala global, resulta en significantes emisiones de CO₂ a la atmósfera. Actualmente, el cambio de uso de suelo constituye a nivel mundial, la segunda fuente más importante de emisiones de CO₂ a la atmósfera y la primera en Latinoamérica. (IPCC, 1992 y 2007).

Trabajos recientes han demostrado que los bosques mexicanos tienen el potencial para funcionar como grandes sumideros de carbono. La aplicación de distintas opciones de manejo forestal orientadas tanto a la conservación del bosque existente como al incremento del área forestal, podría resultar a largo plazo, en una captura acumulada de 3.5 a 5.4 PgC (Maser y col., 1995a).

México no es uno de los grandes emisores de carbono del mundo. En términos de emisiones totales, en la década de los 90's ocupaba el 15° lugar a nivel mundial y sus emisiones totales de CO₂ representaban tan sólo un 1% de las emisiones totales mundiales. En el año 2002, nuestro país emitió aproximadamente 151 TgC. El sector energético constituyó la fuente más importante de C con 61% de las emisiones con 92 TgC; le siguieron las categorías de Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura (USCUSS) con 14% de las emisiones totales (21 TgC), desechos con 10% (15 TgC), procesos industriales con 8% (12 TgC) y agricultura con el 7% (10.5 TgC).

2.5 Escenarios futuros de referencia y de mitigación

Los escenarios son imágenes de lo que podría acontecer en el futuro con las emisiones de GEI's. Constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, así como evaluar el margen de incertidumbre de estas emisiones. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación (IPCC, 2000).

Un tipo de escenario es el de referencia o Línea Base, el cual describe los flujos de GEI's pasados, presentes y el futuro esperados en caso de que ningún proyecto sea implementado (Trines, 1998). Al construir este tipo de escenario, se busca evaluar el resultado más probable de cada lugar, basándose en precedentes históricos –también conocidos como “business as usual” en inglés- (De Jong, 2000).

Otro tipo de escenario es el de mitigación o proyecto, el cual describe los flujos de GEI's durante la aplicación de la opción de mitigación. Esta última es toda aquella intervención antropogénica para reducir las fuentes de gases de efecto invernadero (GEI) o aumentar sus sumideros. Para llevar a cabo un proceso de mitigación de carbono pueden utilizarse tres estrategias: a) conservación de reservorios de carbono existentes, b) captura de carbono aumentando el tamaño de los reservorios de carbono, y c) sustitución de productos biológicos producidos de manera sostenible; por ej., madera para productos de construcción de gran intensidad de energía y biomasa para combustibles fósiles (IPCC, 2001b).

2.6 Los modelos y la dinámica de carbono

Cuantificar el flujo del CO₂ de y hacia la atmósfera es importante para entender los sumideros y fuentes de carbono. El monitoreo y mapeo de los flujos de carbono en distintos ambientes terrestres son esenciales para entender la contribución que tienen estos ambientes al ciclo global del carbono. Estos además, son prerequisites para poder tomar decisiones respecto a las diferentes estrategias existentes de mitigación de carbono. Para alcanzar el máximo potencial de mitigación de carbono por captura en biomasa vegetal a nivel mundial, nacional y regional, se requiere entre otras cosas, de métodos precisos para evaluar la dinámica de los flujos y almacenamiento del carbono, tanto en las prácticas agro-silvo-pastoriles actuales, como bajo regímenes de manejo alternativos (Dewar, 1991).

Para poder implementar adecuadamente el protocolo de Kyoto, así como los proyectos relacionados con el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y los de Implementación Conjunta (IC), es necesario contar con estimados precisos sobre la dinámica potencial de los flujos de carbono en ecosistemas y proyectos de reforestación. Sin embargo, obtener estos estimados es una tarea difícil, ya que la captura de carbono en los bosques consiste de almacenes y flujos en distintos compartimentos y con distintas tasas. Por otro lado, los resultados de los diferentes estudios sobre la dinámica del carbono, son difíciles de comparar debido a las diferencias en el tipo de bosque, tipos de sitios, sistemas de manejo, metodologías de monitoreo usadas, y debido a que en ocasiones sólo son estimadas partes del ciclo del carbono de los productos maderables, o son utilizadas diferentes escalas o tiempos (Maser y col., 2003).

Actualmente se han desarrollado distintos modelos para analizar y simular la acumulación y flujo de carbono a nivel de rodal forestal. Los modelos de simulación varían en su grado de complejidad y en otros atributos relevantes para la selección del modelo. Son relativamente abundantes en la literatura especializada, los reportes del uso de modelos de simulación de carbono (Coleman and Jenkinson, 1995; Dewar, 1991; Izurralde y col., 1996; Karjalainen, 1996; Kirschbaum y col., 1998; Li y col., 1997; Mery and Kanninen, 1999; Mohren, 1987; Powlson y col., 1996; Schlamadinger and Marland, 1996; Smith y col., 1997 y White y col., 2000). Cada modelo, varía en función del énfasis que se le da a algún aspecto particular del ciclo de carbono, su grado de compartimentalización,

los supuestos subyacentes hechos por los desarrolladores del modelo, el desempeño del modelo, los parámetros requeridos, la naturaleza de los resultados, su accesibilidad y facilidad de uso (Maser y col., 2003; Ponce-Hernández, 2004).

Entre los distintos modelos disponibles se encuentra el CO₂Fix, mismo que fue desarrollado como parte del proyecto "CASFOR: Carbon sequestration in afforestation and sustainable management: presentation of a general evaluation tool and generic case studies", el cual comenzó en 1999 y terminó en el 2004. Este proyecto fue llevado a cabo por ALTERRA en los países bajos, el CIECO de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en México, el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Costa Rica, y el Instituto Forestal Europeo en Finlandia. Este proyecto ha sido bastante exitoso al proveer al usuario de un modelo ecosistémico que es capaz de estimar almacenes de carbono y captura del mismo en distintos tipos de bosques. A la fecha, más de 2000 usuarios de más de 60 países han bajado este modelo de la página electrónica del proyecto.

Para estimar los flujos de carbono a nivel de paisaje, se desarrolló el modelo CO₂Land, por el mismo grupo de investigación que realizó el modelo CO₂Fix. Los objetivos científicos y tecnológicos de este nuevo proyecto consistían en la expansión del modelo CO₂Fix a una herramienta de simulación por computadora que pudiera ser usada para analizar la dinámica del carbono a nivel de paisaje. Esta expansión permitiría analizar las consecuencias que el cambio de uso de suelo (reforestación y deforestación, consideradas en el protocolo de Kyoto) tiene sobre la captura de carbono.

Dadas las características y, el tipo y forma de los resultados que arrojan, estos modelos pueden utilizarse como herramientas en proyectos de manejo para conservación: donde se busca prevenir emisiones a la atmósfera mediante la conservación de los almacenes de carbono existentes al disminuir la tasa de deforestación, por ejemplo, estableciendo reservas forestales. En proyectos de manejo por almacenaje: donde se evalúa el incremento en la cantidad de carbono almacenado en la vegetación y el suelo, al incrementar el área y/o la densidad de carbono en plantaciones forestales o bosques nativos, e incrementar el tiempo de almacenamiento del carbono en productos forestales maderables, por ejemplo, al extender la duración de dichos productos. En el manejo por sustitución: donde se pretende incrementar el uso de biomasa forestal a través de los productos forestales maderables, para sustituir los productos y la generación de energía, basados en combustibles fósiles.

En este trabajo se pretende utilizar tanto el modelo CO₂Land como el CO₂Fix para analizar la dinámica del carbono en coberturas vegetales forestales y no forestales de una zona clave para la captura e inmovilización del carbono como es la Región Purépecha.

III. OBJETIVOS

Modelar la dinámica del carbono de 1986 a 2014, entre distintas coberturas vegetales de la región Purépecha, Michoacán, en función de los procesos regionales actuales de cambio de uso de suelo, evaluando la utilidad de los modelos CO₂FIX V3 y CO₂LAND.

Objetivos Particulares

- Buscar, integrar y organizar la información necesaria para parametrizar el modelo CO₂FIX.
- Generar en el CO₂FIX las plantillas correspondientes para cada tipo de cobertura vegetal considerada en este estudio.
- Generar mediante el modelo CO₂LAND la Línea base para la región de estudio y un escenario de mitigación considerando la reforestación como estrategia de mitigación.

IV. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende a la Región Purépecha, la cual recibe su nombre debido al grupo étnico dominante que habita en la parte central y norte del Estado de Michoacán y se localiza entre los 20°00' - 19°15' de latitud norte, y los 102°45' - 101°15' de longitud oeste.

La Región se ubica dentro de la provincia fisiográfica denominada Sistema Volcánico Transversal o cordillera Neovolcánica y comprende 19 municipios (Fig. 1), los cuales cubren un área de 652,000 hectáreas y representan el 11.1% de la extensión del estado. En 2000, la región albergaba a 732, 000 habitantes distribuidos en 927 asentamientos, representando el 18.3 % de la población total del estado (INEGI, 1991).

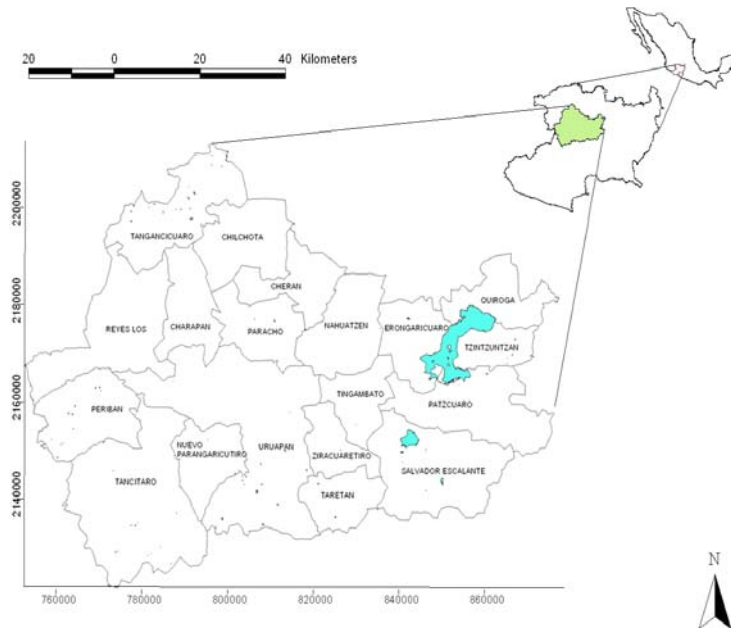


Figura 1. Mapa de la región Purépecha, su localización en el estado de Michoacán y en el territorio mexicano.

La Región es montañosa, con elevaciones que van desde los 621 m.s.n.m. hasta los 3,860 m.s.n.m. en las partes más altas, producto de la actividad volcánica

reciente. Los suelos que dominan el área son Andosoles, profundos y de texturas medias. La región presenta climas templados húmedos y subhúmedos, y calientes subhúmedos, tiene una precipitación anual variable entre 800 y 1100 mm concentrada principalmente en los meses de Mayo a Agosto, y temperaturas promedio entre 11° C y 14° C (SUMA, 2006)

La abrupta topografía de la región deriva en una amplia variedad de microclimas, por lo que su vegetación consiste de bosque de oyamel (Madrigal, 1982; Caro, 1987), bosque de pino (Madrigal, 1982; Caballero y col., 1992), bosque de pino-encino (Madrigal, 1982), bosque de encino (Madrigal, 1982; Caro, 1987) y bosque mesófilo de montaña (Caballero y col., 1992), incluyen además el matorral xerófilo y los pastizales inducidos (Tomado de Ordóñez, 2003).

La región Purépecha, contiene aprox. el 20% de los bosques templados del estado de Michoacán, además es una zona con alta heterogeneidad ambiental y alta densidad poblacional que representa muy bien las condiciones del altiplano mexicano (Guerrero, 2003). La demanda de madera en la región, es excesiva, incluso se ha documentado en años recientes el cambio de actividades económicas en diversas comunidades, lo que ha originado complicados procesos de cambio de uso de suelo (Alarcón-Chaires 1998).

La región presenta un gran porcentaje de bosque degradado y el área dedicada a las plantaciones de aguacate está incrementándose de forma rápida. La región juega un papel crítico en el equilibrio ambiental de las cuencas adyacentes, y sus recursos forestales, los cuales tienen un rol bastante importante en la dinámica socioeconómica de la zona. (Guerrero, 2003).

El gran porcentaje de bosque que aún conserva, el potencial de captura dada la vocación de la tierra de esta región, así como la posibilidad tangible de conservación en esta zona, la colocan como una de las regiones más importantes e interesantes para realizar estudios sobre la dinámica del carbono y evaluar proyectos de mitigación. Debido a lo anterior se consideró importante utilizar los datos de esta región para generar información general y aproximada, utilizando los modelos de simulación considerados, que muestre de forma general la dinámica del carbono cuyo motor es el cambio de uso de suelo.

V. MÉTODOS

5.1 Los modelos CO₂Fix y CO₂Land:

Se Utilizaron los modelos de simulación CO₂Fix y CO₂Land para construir un escenario de referencia (línea base regional por cobertura vegetal y línea base regional total) y un escenario de mitigación (proyecto de reforestación). Los datos que se utilizaron para parametrizar el modelo, provienen de estudios realizados previamente por el Laboratorio de Bioenergía y por otros autores, tanto a nivel regional, nacional e internacional.

A continuación, se detalla en que consiste cada modelo, como se llevó a cabo su parametrización y la modelación con cada uno.

5.1.1 El Modelo CO₂Fix

El modelo de fijación de carbono CO₂Fix fue desarrollado originalmente por Mohren y Goldewijk en el Instituto de Investigaciones Forestales y de Ecología Urbana de Holanda, en 1990. Es una herramienta que cuantifica los almacenes y flujos de C en la biomasa del bosque, la materia orgánica de suelo y durante la producción y vida media de los productos maderables. Este modelo opera con segmentos de tiempo de un año, en los cuales, es calculada la tasa de aumento del volumen del tronco de los árboles (tasa de crecimiento), la biomasa del follaje, de las ramas y de las raíces.

(Fig. 2).

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 trabajar en forma interactiva con el modelo. La tarea de adaptación y mejora del modelo original se llevó a cabo por el Laboratorio de Bioenergía del Instituto de Ecología de la UNAM y el Instituto Forestal y de Investigación Natural de Holanda, colaboración que dio lugar a la versión 1.2, del modelo CO₂Fix for Windows (Mohren et al., 1997).

Este modelo opera con segmentos de tiempo de un año, en los cuales, es calculada la tasa de aumento del volumen del tronco de los árboles (tasa de crecimiento), la biomasa del follaje, de las ramas y de las raíces. Los almacenes de carbono en la biomasa viva se calculan como la proporción entre el crecimiento y, la tasa de recambio, mortalidad y cosecha. Los almacenes de carbono en el suelo se calculan tomando en cuenta la materia orgánica que se descompone y transforma en materia orgánica de suelo. Los datos que alimentan el modulo de suelo del programa son la cantidad de materia viva que se recambia anualmente (hojas, ramas, corteza y raíces), los procesos de mortalidad y los restos de tala (cosecha). De la madera cosechada el programa puede hacer un seguimiento del carbono en los productos, tomando en cuenta la vida media de estos y su destino final en rellenos o en basureros, o su uso como fuente de bioenergía. El módulo

de bioenergía calcula las ganancias en términos de emisiones de GEI's del uso de la biomasa en vez de los combustibles fósiles como fuente de energía. En el módulo financiero, se detallan los costos y los ingresos que le indican al usuario que tan rentable es un proyecto. El módulo de contabilidad de carbono, le indica al usuario la cantidad de créditos que se puedan generar con el proyecto según diversos tipos de sistemas crediticios (los tCERs y los ICERs para los proyectos de CDM-AR y el método de cambio en el almacén para otros proyectos).

Los datos de salida del modelo los muestra en forma tabular y gráfica. Permite estimar la evolución del tiempo sobre el carbono almacenado en los diversos almacenes del sistema a nivel de rodal. El modelo CO₂FIX V 3.1 se puede utilizar en diversos casos: proyectos de repoblación forestal, sistemas agroforestales, y sistemas de tala selectiva. El modelo está disponible de forma gratuita en Internet junto con numerosos ejemplos.

Masera y col., 2003).

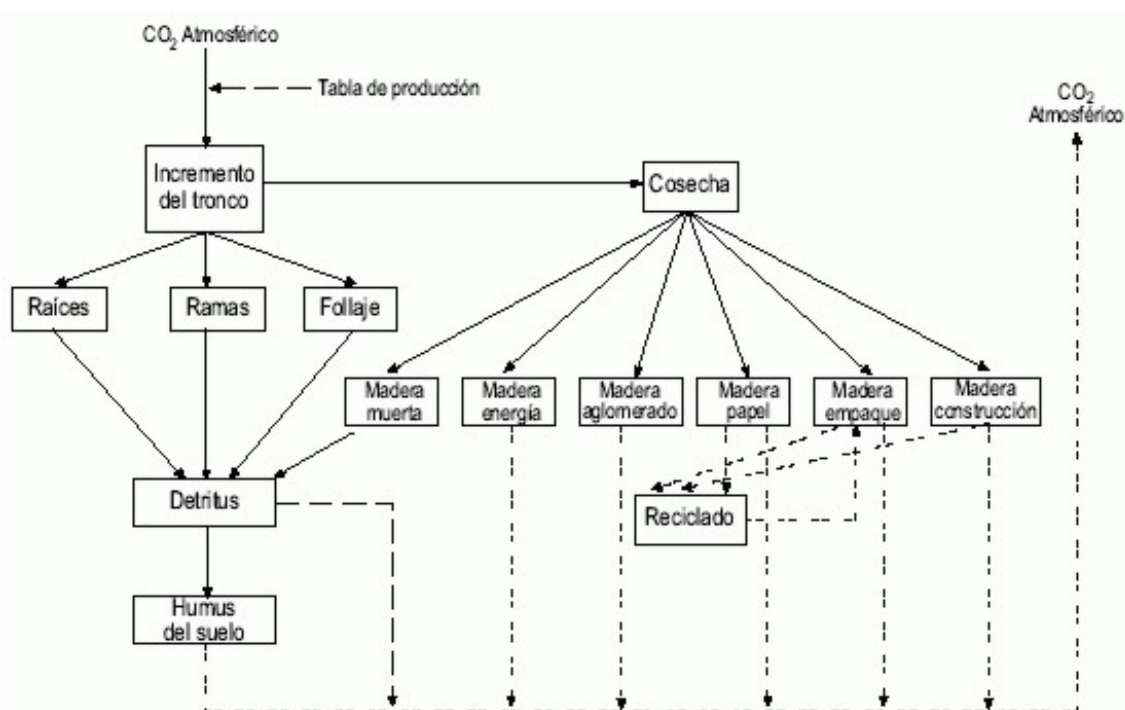


Figura 2. Representación simplificada de los flujos y almacenes de carbono en el modelo CO₂Fix (Mohren y col., 1997)

5.1.2. Modelo CO₂Land

El software CO₂Land es una expansión del modelo CO₂Fix y resulta ser una herramienta útil para analizar existencias netas de C a nivel del paisaje. Este programa se basa en matrices de transición (tipo Markov) que describen los cambios en cada tipo de uso del suelo en un área dada, entre dos fechas de referencia y la tasa de cambio a la cual ocurren éstos (Fig 3).

Cada tipo de uso del suelo o cobertura vegetal que está presente en la matriz de transición, se modela previamente utilizando el modelo CO₂FIX. Los modelos obtenidos con el CO₂Fix, representan los cambios de la concentración de carbono en un rodal de alguna cobertura vegetal específica, a lo largo del tiempo, tomando en cuenta solo las características biológicas y ecológicas de la especie dominante de dicha cobertura vegetal. Durante el análisis con el CO₂LAND, el modelo crea versiones modificadas de los archivos originales de CO₂FIX, archivos que reflejan los nuevos valores de los parámetros iniciales del uso de la tierra de cada transición, y crea varios resúmenes diferentes de la dinámica del C, agrupados por año o transiciones.

Cabe destacar que ambos programas CO₂Fix y CO₂Land son útiles porque brindan información de los efectos futuros de los cambios de usos de la tierra y del impacto de fenómenos naturales (como incendios), y nos dan a conocer los sistemas con mayores potenciales de secuestro de carbono para mitigar y adaptar los sistemas a los efectos de los cambios climáticos, entre varias más aplicaciones. (Peng y col., 2002)

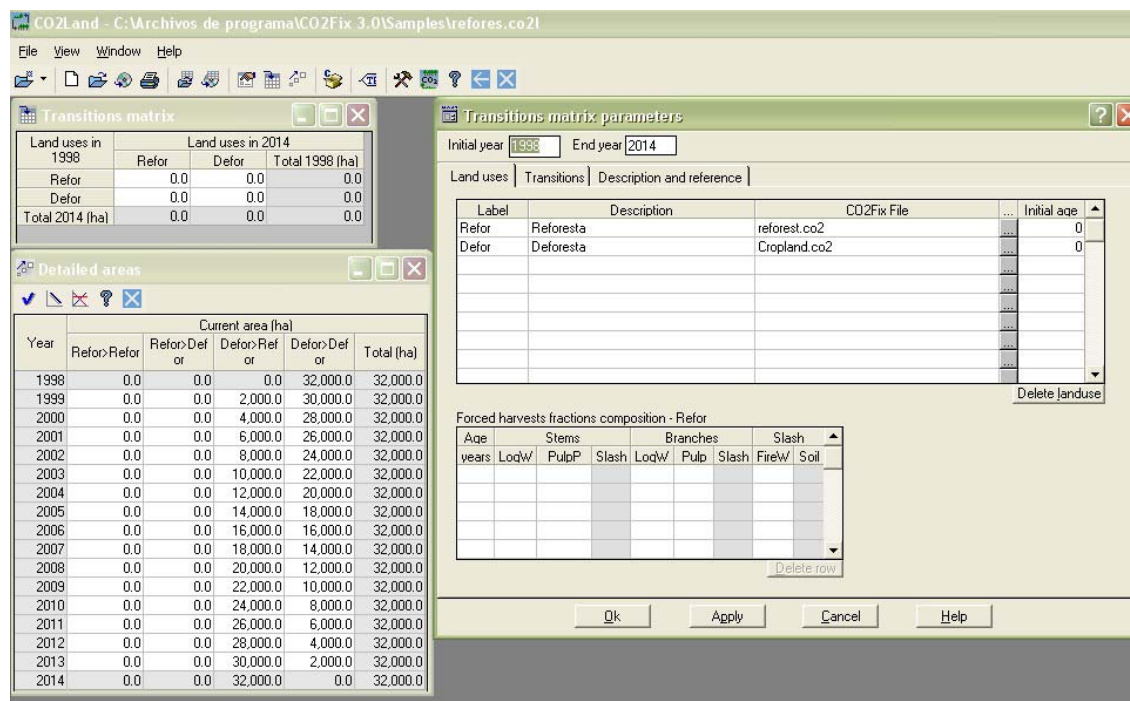


Figura 3. Interfase del modelo CO₂Land donde se puede apreciar la entrada para la matriz de transición y de los archivos CO₂Fix.

5.2. Coberturas vegetales consideradas en el estudio:

Para el inventario de carbono de la Región Purépecha, Ordóñez (2003) llevó a cabo una reagrupación de las coberturas vegetales, consideradas para el estado de Michoacán en el Inventario Nacional Forestal (1994), ésto con la finalidad de facilitar el análisis reduciendo el número de coberturas vegetales al agrupar

aquellas con características fisionómicas similares. Dicha reagrupación comprendió 13 CUS. Desde el punto de vista de los almacenes de carbono, se consideró importante analizar para este estudio 9 de estas coberturas (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de cobertura vegetal considerados para este estudio
Bosque de Oyamel
Bosque de Encino
Bosque de Pino
Bosque de Pino-encino
Bosque Degradado
Frutales
Matorral
Agricultura
Pastizal

Para este trabajo se consideraron las siguientes definiciones de coberturas vegetales que propone CONAFOR, 2005:

Bosque de Oyamel: Comunidad que se caracteriza por la altura de sus árboles que a veces sobrepasan los 30m de altura, se desarrollan en clima semifrío y húmedo, entre los 2,000 a 3,400m de altitud, en la mayoría de las sierras del país, principalmente en el Eje Neovolcánico. Las especies que los constituyen son principalmente del género *Abies* como: oyamel, pinabete (*Abies religiosa*), abeto (*A. duranguensis*) y *Abies* spp., además de pino u ocote (*Pinus* spp.), encino o roble (*Quercus* spp.) y aile (*Alnus firmifolia*).

Bosque de Encino: Comunidad vegetal formada por diferentes especies (aproximadamente más de 200) de encinos o robles del género *Quercus*; estos bosques generalmente se encuentran como una transición entre los bosques de coníferas y las selvas, pueden alcanzar desde los 4 hasta los 30m de altura más o menos abiertos o muy densos; se desarrollan en muy diversas condiciones ecológicas desde casi el nivel del mar hasta los 3,000 m de altitud, salvo en las condiciones más áridas, y se les puede encontrar en casi todo el país.

Bosque de Pino: Es una comunidad siempre verde constituida por árboles del género *Pinus*, de amplia distribución y con aproximadamente 49 especies, 18 variedades, 2 subespecies en las cadenas montañosas de todo el país desde los 300m de altitud hasta los 4,200m en el límite altitudinal de la vegetación arbórea.

Bosque de Pino-encino: Comunidad de bosque ampliamente distribuida que ocupa la mayor parte de la superficie forestal de las porciones superiores de los sistemas montañosos del país, la cual está compartida por las diferentes especies

de pino (*Pinus* spp.) y encino (*Quercus* spp.); dependiendo del dominio de uno y otro, se le denomina pinoencino si predominan las coníferas y es llamado encino-pino cuando dominan los encinares.

Agricultura: Se incluyen bajo este rubro todos aquellos conceptos referentes al uso que el hombre da a los suelos al dedicarlos a actividades agrícolas. La clasificación se hace teniendo en cuenta primero, la disponibilidad del agua para los cultivos.

Bosque Degradado: Todos los tipos de bosque cuya cobertura forestal es menor al 50% y/o poseen gran cantidad de arbustos y herbáceas (vegetación secundaria) Reclasificación realizada por Ordóñez (2003).

Frutales: Son los cultivos que permanecen en el terreno por un periodo de varios años, generalmente más de 10.

Matorral: Asociación generalmente densa, de arbustos resistentes al fuego, que se desarrolla sobre todo en laderas de cerros, en ocasiones mezclada con los bosques de pino y encino. Generalmente ocupa áreas de suelos someros que no tienen humedad suficiente para la existencia de vegetación boscosa, o bien se desarrolla como comunidad secundaria en sitios donde tal vegetación ha sido destruida.

Patizales: Tipo de vegetación caracterizado por la dominancia de gramíneas (pastos o zacates) o gramínoideas, y que en condiciones naturales se desarrolla bajo la interacción del clima, suelo y biota.

5.3 Parametrización del modelo CO₂Fix.

5.3.1 Revisión de parámetros

Para poder llevar a cabo la modelación de cada una de estas coberturas vegetales, fue necesario coleccionar la información disponible sobre las características biológicas de su(s) especie(s) dominante(s), de su tipo de manejo en general, y del promedio ponderado de sus condiciones climáticas (Tabla 2), todo esto con la finalidad de alimentar los módulos del modelo CO₂Fix. En primera instancia la búsqueda de parámetros se concentró en estudios hechos en México, de preferencia a nivel estatal o regional. Cuando no fue posible coleccionar dicha información a estos niveles, se llevó a cabo una búsqueda en Internet y en publicaciones de estudios hechos en el extranjero, realizados en los tipos de cobertura vegetal consideradas en este estudio y que además tenían especies o géneros y condiciones climáticas semejantes a las de la región de estudio.

Tabla 2. Parámetros necesarios para modelar cada cobertura vegetal en el modelo CO₂Fix V. 3

Biológicas	Manejo	Condiciones climáticas (no hay de suelo)
<ul style="list-style-type: none"> ➤ contenido de carbono en biomasa, ➤ densidad de la madera, ➤ carbono inicial en el sitio, ➤ crecimiento corriente anual del fuste, ➤ crecimiento relativo y tasa de recambio del follaje, las ramas y las raíces, ➤ mortalidad natural y efecto de la competencia intra e/o interespecífica. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ mortalidad debida al manejo, ➤ aclareos-cosecha, 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ grados días, ➤ precipitación y evapotranspiración en la temporada de crecimiento.

5.3.2 Densidades de carbono por cobertura vegetal.

Los valores de este parámetro para las coberturas vegetales, se obtuvieron de las densidades de carbono por clase de uso de suelo de la región Purépecha, estimadas por Ordóñez (2003) (Fig. 4), cuyos valores máximos y mínimos se utilizaron para ajustar la tendencia de acumulación de carbono en biomasa a la hora de modelar cada cobertura vegetal con el CO₂Fix. Cabe señalar que en su estudio, Ordóñez consideró 80 sitios de muestreo, donde se midió de forma directa el contenido (Densidad) de carbono de la biomasa y del suelo.

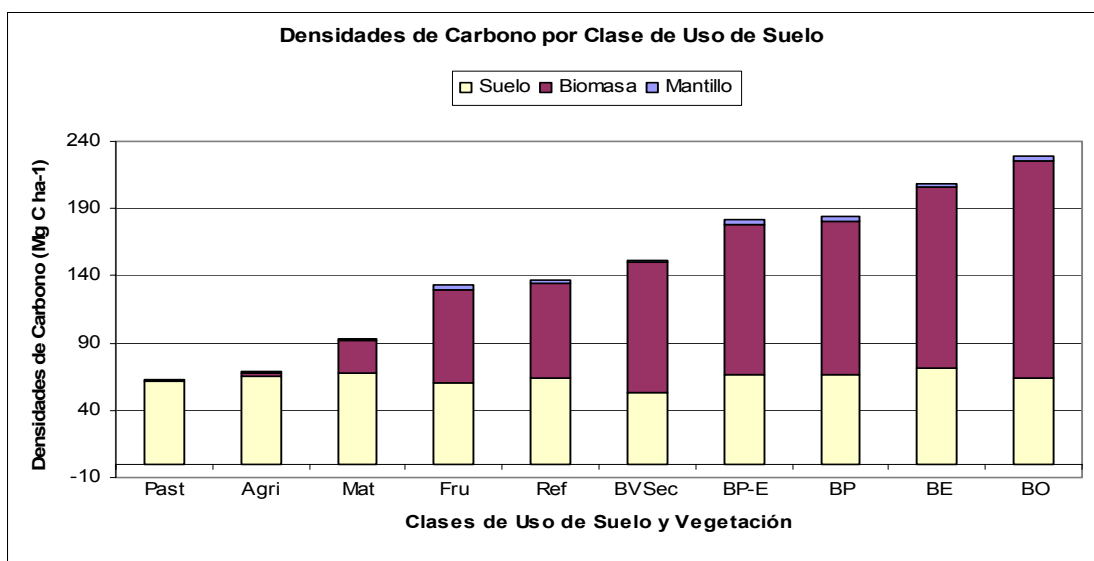


Figura 4. Gráfica que muestra las densidades de carbono por tipo de cobertura vegetal para la región Purépecha (Ordóñez, 2003).

Estas densidades comprenden la cantidad máxima y mínima de carbono que se encontró en campo en cada cobertura vegetal y el promedio ponderado del contenido de carbono de los rodales con distinta edad encontrados en dicho muestreo para cada cobertura vegetal, pero sólo para ese año de medición. La modelación con el CO₂Fix, permitió simular y analizar la curva de acumulación de carbono de dichos reservorios a lo largo del tiempo, desde la edad 0 hasta que alcanzan el intervalo registrado por Ordóñez (2003) para la región.

Para el caso de la cobertura agricultura y la cobertura matorrales la relación raíz/biomasa aérea, se obtuvo de los datos generados por Ordóñez (2003) y para el caso de la cobertura pastizales, se consideró la relación estimada por Jaramillo (1994) (Tabla 3). Para la cobertura agricultura, se usaron los datos de manejo considerados por Astier y col., (2004).

Parámetros	Cobertura vegetal								
	Agricultura	Pastizal	Matorral	Frutal	Pino	Encino	Pino-encino	Oyamel	B. Degradado
Carbono total/Ha/año (Biomasa) tC	2.5	1.0	26.5	75	122	143.8	120.1	173.4	105.1
Relación raíz/biomasa aérea	0.10	0.18 ^a	0.35		0.26 ^b	0.25 ^b			

Para las coberturas forestales, incluidos los frutales, se utilizaron los datos de densidad y acumulación de carbono en biomasa, suelos y productos (Tabla 4), reportados por De Jong y col., (aceptado).

5.3.3. Parámetros por cobertura.

CLASE DE VEGETACIÓN	PARÁMETRO	FUENTE
BOSQUES	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad de la madera. • Carbón inicial en el sitio. • Crecimiento corriente anual del fuste. • Crecimiento relativo y tasa de recambio del follaje, las ramas y las raíces. • Mortalidad natural y efecto de la competencia intra e/o interespecífica. • Mortalidad debida al manejo, aclareos-cosecha. • Grados días, Precipitación y Evapotranspiración. • Tasa de decaimiento de la biomasa • Tasa de humificación 	De Jong y col., (2007).
AGRICULTURA	<ul style="list-style-type: none"> • Relación raíz/biomasa aérea • Manejo • Parámetros mencionados en 	Ordóñez (2003) Astier y col., (2004). Estimados usando

	la fila bosques de esta tabla.	información de Ordóñez (2003)
PASTIZAL	<ul style="list-style-type: none"> • Relación raíz/biomasa aérea • Parámetros mencionados en la fila bosques de esta tabla. 	Jaramillo (1994) Estimados usando información de Ordóñez (2003)
MATORRAL	<ul style="list-style-type: none"> • Relación raíz/biomasa aérea • Parámetros mencionados en la fila bosques de esta tabla. 	Ordóñez (2003) Estimados usando información de Ordóñez (2003)

5.3.4. Creación de plantillas.

Para cada cobertura vegetal se llenaron los tres módulos principales del modelo: biomasa, suelo y productos, y se obtuvo una plantilla general.

- a) Módulo Biomasa: Se presenta un ejemplo de plantilla para el módulo de biomasa en la Fig 5.

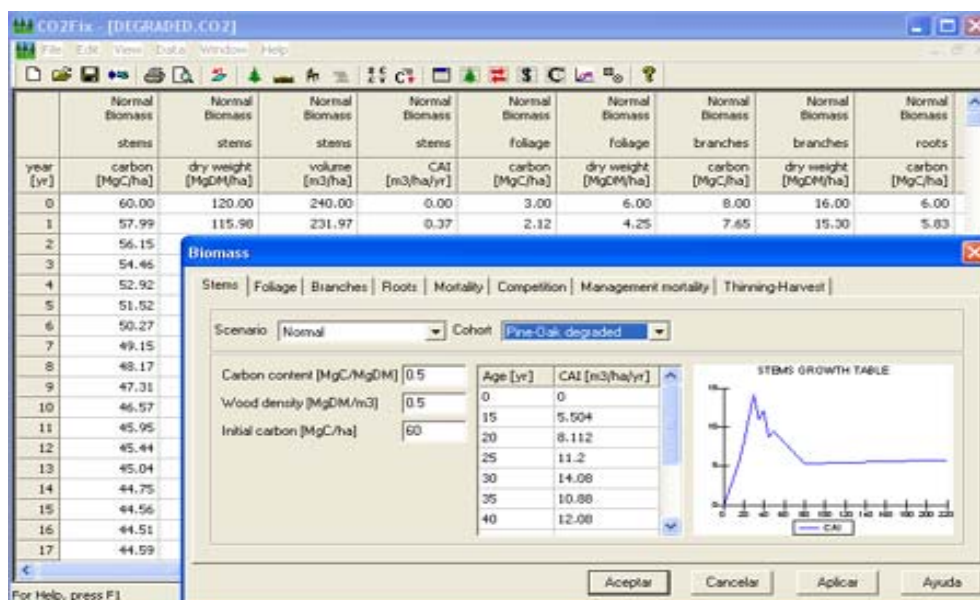


Figura 5. Módulo de biomasa y base de datos del CO₂Fix.

- b) Módulo de suelos: Para el módulo de suelos solo se tenían los parámetros climáticos, razón por la cual no fue posible analizar la dinámica del carbono en los suelos.

- c) Módulo de productos: El módulo de productos se llenó solo para las coberturas vegetales bosque de pino y pino-encino.

Una vez parametrizado totalmente el modelo se llevó a cabo la modelación y se obtuvo una gráfica y un archivo con extensión .co2 para cada cobertura vegetal, estos últimos se denominaron plantillas y fueron posteriormente usados para el análisis con el CO₂Land. Cada plantilla contenía una base de datos con los flujos y captura de carbono por cada cobertura vegetal a lo largo de 100 años en función de sus características biológicas y ecológicas.

5.4 Parametrización del modelo CO₂Land

5.4.1. Matriz de Cambio de Uso del Suelo

Para poder modelar el escenario de referencia (Línea base) y el de mitigación (proyecto), se requirió alimentar al modelo CO₂Land con una matriz de cambio de uso de suelo (matriz de transición) y los modelos generados con el CO₂Fix (plantillas) de cada cobertura vegetal analizada.

La matriz de transición histórica fue determinada por Guerrero y col. (2003), mediante un análisis de cambio de uso de suelo para la región, el cual incluía bases de datos y mapas obtenidos mediante un sistema de información geográfica en dos fechas (1986 y 2000), por tal motivo, esta fue denominada “matriz histórica” y comprendía un periodo de 14 años. Utilizando dinámicas markovianas, se construyó un escenario de transición entre coberturas vegetales desde el año 1986 hasta el 2028. Dicho escenario abarca un periodo de transición “conocido”, denominado periodo histórico (1986-2000), y dos periodos futuros determinados por la inercia de cambio del periodo histórico, denominados periodos esperados (2000-2014 y 2014-2028). El primer periodo esperado y el segundo se calcularon utilizando dinámicas markovianas de primer orden y segundo orden respectivamente. Como referencia se tuvo acceso a un análisis realizado también por Guerrero y col. (2003), con un modelo espacialmente explícito (GEOMOD) que mostraba un escenario de deforestación para los 25 años posteriores al año 2000 en la región de estudio (Fig 6).

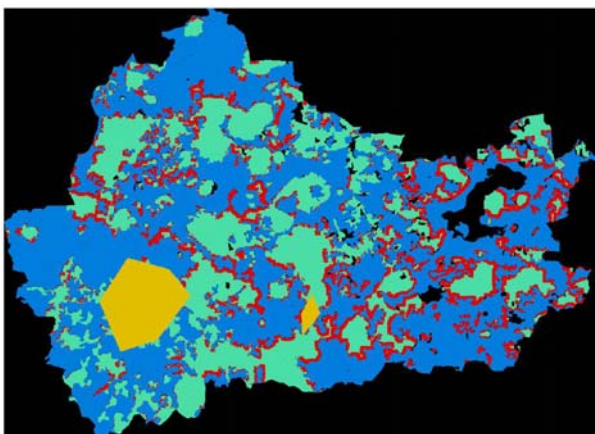


Figura 6. Mapa que muestra la estimación del área forestal perdida para la región Purépecha de 2000 a 2025.



Con ambos análisis, se evaluó la tendencia del cambio de uso de suelo tanto para el periodo esperado como para el siguiente, en función de las proporciones de cambio entre las clases de cobertura vegetal y se obtuvo una matriz de transición para el periodo 1986 – 2014, la cual se utilizó en el modelo CO₂LAND para modelar la dinámica del carbono a nivel de paisaje en función de la tendencia histórica y esperada de cambio de uso de suelo en ese periodo de tiempo.

5.4.2 Desarrollo de Línea Base

Para construir un escenario de línea base se parametrizó el modelo CO₂Land con la matriz de transición que se menciono anteriormente y cada una de las plantillas que se obtuvieron con el CO₂Fix. Al finalizar el análisis con el CO₂Land se obtuvo una base de datos detallada que mostraba de forma numérica el cambio año por año de superficie y contenido de carbono entre las diferentes coberturas vegetales consideradas.

Con la finalidad de mostrar los resultados del análisis en forma gráfica y debido a que el CO₂Land aún no posee esa opción, se exportó la base de datos a Microsoft Excel, donde se contabilizó la cantidad total de carbono que transitaba anualmente de todas las coberturas hacia una cobertura en particular, esto para cada cobertura para poder mostrar una línea base a nivel de cobertura vegetal y una a nivel regional total.

5.4.3 Desarrollo de Escenario de Mitigación

Como estrategia de mitigación, se propuso una reforestación hipotética anual (100% sobrevivencia y sin tala ni eventos de degradación), con Pino, de tierras dedicadas a la agricultura. Se consideró un incremento lineal de 200 hectáreas al año durante el periodo esperado (2000 – 2014), de tal forma que después de 14 años de reforestación, se esperaría un área de 2,800 hectáreas reforestadas. Con esta información se desarrolló una matriz de transición para las hectáreas reforestadas y se usó la plantilla pino.co2 obtenida del CO₂Fix para llevar a cabo el análisis. Para construir el escenario de mitigación se utilizaron estos últimos resultados y se graficaron en Excel junto con los resultados a los obtenidos en la línea base regional total para compararlos.

VI. RESULTADOS

6.1 Parametrización del CO₂Fix

Después de haber realizado una búsqueda exhaustiva de la información necesaria para parametrizar el modelo CO₂Fix, se encontraron muy pocos parámetros regionales. Los que se han reportado para la zona de estudio son los parámetros del bosque de pino, encino, pino-encino y oyamel (de Jong y col., aceptado; Ordóñez, 2003) (Tabla 5). La mayoría de los parámetros del bosque degradado, pastizal, agricultura, matorral y frutal, al no encontrarse en publicaciones de

estudios nacionales ni internacionales, fueron calculados a partir de los resultados de Ordóñez (2003).

Tabla 5. Principales parámetros usados para simular las coberturas vegetales de la región Purépecha.							
<i>Modulo de Biomasa</i>							
	Agricultura a	Matorral	Frutal	B. Pino c	B. Encino c	B. Pi-Enc c	B. Degra
Contenido de Carbono (MgC/MgDM)		b					
Fuste	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Follaje	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Ramas		0.5		0.5	0.5	0.5	0.5
Raíces	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Densidad de la madera (MgDM/m³)							
Fuste	1	1	0.63	0.5	0.63	0.5/0.63	0.5
Carbono inicial (MgC/Ha)							
Fuste	0	0.3	22	42.89	30.16	42.89/30.16	60
Follaje	0	0.3	1.2	2.88	1.62	2.88/1.62	3
Ramas	0	2	8.70	6.93	8.70	6.93/8.70	8
Raíces	0	0.7	0.22	11.27	12.03	11.27/12.03	6
Tasa de recambio (1/año)		d					
Follaje	0	0.5	0.7	0.33	1	0.33/1	0.3
Ramas		0.2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Raíces	1	0.03	0.5	0.02	0.03	0.02/0.03	0.02
Mortalidad		0.05/año	0.03/año	0.01	0.05	0.55	0.035/año
Aclareos/cosechas	Se corta 100% anual. El 56% queda en el lugar y el resto sale del sistema.	Se corta 10% anual, y la biomasa cortada sale del sistema. e		Se corta 20% cada 10 años hasta el año 50 donde se lleva a cabo la corta total.	Se corta 12% cada 10 años hasta el año 50 donde se lleva a cabo la corta total.	Promedio de manejo en pino y en encino.	

Fuentes

a. Astier y col. (2004)

b. Ordóñez (2003)

c. Tomado de De Jong y col., (2004)

d. Jaramillo (1994)

e. Cairns et al. (1997), citado en Ordóñez (2003).

<i>Modulo de Suelos</i>	
Grados días (°C) (> 0)	7651.3
Evapotranspiración potencial en la temporada de crecimiento (mm)	608
Precipitación en la temporada de crecimiento (mm)	1000

Una vez obtenidos y/o estimados los parámetros necesarios para alimentar el modelo, se generaron las plantillas para las 9 coberturas vegetales consideradas. Estas plantillas muestran a nivel de rodal o de cobertura vegetal la dinámica del carbono a lo largo del tiempo en función de sus características biológicas y/o ecológicas.

6.2 Simulación a nivel de rodal o cobertura vegetal

Debido a que el CO₂FIX no está diseñado para modelar coberturas vegetales de baja biomasa y con periodos de rotación anual, tales como el pastizal y la agricultura, se tuvieron que adaptar las curvas de crecimiento de estas coberturas para que la producción de biomasa anual por hectárea alcanzara y se mantuviera en el intervalo esperado para la región, utilizando los parámetros reportados en Ordóñez (2003) (Fig. 7a y b). A continuación se presentan los gráficos de acumulación de carbono en biomasa, suelos, productos maderables y el acumulado de los tres anteriores (total), generados por el modelo CO₂Fix para cada una de las coberturas vegetales consideradas en este estudio. Los gráficos se presentan sin edición, por lo que se muestran en inglés, el cual es el idioma original del programa. El eje Y corresponde al almacén de carbono en megagramos de carbono (MgC) por hectárea, mientras que el eje X corresponde al tiempo (años) del análisis.

La plantilla de la Agricultura se modeló considerando una producción de biomasa anual nula, esto debido a que el cultivo modelado fue el maíz, un cultivo anual, del cual no queda biomasa en pie para el siguiente ciclo. Por tanto, la plantilla presenta datos de flujo de carbono entre la biomasa y la atmósfera, pero no considera acumulación de biomasa y por ende de carbono.

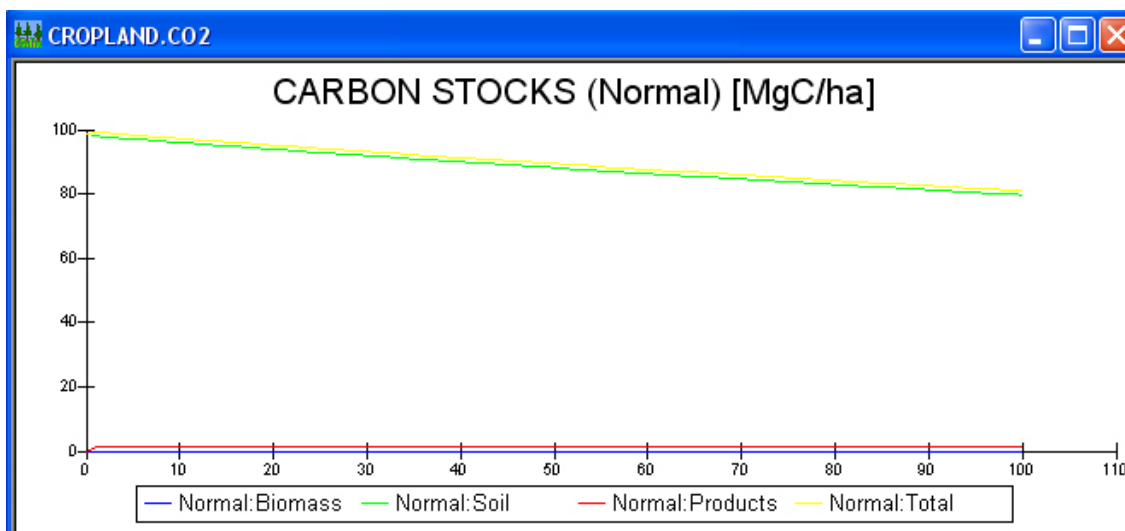


Figura 7a. Escenarios de acumulación de carbono en biomasa, suelo, productos y total, generados por el CO₂Fix para la cobertura vegetal agricultura.

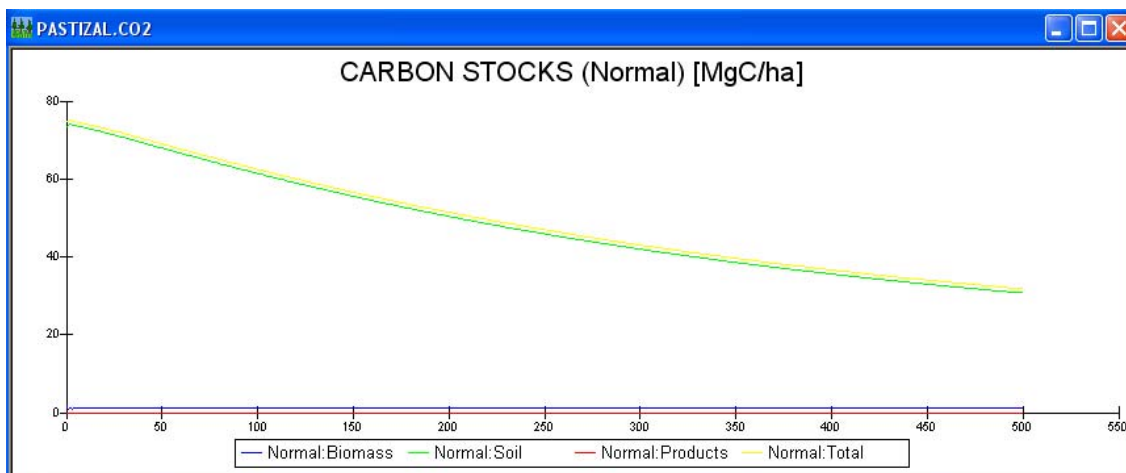


Figura 7b. Escenarios de acumulación de carbono en biomasa, suelo, productos y total, generados por el CO₂Fix para la cobertura vegetal pastizal.

Para el caso de la plantación frutal, debido a que el CO₂FIX no posee un módulo de fruto, se consideró adecuado repartir la producción anual de biomasa por hectárea del fruto, entre la biomasa del follaje y de las ramas (Fig. 7c).

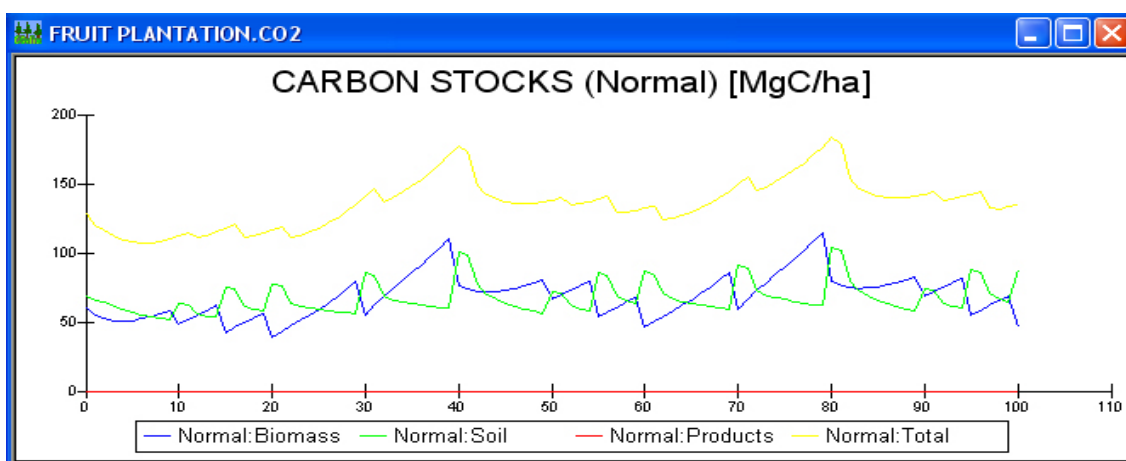


Figura 7c. Escenarios de acumulación de carbono en biomasa, suelo, productos y total, generados por el CO₂Fix para la cobertura vegetal frutales.

Para la plantilla de bosque degradado, se parametrizó el modelo con los promedios de los parámetros de crecimiento del pino y del encino. Dado que no se encontraron estimados regionales de degradación forestal, se utilizó el valor de densidad de carbono en biomasa en el bosque degradado estimado por Ordóñez (2003), para determinar la probable tasa de degradación forestal para la región y establecer así la tendencia de acumulación de carbono para esta cobertura vegetal en el modelo (Fig. 7d).

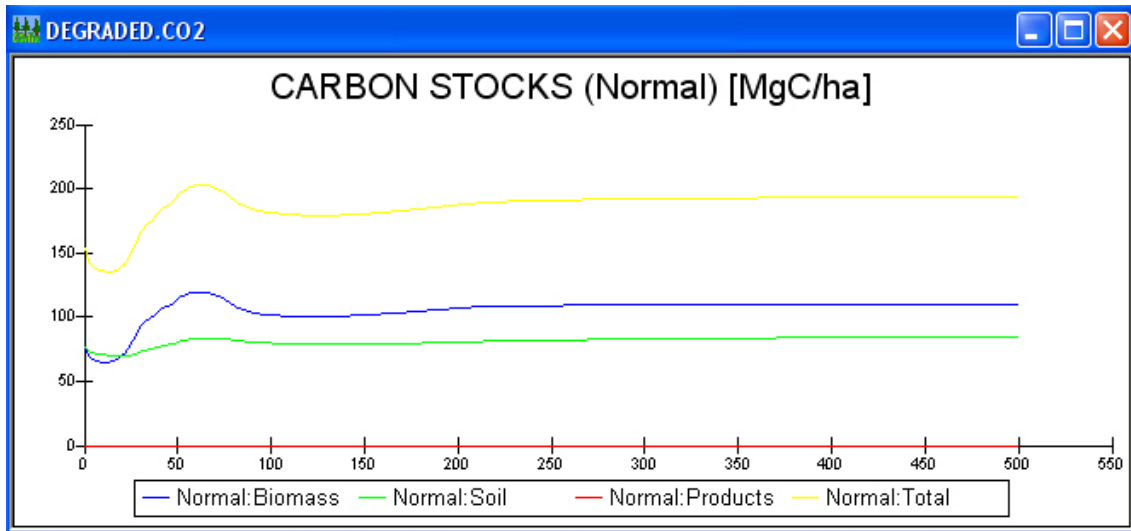
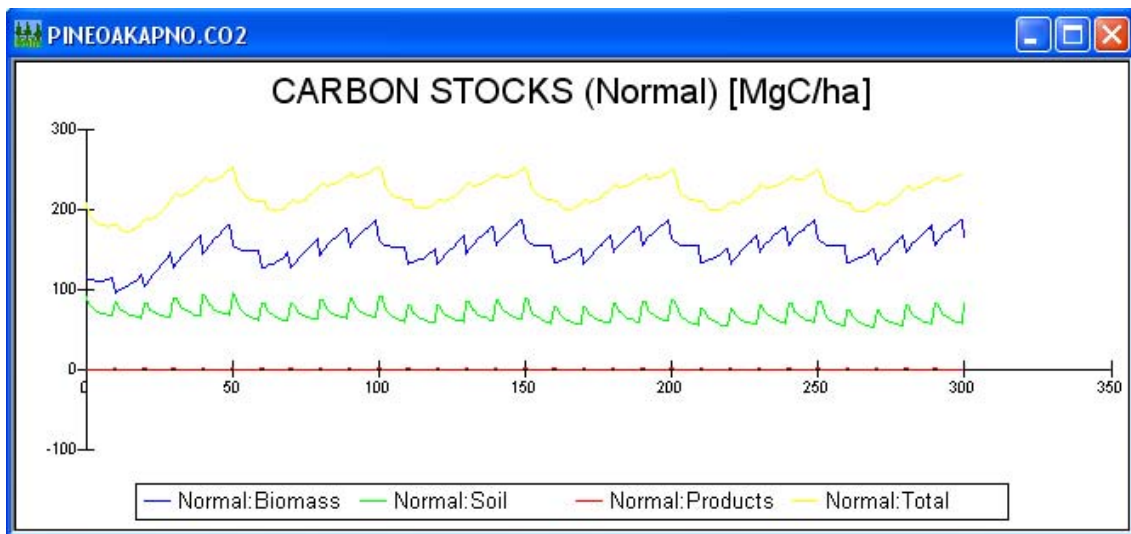


Figura 7d. Escenarios de acumulación de carbono en biomasa, suelo, productos y total, generados por el CO₂Fix para la cobertura vegetal bosque degradado.

Además de la cobertura vegetal bosque degradado, se modelaron 4 coberturas vegetales forestales más (Fig. 7e, f, g y h), de las cuales, solo en la cobertura Bosque de Oyamel, no se considero un manejo extractivo, ni el probable reciclado de sus productos maderables al final de la vida media de los mismos, debido a que no se encontró información de ese tipo para esta cobertura. De las coberturas forestales modeladas, la de pino-encino resultó ser la que acumula en promedio la mayor cantidad de carbono en biomasa durante el periodo modelado. A esta cobertura le sigue la cobertura de encino. La cobertura pino es la que presenta un manejo más intensivo y es la que menos carbono acumula en promedio entre las coberturas forestales.



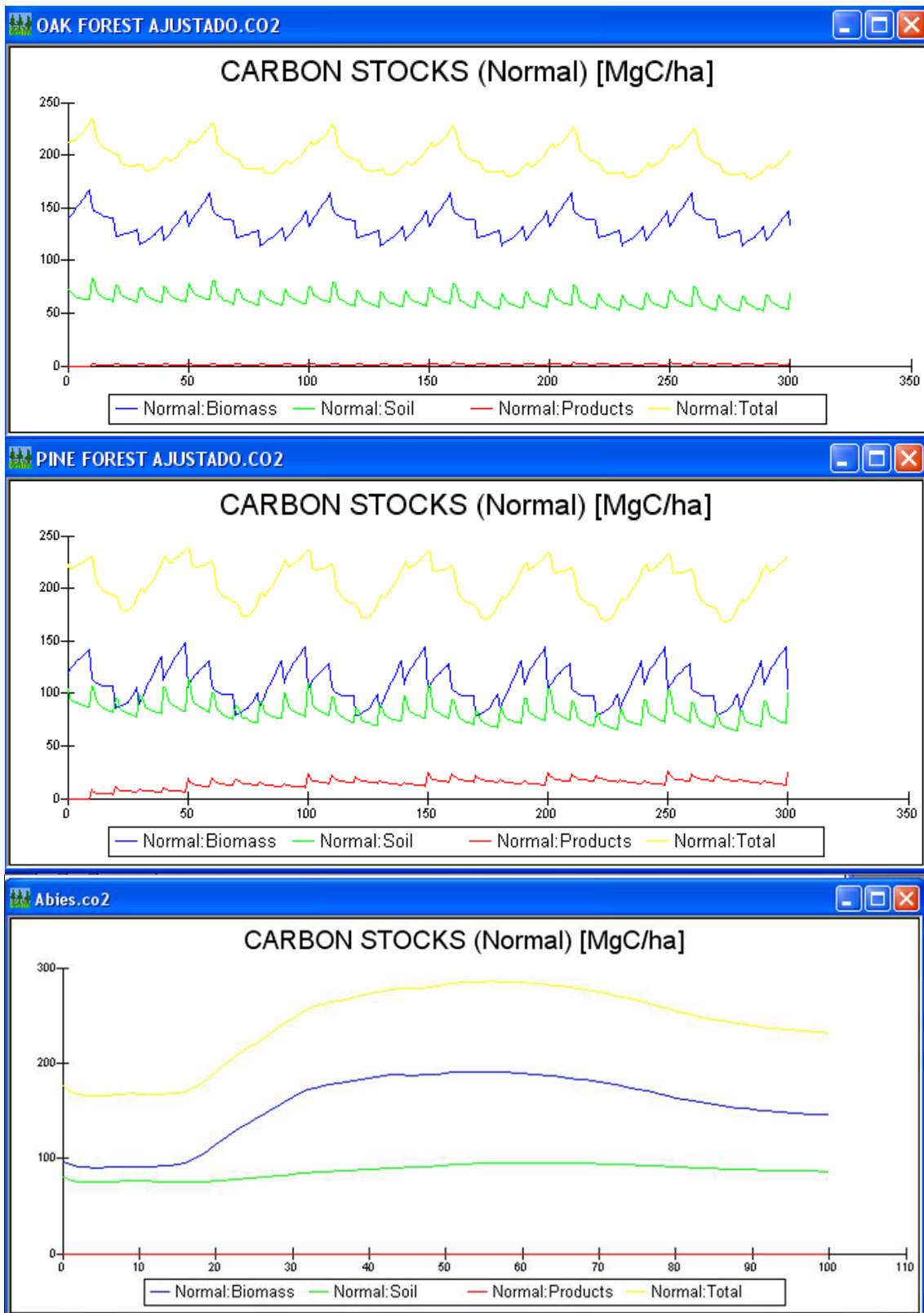


Figura 7e, f, g y h. Escenarios de acumulación de carbono en biomasa, suelo, productos y total, generados por el CO₂Fix para las coberturas vegetales forestales.

Finalmente, para el caso de la cobertura vegetal matorral, no se encontró ningún parámetro para estimar sus curvas de crecimiento, los únicos parámetros que se tenían para construir esta plantilla fueron la relación brote-raíz de Jaramillo (1994) y los parámetros de densidad de Ordóñez (2003). La acumulación de carbono a lo largo del tiempo, en esta plantilla como en la del bosque degradado y las coberturas vegetales no forestales, se construyó de forma conservadora, es decir, se mantuvo dentro del intervalo reportado por Ordóñez, debido a que no fue posible obtener más información sobre las curvas de crecimiento de estas coberturas vegetales.

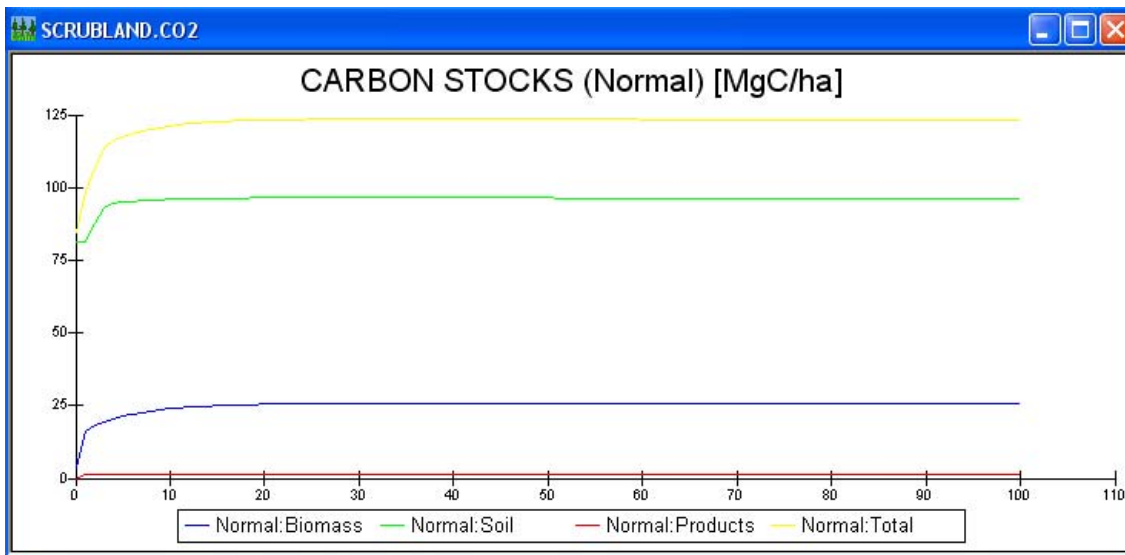


Figura 7i. Escenarios de acumulación de carbono en biomasa, suelo, productos y total, generados por el CO₂Fix para la cobertura vegetal matorral.

A pesar de haber construido las plantillas para cada una de las coberturas vegetales consideradas en este trabajo, no fue posible utilizarlas todas para el análisis en el modelo CO₂Land. Dado que es un modelo nuevo y que su funcionamiento se basa en el funcionamiento del CO₂Fix, el modelo presentó una serie de errores que impidieron la realización del análisis completo. Cuando se utilizaban las 9 plantillas en el análisis con el CO₂Land, el modelo se volvía inestable y se detenía. Desafortunadamente, para lograr realizar el análisis con el CO₂Land hubo que utilizar sólo 7 coberturas vegetales. Las coberturas vegetales que se descartaron del análisis fueron las de Oyamel y el pastizal. La primera debido a que de las coberturas vegetales forestales, era la que menos superficie ocupaba en la región y a que su exclusión del análisis no modificaría significativamente la dinámica de carbono en la región. Para el caso del pastizal, dado que su acumulación de carbono en biomasa es muy parecida a la de la agricultura, se adicionó su superficie a la de la agricultura y se analizó en el CO₂Land como una sola cobertura vegetal.

6.3 Parametrización del modelo CO₂Land

Las dinámicas markovianas ó cadenas de Markov, son una serie de eventos, donde la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediato anterior. Las cadenas de este tipo tienen memoria; "Recuerdan" el último evento y esto condiciona las posibilidades de los eventos futuros. Este tipo de dinámicas se encontraron convenientes en este estudio, para construir matrices de transición futuras que podrían considerarse como escenarios posibles, de la transición se superficies entre las coberturas vegetales analizadas. Estos escenarios dependen única y exclusivamente de los datos con los cuales se han alimentado dichas dinámicas por lo que matemáticamente tenderán a un equilibrio dinámico en el cual, seguirá la transición de superficie entre coberturas pero, a una tasa de cambio constante.

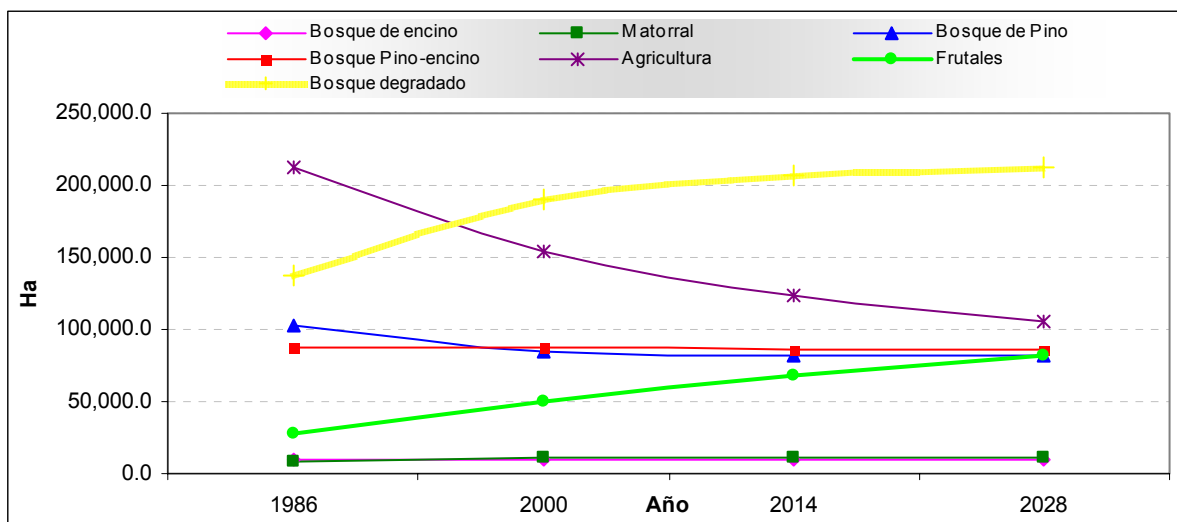


Figura 8. Dinámicas Markovianas para las CV consideradas en el análisis del CO₂LAND.

Según este análisis, la inercia del periodo histórico conllevará a una disminución bastante pronunciada (en comparación con la dinámica de las demás coberturas), de la cobertura agrícola. Sin embargo, esta disminución continúa hasta el final del análisis. En general todas las coberturas alcanzan un equilibrio dinámico hacia el final del análisis, solo los frutales, el bosque degradado y la agricultura presentan una dinámica menos estable con una tendencia más marcada (Fig 8). Para encontrar el punto en el tiempo en el cual todas las coberturas alcanzan su equilibrio dinámico, sería necesario llevar a cabo un análisis de tercer orden. Aunque para mis objetivos, este análisis ya no fue necesario.

El aumento en la superficie de las plantaciones frutales es producto de la tendencia actual que muchas comunidades tienen a expandir sus plantaciones de aguacate (SUMA, 2006). Sin embargo, esta tendencia no parece afectar en gran medida a las coberturas forestales, ya que según los resultados de las dinámicas markovianas, sólo el bosque de pino presenta una leve pérdida durante el periodo histórico, y se estabiliza durante los periodos esperados. Además, tomando en

cuenta los resultados de degradación forestal que ha obtenido Guerrero (2003) usando modelos espacialmente explícitos, podría ser posible que los frutales hayan tomando superficie de la agricultura abandonada y en parte contribuir con esto a la pérdida de bosque de pino en el periodo histórico. El marcado aumento que se observa en la superficie del bosque degradado, puede deberse en parte a la regeneración natural o reforestación de las áreas agrícolas abandonadas y en parte, al menos al principio, a la pérdida de bosque de pino.

Con este análisis también se obtuvo una matriz de transición que abarca el periodo histórico (1986-2000) y el primer periodo esperado (2000-2014) (Tabla 6).

Coberturas en Ha	Bosque Encino	Matorral	Bosque de Pino	B pino-encino	Agricultura	Frutales	Bosque degrada	1986
Bosque Encino	3,058.2	129.9	390.3	2,249.5	575.1	424.1	3,104.7	9,931.8
Matorral	147.0	1,175.1	546.8	287.4	1,482.0	340.5	4,128.2	8,107.0
Bosque de Pino	1,544.1	734.5	37,359.9	14,275.9	4,791.5	10,132.8	33,779.4	102,618.0
B pino-encino	2,048.3	348.8	10,417.6	46,737.0	3,244.6	5,021.5	19,751.2	87,569.0
Agricultura	1,189.3	5,493.2	9,768.3	10,672.4	93,445.0	18,880.0	73,370.1	212,818.2
Frutales	199.3	63.9	3,363.0	1,299.6	953.6	17,911.2	3,938.3	27,728.9
Bosque Degrad	1,078.8	3,102.8	19,409.4	10,831.8	18,597.2	15,582.4	69,517.8	138,120.2
2014	9,265	11,048	81,255	86,354	123,089	68,292	207,590	586,893.2

Cobertura	Porcentaje de cambio 1986 - 2014
Bosque Encino	- 6.7
Matorral	+ 36.3
Bosque de Pino	- 20.8
B pino-encino	- 1.4
Agricultura	- 42.2
Frutales	+ 146.3
Bosque degradado	+ 50.3

Tabla 6. Matriz de transición obtenida a partir de dinámicas Markovianas y porcentaje de cambio en superficie (pérdidas/ganancias) de cada cobertura.

6.4 Simulación a nivel de paisaje

Los valores de acumulación de carbono de la cobertura agricultura fueron siempre cero. Esto se debe a que la agricultura, en este caso el cultivo del maíz, es un cultivo anual del cual es extraída su biomasa aérea a lo largo del año, y no acumula carbono anualmente como lo hacen las demás coberturas. Por tanto, aunque la cobertura agricultura gane superficie de las demás coberturas, no aumentará su almacén de carbono a lo largo del tiempo. Por esta razón, la línea base de la agricultura no fue considerada en la generación de la línea base regional.

La modelación con CO₂LAND genera una base de datos bastante amplia y detallada, es decir, muestra en forma de lista, el carbono que acumula anualmente cada cobertura en función de la superficie que gana de las otras coberturas y de la

superficie que conserva dicha cobertura a lo largo del intervalo de tiempo asignado. Con esta base de datos se construyeron los siguientes escenarios:

6.4.1. Línea de base (escenario de referencia)

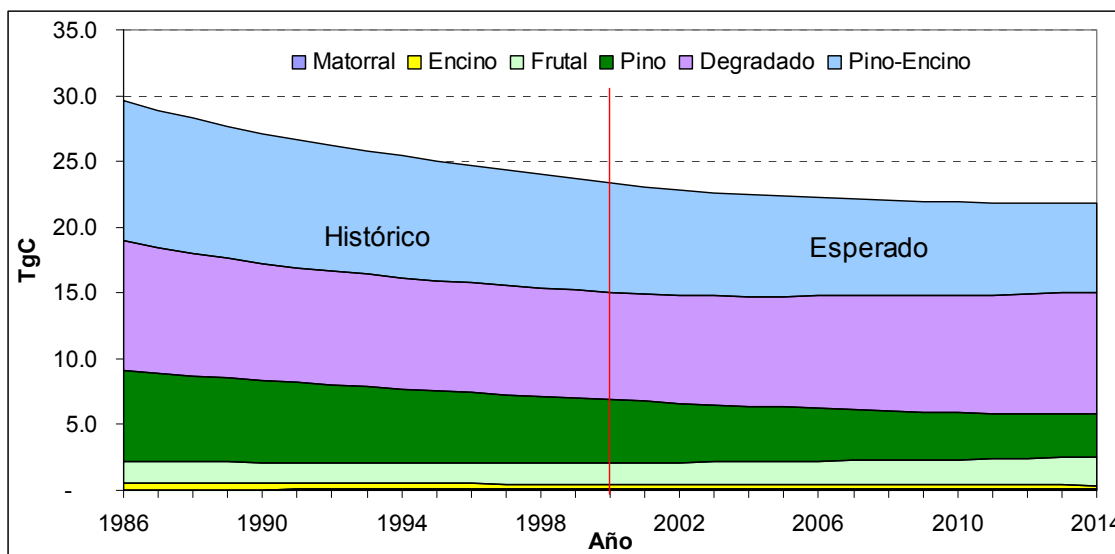


Figura 9. Gráfica que muestra la línea base de carbono regional por clase de cobertura vegetal.

Con este análisis se puede apreciar que:

A lo largo de los 28 años del análisis, las coberturas vegetales que más C pierden son el Pino y el Encino, con una pérdida de 3.6 TgC y 0.28 TgC respectivamente. Lo cual representa una pérdida de cerca del 52.6% y 53%, respectivamente, del carbono inicial de ambas coberturas. Aunque estos valores no concuerden con los cambios en superficies que son de 20.8% y 6.7% respectivamente, no quiere decir que exista un error en el modelo o en la modelación, sino que la ganancia de carbono en el bosque joven no equivale a la pérdida del mismo en un bosque maduro aunque sea la misma superficie.

Los bosques de Pino-Encino pierden 3.8 TgC, es decir, pierde cerca del 36% de su carbono inicial durante los 28 años.

Las plantaciones frutales y los bosques degradados comienzan perdiendo C pero a partir de 1994 y 2001 respectivamente, comienzan a ganar C superando al final del periodo esperado, el valor inicial por 0.5 TgC en el caso de los frutales y quedándose a 0.6 TgC de alcanzar el valor inicial en el caso del bosque degradado.

Finalmente, los matorrales son la cobertura vegetal que no pierde carbono al final de los 28 años del análisis, y registra una ganancia final de 0.1 TgC, es decir, gana cerca del 584 % de su carbono inicial durante los 28 años.

El incremento en el bosque degradado es resultado del abandono de tierras dedicadas a la agricultura de temporal en gran parte de la región y el incremento en las plantaciones frutales es resultado del rápido incremento de tierras dedicadas al cultivo de aguacate (Ordóñez, 2003). Para el caso del bosque de pino y del de pino-encino la línea base tiende a estabilizarse.

A nivel regional total, la modelación muestra que la emisión de carbono será cada vez menor a lo largo del intervalo de tiempo analizado. En el periodo histórico se registra la mayor pérdida de carbono. En este periodo el contenido inicial de C disminuye aprox. 6.2 TgC (29.6 TgC en 1986 a 23.4 TgC en el 2000); mientras que en el periodo esperado, el contenido disminuye aprox. 1.5 TgC (23.4 TgC en el 2000 a 21.9 TgC en el 2014). En total, la región disminuye su concentración aprox. 7.7 TgC (29.6 TgC en 1986 a 21.9 TgC en el 2014) (Fig. 10).

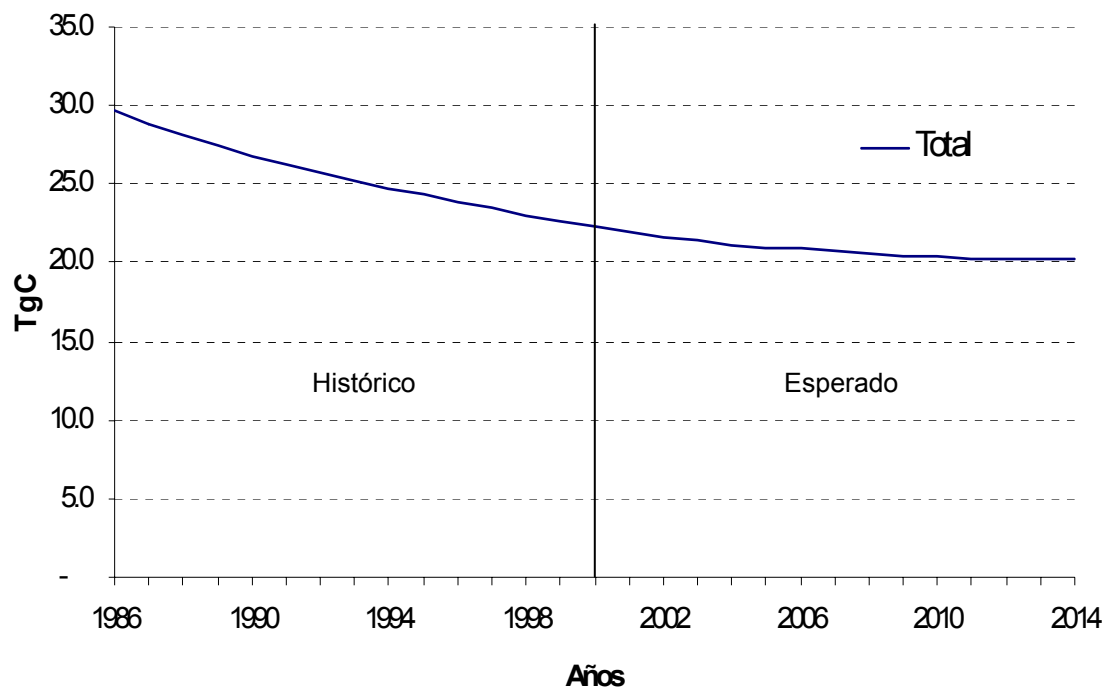


Figura 10. Gráfica que muestra la línea base regional total.

El promedio de emisión de todo el periodo analizado es de aprox. 277 GgC por año, aunque en los dos últimos años (2013 y 2014), el análisis reporta una ganancia de C de aprox. 36 GgC por ambos. Sin tomar en cuenta estos años de ganancia, la región pierde aprox. 299 GgC anuales. El periodo histórico registra una pérdida de aprox. 446 GgC por año, mientras que en el esperado se considera una pérdida anual de 108 GgC, y 130 GgC cuando no se toman en cuenta los años de ganancia.

6.4.2. Escenario de mitigación (proyecto)

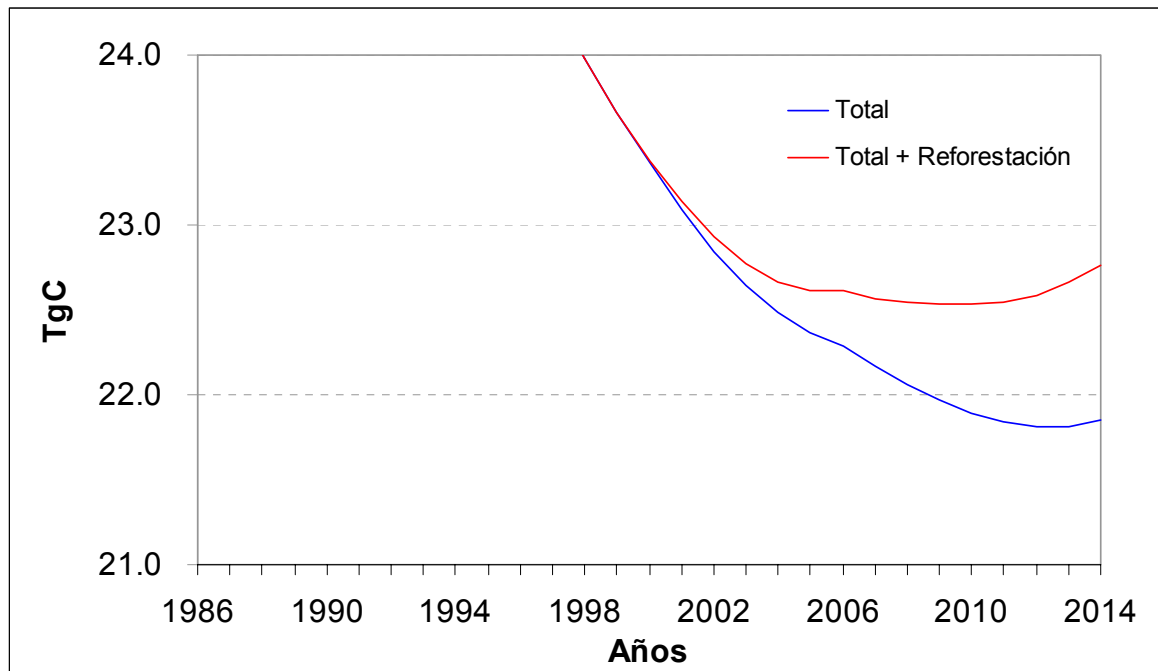


Figura 11. Gráfica que muestra con más detalle la parte final de la línea base regional total y el proyecto de mitigación.

Según el análisis con el CO₂Land, de continuar la tendencia actual de cambio de uso de suelo en la región de estudio, esta funcionará como fuente de carbono hasta el año 2012 aprox. El 2013 al parecer, será un año de equilibrio dinámico entre emisiones y captura de carbono, y finalmente la región comenzará a funcionar como sumidero para el año 2014 aprox.

A lo largo del proyecto se obtienen una acumulación de casi 400 tC por ha en promedio o aprox 50 tC/año. Al final del análisis, se registra la mayor diferencia en cuanto a carbono almacenado entre la línea base y el proyecto, este último valor es de 1.2 TgC (Fig. 11). Evidentemente la recuperación de la cobertura original y por ende de la concentración inicial (concentración de C de 1986), será más lenta dado que la vegetación tendrá que llevar a cabo un proceso de sucesión biológica que desembocará, en última instancia, en la vegetación original, si es que el sistema tiene aún la capacidad de recuperarse y que el suelo no ha perdido lo que lo que se conoce como vocación forestal.

Con el proyecto de reforestación, el escenario cambia muy poco, la región sigue funcionando como fuente de carbono hasta aprox. el año 2009. Después de aprox. 1 año de equilibrio dinámico, la región se vuelve sumidero. En resumen, con la aplicación del proyecto, la región se vuelve sumidero 3 años antes (2011).

A pesar de todos los cambios que genera el proyecto sobre la dinámica de carbono regional, se obtiene una diferencia muy pequeña entre la línea base y el escenario de mitigación. La figura 11 muestra un acercamiento a la zona de la gráfica donde comienza el proyecto, gracias a este artificio es posible apreciar visualmente la diferencia entre ambas líneas. Para ser más precisos, la ganancia de carbono del proyecto en relación con la línea base es de 0.89 TgC. Esta situación, se debe a que la tasa de deforestación y degradación en la región son muy altas y la cantidad de carbono que se pierde por hectárea en estos procesos es mucho mayor que la ganancia por reforestación. Por tanto, para poder incrementar la mitigación de las emisiones de carbono en la región, se necesitan más opciones de mitigación, que incluyan a aquellas dirigidas a evitar la deforestación, o incrementar el área a reforestarse.

VII. DISCUSIÓN

7.1 Parametrización

El primer objetivo particular de este trabajo fue recopilar y organizar la información necesaria, para parametrizar los modelos que iba a utilizar en este trabajo. Este fue quizás el objetivo particular más complicado de los 3 que se plantearon, dado que, obtener los parámetros regionales para alimentar el modelo CO₂Fix, fue una tarea que requirió bastante tiempo y búsqueda. La mayoría de los parámetros de acumulación de biomasa y más aún los necesarios para alimentar el módulo de suelos del modelo CO₂Fix (Tabla 5), no han sido reportados para la región de estudio. Esto trae como consecuencia que los resultados de este trabajo sean solo aproximaciones y carezcan de precisión. La falta de información, puede deberse en parte a que la modelación por computadora es un campo bastante nuevo en nuestro país, sobre todo para contabilidad de carbono. Hasta la fecha para nuestro país, solo existen los estudios de, de Jong y col. (1997a)(1997b), Ordóñez (2000) y la tesis de licenciatura de Olgún (2000), en los cuales se utiliza el modelo CO₂Fix, sin embargo no hay reportes de uso del modelo CO₂Land, o de otros modelos similares en publicaciones nacionales.

Actualmente existen varios modelos de simulación (CO₂Fix, CO₂LAND, CAMFor, TimberCAM, GORCAM, FULLCAM), que permiten contabilizar la captura y los flujos de carbono a distintos niveles espaciales y temporales, así como en y entre diferentes coberturas vegetales, los cuales tampoco han sido utilizados en estudios nacionales.

La mayoría de los modelos actuales de contabilidad de carbono, requieren ser alimentados prácticamente con los mismos tipos de parámetros (Tabla 4). Sin embargo, muchos países incluido el nuestro, carecen de gran parte de esa información a nivel estatal e incluso a nivel regional y/o la información disponible no está condensada y organizada en bases de datos que sean accesibles. Además, casi todos estos modelos fueron diseñados para modelar la dinámica del

carbono en coberturas forestales únicamente. Asimismo, la mayoría de estos modelos han sido desarrollados por y para proyectos de países industrializados, donde los procesos de cambio de uso de suelo no tienen la misma relevancia e intensidad que en Latinoamérica, donde el cambio de uso de suelo - principalmente de una cobertura de alta biomasa a una de baja - es muy probablemente la principal fuente de emisiones de C a la atmósfera.

Para estudios de caso de carbono en Latinoamérica, donde se requiere modelar la dinámica de carbono en alguna cobertura de baja biomasa o entre distintas coberturas vegetales, no existe más opción que tratar de ajustar o parametrizar estos modelos con los datos disponibles. Para este caso, la información que se tenía de cada cobertura vegetal considerada en el estudio, permitió parametrizar someramente el modelo CO₂Fix. Buena parte de los parámetros se obtuvieron de fuentes y publicaciones no relacionadas con la región de estudio. Sin embargo, los resultados de la simulación que se llevó a cabo fueron bastante semejantes a los obtenidos mediante SIG por Guerrero (2003) al determinar las emisiones y captura de C en la región durante el periodo histórico y a las densidades de carbono calculadas por Ordóñez (2003). Por tanto, se puede concluir en este punto que, con los datos con los que se contaba, se pudo llevar a cabo una buena simulación de la acumulación natural de carbono en cada cobertura vegetal considerada.

7.2 Simulación a nivel de rodal

Se generaron satisfactoriamente con el modelo CO₂Fix, las 9 plantillas correspondientes a cada tipo de cobertura vegetal considerada en este estudio. Como se mencionó anteriormente, la falta de información fue una de las limitantes que más afectaron dentro de todo el estudio. Sin embargo, gracias a la información nacional e internacional que se logró recopilar, y sobre todo a que se contaba con las densidades de carbono reportadas por Ordóñez (2003), se pudo parametrizar el modelo y generar las plantillas.

Al parametrizar cada una de las coberturas consideradas, cuando se carecía de algún(os) parámetro(s), se utilizaba el intervalo de densidades de carbono reportadas por Ordóñez (2003), para ajustar la acumulación de biomasa de la cobertura. El ajuste consistía en lograr que la curva de acumulación de cada cobertura, generada por el CO₂Fix, una vez alcanzado el equilibrio dinámico de ésta, quedara dentro del intervalo de densidades de carbono encontrado y reportado por Ordóñez (2003) para la región de estudio.

Las coberturas de agricultura y pastizal (anuales o bianuales), tuvieron resultados muy similares al modelarlas con el CO₂Fix. Esto se debe en parte, a que el modelo calcula la acumulación anual de carbono durante el crecimiento de una especie, mediante procesos fisiológicos, y a que algunos de los parámetros que se utilizaron para modelar ambas coberturas, fueron muy parecidos. Debido al primer factor, al graficar estas plantillas, el modelo no muestra la dinámica del carbono en la biomasa. El modelo considera que no hay acumulación de carbono en biomasa de un año al otro debido a la cosecha anual, pero si considera el flujo del mismo

entre la biomasa, el suelo y la atmósfera. Estas plantillas permiten analizar la transición de carbono entre el suelo y la atmósfera, e incluso, cuanto carbono sale del sistema por la cosecha.

La cobertura de matorrales a pesar de no ser una cobertura forestal, posee ciertas características que comparte con los árboles, como la acumulación de biomasa en materia leñosa, la formación de ramificaciones, algunos matorrales presentan raíces profundas, etc. Estos factores permitieron ajustar de forma más sencilla algunos de los parámetros faltantes. Dentro del ajuste se utilizaron como base, algunos de los parámetros considerados en las coberturas forestales. Para lograr el ajuste, se fueron probando variaciones de los parámetros hasta obtener una concentración anual similar a la que determinó Ordóñez (2003) en su estudio. Algunos de los parámetros ajustados fueron la concentración de carbono en biomasa, el contenido de carbono inicial o el coeficiente tallo/raíz, entre otros.

Los frutales (aguacate), se modelaron utilizando los datos del bosque de encinos, esto debido a que el árbol del aguacate, acumula biomasa de forma similar al encino (Ordóñez com. Pers.). Sin embargo, no fue posible modelar la acumulación de carbono en la fruta, debido a que no se pudieron obtener los datos necesarios para modelar ese almacén de carbono. Lo más sobresaliente de esta cobertura fue que incluso sin modelar la acumulación de carbono en la fruta, los frutales mostraron un comportamiento de aumento en el almacén de carbono muy marcado dentro de la dinámica de carbono regional.

Los bosques de pino, encino, oyamel y pino-encino fueron modelados utilizando los datos de De Jong y col., (2007) quienes previamente propusieron una modelación en CO₂Fix de los bosques de la zona de estudio. Debido a lo completo de esta información, se pudieron modelar sin mayores problemas estas coberturas vegetales.

El bosque degradado se parametrizó utilizando los datos del bosque de pino para la primer cohorte y del de encino como segunda cohorte, sólo se ajustó la mortalidad y la cantidad de biomasa que sale del sistema, debido a las prácticas de manejo y extracción intensiva dominantes en la región.

Los resultados de estas plantillas, fueron comparados con las densidades de carbono reportadas por Ordóñez (2003) resultando bastante similares, por lo que se puede concluir que el análisis que se llevó a cabo con el modelo CO₂Fix fue bastante preciso. En cuanto a la modelación del carbono acumulado/perdido por el suelo, los resultados obtenidos en la modelación fueron muy parecidos a los datos obtenidos por Ordóñez (2003). El programa considera que la deforestación, por lo general, implica una pérdida casi total de la biomasa aérea y de gran parte del carbono del suelo en el lapso de unas cuantas décadas. La magnitud de las pérdidas posteriores del carbono que queda en el suelo depende del tipo de uso del suelo que reemplace la cobertura forestal original, pero este análisis le corresponde ya al modelo CO₂Land. Se ha reportado, que bajo las condiciones de labranza convencional, la pérdida de carbono en el suelo es de entre 40 y 50% y

la mitad de esta pérdida ocurre en menos de cinco años. (Davidson y Ackerman, 1993; Sombroek y col., 1993). El CO2Fix utiliza un porcentaje menor para hacer sus cálculos, aprox. 38% lo cual permite crear escenarios un tanto conservadores, pero adecuados para analizar el proceso de pérdida de C.

7.3 Cambio de uso de suelo y escenarios del CO₂Land

Aunque nuestro país, ha sido uno de los sitios importantes de iniciación de la agricultura y de génesis de plantas cultivables se considera como un país con reducido potencial para la agricultura. Sin embargo, durante el periodo 1986-1993, fueron sembradas en promedio 14.4 millones de hectáreas con 10 de las principales especies que se cultivan de manera comercial en nuestro país, sin incluir la superficie de cultivos frutícolas ni hortícolas (Téllez, 1994).

Esta demanda de tierra aunada al reducido potencial agrícola de nuestro país, ha generado un patrón de aprovechamiento de los recursos basado en el cambio de uso de suelo, de forestal a agrícola. En la región de estudio, el cambio ocurre en ocasiones, en áreas cuyas pendientes las hacen muy poco aptas para la agricultura, menos aún para la agricultura intensiva que se practica en muchas partes de la región. Por otro lado, el patrón nacional de uso de los recursos forestales, basado en un manejo forestal inadecuado, ha deteriorado y empobrecido la calidad de los bosques de la región (SEMARNAT, 1999). En la región de estudio, ambos tipos de patrones se encuentran a menudo relacionados, y frecuentemente el creciente deterioro forestal concluye en el cambio de uso de suelo.

Al cambiar el uso de suelo de coberturas vegetales de alta biomasa a coberturas de baja biomasa, se liberan grandes cantidades de carbono hacia la atmósfera debido a la descomposición natural de la materia orgánica. Hasta el presente trabajo, no existía un estimado del flujo anual de CO₂ en la región de estudio debido al cambio de uso de suelo. De Jong (2000) reporta que el 35% de las emisiones totales nacionales de CO₂ para ese año, provienen del cambio de uso de suelo. El inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2002 (INEGEI), reporta una emisión anual nacional promedio (1993 – 2002), debida al cambio de uso de suelo de 23.7 TgC aproximadamente.

Basados en los resultados del modelo CO₂Land, la región Purépecha por cambio de uso de suelo, emite aprox. en promedio 277 GgC/año (aprox. 0.3 TgC). Este valor de emisión representa el 0.1% del carbono que en 1990 se estimó, es capturado anualmente por la biomasa viva de los bosques boreales (200 TgC/año) (Goodale et al., 2002). Desde esta perspectiva, la emisión de C de la región de estudio no representa a nivel mundial, una fuente de C importante, sin embargo la emisión nacional anual de C por CUS entre 1993 a 2002 (23.7 TgC) (SEMARNAT-INE, 2006) llegó a representar un 12% del estimado de captura anual de los bosques boreales (aprox. 200 TgC).

La región de estudio, representa sólo el 0.3% de la superficie nacional y contribuye con el 1.2% aprox. de las emisiones anuales nacionales de C por cambio de uso de suelo. Dado lo anterior, puedo decir que a nivel nacional, la región de estudio no representa una fuente importante de C, ya que estos valores, son relativamente bajos comparados con los que se han reportado en otros estudios, para otras partes del país. Por ejemplo, de Jong y col. (1999 y 2000), en dos estudios metodológicamente parecidos a este estudio, reportan una emisión anual neta por CUS, de 1.15 TgC (3% de las emisiones nacionales anuales) para los Altos de Chiapas (0.3% de la superficie nacional), y 5.42 TgC (14% de las emisiones nacionales anuales), para la región de la selva lacandona-reserva El Ocote (1.44% de la superficie nacional) respectivamente.

7.4 Deforestación versus Reforestación

En cuanto a la degradación forestal, la región de estudio presenta una tasa anual de deforestación del 0.45%. Esta tasa es más baja que la que reporta de Jong y col (1999) para los altos de Chiapas (2.13%) y para la Región Lacandona-El Ocote (1.55%). Tomando en cuenta que las coberturas vegetales tropicales generalmente tienen una mayor densidad de C que las templadas, una unidad de emisión de C en el trópico generalmente requiere menos cambio de uso de suelo que en una cobertura vegetal templada. Por tanto, los valores de deforestación de la región de estudio representan en C, una mínima parte de lo que representa la deforestación en las coberturas tropicales. Desafortunadamente, en nuestro país no existen estimados de emisión en sistemas templados con los cuales podría comparar mis resultados.

Según el Programa Nacional de Reforestación (PRONARE), en el período de 1995 a 1998 se reforestaron en promedio al año 288,000 hectáreas, mediante la plantación total de 1,470 millones de árboles en áreas rurales, cubriendo en los tres años una superficie del orden de 1.15 millones de hectáreas a nivel nacional. Actualmente en México, el INEGI, calcula una reforestación anual de entre 35,000 y 50,000 hectáreas por año reforestadas sin que haya un seguimiento del éxito de la reforestación.

Considerando los datos actuales que reporta el INEGI, un esfuerzo de 2000 hectáreas al año como se ha propuesto en este estudio, es pequeño a nivel nacional, pero no tanto a nivel estatal y mucho menos a nivel regional. Como se explicaba en la sección "Área de estudio", la región Purépecha es una zona forestalmente bastante importante dada su variedad y cantidad de cobertura forestal. Por tanto, aunque se propusiera un esfuerzo de reforestación más grande que el que aquí proponemos, se lograrían reducir las emisiones de carbono, pero la región seguiría funcionando como una fuente de carbono, aunque menos años, debido a la inercia histórica de degradación que muestra la región. Esta inercia es debida a una serie de factores como son, la apertura de nuevos caminos en las zonas forestales, la expansión de la línea urbana, el crecimiento demográfico, la demanda de recursos y tierras para agricultura y horticultura, y la explotación legal e ilegal de los recursos forestales y no forestales,

Una de las soluciones más adecuadas para reducir esta inercia, sería fomentar la conservación y reducir la degradación forestal. Un bosque maduro captura más CO₂ que uno en crecimiento, además de que ofrece una variedad de servicios ecosistémicos, así como una gran diversidad de productos no maderables. Por tanto, si no se busca lograr un cambio radical de estrategia y convertir al sector forestal en fuente de divisas, empleo y grandes beneficios ambientales, la deforestación y degradación forestal continuará aún con un gran esfuerzo de reforestación.

Con la finalidad de conseguir un aumento neto de la superficie forestal en el largo plazo algunos autores tales como Masera (1995), Masera y col. (1997), Masera y Sheinbaum (2004) han planteado una serie de opciones de mitigación que ayudarían a lograr este objetivo, estas opciones incluyen: 1) conservación de áreas naturales protegidas; 2) manejo de bosques naturales templados y tropicales; 3) promoción de estufas eficientes de leña para la cocción doméstica; 4) programas de restauración forestal; 5) plantaciones forestales para pulpa y papel; 6) plantaciones energéticas y 7) sistemas agroforestales. Lograrlas requerirá de un gran esfuerzo regional, municipal y estatal, lo cual normalmente es muy difícil más no imposible.

7.5 Los modelos como herramientas útiles y económicas de análisis.

EL CO₂Fix y el CO₂Land como todos los modelos, permiten escenificar no pronosticar. En conjunto, permiten generar escenarios sobre la dinámica del carbono en distintas escalas de tiempo y en una región o en un almacén determinado. La modelación en ambos programas depende totalmente de los parámetros con los cuales se alimenten y solo pueden generar una plantilla o una base de datos respectivamente, por corrida. Por sí mismos, no son capaces de considerar, ni mucho menos de determinar, los niveles de incertidumbre que poseen los datos con los cuales se alimentan. Para poder considerar las incertidumbres que pudiese tener cada parámetro, habría que realizar varios análisis de la información, alimentando los modelos con la gama de datos contenidos en el intervalo de incertidumbre. Actualmente, se está desarrollando una nueva versión del CO₂Fix que permite considerar el nivel de incertidumbre de cada parámetro. El CO₂Land todavía requiere trabajo en la interfase con el usuario para ser más sencillo de usar. La versión utilizada en este trabajo presentaba también algunos problemas técnicos y matemáticos, por lo que fue necesario repetir varias veces el análisis.

Estos modelos han probado ser muy útiles para generar escenarios de línea base y mitigación, además estas herramientas disminuyen el tiempo y el esfuerzo necesarios para llevar a cabo dichos análisis, lo cual permite incrementar el área y/o el intervalo de tiempo a estudiarse, utilizando menos recursos.

Con estos modelos es posible generar no solo la línea base histórica, sino también, la de periodos esperados subsecuentes, lo cual permite extender el análisis hasta el periodo de tiempo deseado. Con el análisis generado por el modelo CO₂Land además, se pueden visualizar los sumideros de carbono con más deterioro, así como el impacto que el cambio de uso de suelo tiene sobre ellos.

VIII. Conclusiones

- A pesar de la escasez de parámetros para alimentar al modelo CO₂Fix, se pudo crear de forma satisfactoria plantillas de acumulación/pérdida de carbono para cada cobertura vegetal considerada en el estudio.
- El modelo CO₂Land aunque con problemas técnicos, permitió crear una línea base histórica (periodo conocido) y una línea base esperada (escenario) de la dinámica de carbono regional total y por cobertura vegetal.
- Ambos modelos aunque han sido creados para analizar coberturas forestales, permitieron analizar también coberturas no forestales y son una herramienta económica, sencilla y confiable para crear escenarios de acumulación de carbono y desarrollar escenarios de línea base y mitigación.
- En términos de emisiones, de continuar la tendencia actual de cambio de uso de suelo y degradación, se espera que la región funcione como una fuente de C hasta el 2012 registrando una pérdida de aprox. 7.7 TgC en los 28 años analizados. Anualmente la región emite en promedio 277 GgC lo cual representa el 2% de las emisiones anuales nacionales por cambio de uso de suelo
- La región de estudio, representa una pequeña fuente de carbono a nivel nacional y no se espera que se vuelva más grande en los próximos 7 años (2007 – 2014), según los escenarios obtenidos con ambos modelos.
- De llevarse a cabo un escenario de mitigación, tal y como lo he propuesto en este estudio, la región reportará al final del periodo analizado una reducción en la pérdida de C de 1.2 TgC, lo cual es apenas aprox. el 15% del C que se emitirá al final del periodo sin la mitigación.
- Una de las soluciones mas adecuadas para reducir esta inercia, sería fomentar la conservación y reducir la degradación forestal, ya que de no lograr un cambio radical de estrategia y convertir al sector forestal en fuente de divisas, empleo y grandes beneficios ambientales, la deforestación y degradación forestal continuará aún con un gran esfuerzo de reforestación.

Para mejorar este trabajo se sugiere:

- Obtener más parámetros in situ tales como, la densidad de la madera, el crecimiento corriente anual del fuste, el crecimiento relativo, la tasa de recambio del follaje, las ramas y las raíces, la mortalidad natural y efecto de la competencia intra e interespecífica, la mortalidad debida al manejo, aclareos-cosecha, los grados días, la precipitación y evapotranspiración, la tasa de decaimiento de la biomasa, la tasa de humificación, entre otros, de las especies dominantes o representativas de cada cobertura vegetal
- Utilizar versiones más estables de los modelos, para poder considerar todas las coberturas vegetales deseadas y un periodo de tiempo mayor para poder escenificar la dinámica del carbono a un plazo más largo.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Aguilar G. G. 2000. La producción de aguacate en Michoacán ante su próxima liberalización arancelaria en el TLCAN. (Economía regional). *All Business. Business Periodicals. Carta económica regional* Julio – Septiembre.
- 2) Alexiades M.N. and P. Shanley. 2004. Productos Forestales, Medios de Subsistencia y Conservación: Estudios de Caso sobre Sistemas de Manejo de Productos Forestales No Maderables. Cap. 1. En: Alexiades, M.N. & Shanley, P. (eds.) *Productos forestales, medios de subsistencia y conservación: Estudios de caso sobre sistemas de manejo de productos forestales no maderables*. Vol. 3 – América Latina. CIFOR, Bogor, Indonesia, pp. 1-22.
- 3) Arnold J. E. M. and M. R. Pérez. 2001. Can non-timber forest products match tropical forest conservation and development objectives? *Ecological Economics*. (3) **39**: 437-447.
- 4) Astier M., E. Pérez-Agis, T. Ortiz y F. Mota. 2004. Sustentabilidad de sistemas campesinos de maíz después de cinco años: el segundo ciclo de evaluación MESMIS. En: Astier M. y J. Hollands (eds.), *La evaluación de sustentabilidad de sistemas agroecológicos en Latinoamérica: la aplicación del MESMIS a seis estudios de caso*. Mundiprensa-GIRA, México D.F. (en proceso)
- 5) Barbier E. 2004. Explaining agricultural land expansion and deforestation in developing countries. *Amer. J. Agr. Econ.* (5) **86**: 1347-1353.
- 6) Barbier E. and J. Burgess. 2001. The economics of tropical deforestation. *Journal of Economics Surveys* (3) **15**: 413-433
- 7) Brown S., O. Masera and J. Sathaye. 2000, Project-based activities, En: R. Watson, I. Noble y D. Verardo (eds.), *Land Use, Land-Use Change, and Forestry; Special Report to the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 283–338.
- 8) Brown S., J. Sathaye, M. Cannel and P.E. Kauppi. 1996. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. *Commonwealth Forestry Review* **75**.
- 9) Caballero J., N. Barrera y C. Mapes. 1992. La Vegetación Terrestre. En *Plan Páztcuaro 2000*. 1a Ed., pp 71-90. México, D. F. Friedrich Ebert Stiftung.
- 10) Caro R. 1987. “Caracterización de la Industria Maderable en el Área de Influencia de la UAF 6: Meseta Tarasca”. Tesis. Morelia, México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

- 11) Coleman K. and D.S. Jenkinson. 1995. RothC-26 3. A model for the turnover of carbon in soil. *In* D.S. Powlson, P. Smith & J.U. Smith, eds. *Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets*, pp. 237-246. NATO ASI Series I, Vol. 38. Heidelberg, Germany, Springer-Verlag.
- 12) Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2006. México Forestal: Comunicación ambiental para una sociedad sostenible. Revista electrónica de la CONAFOR. No. 43.G
- 13) Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2006. México Forestal: ¿Cómo nos preparamos para reforestar?. Revista electrónica de la CONAFOR. No. 12
- 14) Cook A. G., A.C. Janetos and W.T. Hinds. 1990. Global effects of tropical deforestation: towards an integrated perspective. **Environmental Conservation** **17**: 201–212.
- 15) De Jong B. H. J., L. Soto-Pinto, G. Montoya-Gómez, K. Nelson, J. Taylor, and R. Tipper. 1996. Forestry and agroforestry alternatives for carbon sequestration: an analysis from Chiapas, Mexico. *Draft Proceedings of the Workshop on "Instruments for Global Warming Mitigation: The Role of Agriculture and Forestry"*, Trento, Italy, 22 - 25 May, 1996. p 147-159.
- 16) 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 the 1970s and 1990s in the central highlands of Chiapas, México. **Environmental Management** **23**(3): 373-385.
- 17) De Jong, B. H. J. 2000. Forestry for Mitigating the Greenhouse Effect: An ecological and economic assessment of the potential of land use to mitigate CO₂ emissions in the Highlands of Chiapas, México. PhD Dissertation. Wageningen University, 220 pp.
- 18) De Jong B. H. J. 2000. Uncertainties in estimating the potential for carbon mitigation of forest management. **Forest Ecology and Management** **154**: 85-104.
- 19) De Jong B. H. J., O. Masera, M. Olgún and R. Martínez. Greenhouse gas mitigation potential of combining forest management and bioenergy substitution: A case study from Central Highlands of Michoacán, Mexico **Forest Ecology and Management, (aceptado)**.
- 20) De Jong B. H. J., S. Ochoa-Gaona, M. A. Castillo-Santiago, N. Ramírez-Marcial and M. A. Cairns. 2000a. Carbon Flux and Patterns of Land-Use/Land-Cover Change in the Selva Lacandona, Mexico. **AMBIO** **29**(8): 504 – 511.

- 21) De Jong B. H. J., R. Tipper and G. Montoya-Gómez. 2000b. An economic analysis of the potential for carbon sequestration by forest: evidence from Southern Mexico. **Ecological Economics** (2) **32**: 313 – 327.
- 22) De Jong, B. H. J., S. Ochoa Gaona, S. Quechulpa Montalvo, E. Esquivel Bazán, and N. Pérez Hernández. 2004. Economics of agroforestry carbon sequestration: a case study from southern Mexico, pp. 123–138. In: J.R.R. Alavalapati and D.E. Mercer (eds.). *Valuing Agroforestry Systems*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- 23) De Jong B. H. J., Omar Maserá, Marcela Olguín, René Martínez 2007. Greenhouse gas mitigation potential of combining forest management and bioenergy substitution: A case study from Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management* 242: 398–411
- 24) Dewar R. C. 1991. An analytical model of carbon storage in the trees. **Tree Physiol.** **8**, pp. 239–258.
- 25) Dixon R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Salomon, M. C. Trexler and J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science** **263**: 185 -190
- 26) Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). 2001. *Forest Resources Assessment 2000: Main Report*. FAO Forestry Paper 140. Rome.
- 27) FAO. 2005. *Global Forest Resources Assessment 2005. Progress towards sustainable forest management*. FAO Forestry Paper 147. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2005. 33 pp.
- 28) FAO/UNEP. 1999. *Terminology for Integrated Resources Planning and Management*. Food and Agriculture Organization/United Nations Environmental Programme, Rome, Italy and Nairobi, Kenya.
- 29) Geist H. and E. Lambin. 2001. What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence. *LUCC Report Series No. 4*. Ciaco Printshop, Belgium.
- 30) Glick P. 1997. *Global Warming: The high costs of inaction*. Sierra Club Understanding green markets project. <http://mitchell.sierraclub.org/>.
- 31) Grace J., J. Lloyd, J. McIntyre, A. C. Miranda, P. Meir, H. S. Miranda, C. Nobre, J. Moncrieff, J. Massheder, Y. Malhi, I. Wright and J. Gash. 1995. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia, 1992 to 1993. **Science** **270**.
- 32) Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 2000. *Resumen para responsables de políticas, Escenarios de emisiones. Informe*

especial del Grupo de trabajo III del IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 27 pp.

- 33)Guerrero G. 2003. Modelación de líneas base de deforestación utilizando GEOMOD para la región Purépecha. En: *Finalización de Líneas Base para Proyectos de deforestación evitada*. Reporte elaborado para la agencia de los estados unidos para el desarrollo internacional. Apéndice 2.
- 34)Goodale C. L., M. J. Apps and R. A. Birdsey. (2002) Forest carbon sinks in the northern hemisphere. **Ecological Applications** **12**, 891–899.
- 35)GCCIP. 1997. Global Climate Change Information Programme. <http://www.doc.mmu.ac.uk/>
- 36)Houghton J. T., B. A. Callander and S.K. Varney. 1992. Climate Change 1992: The Supplemental Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. pp. 200.
- 37)Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) . 1991. XI Censo general de población y vivienda.
- 38)INE. 2006.
- 39)Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1992. Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. Melbourne, Australia.
- 40)IPCC. 2000. Escenarios de emisiones. Resumen para responsables de políticas. Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC. <http://www.grida.no/climate/ipcc/spmpdf/sres-s.pdf>
- 41)IPCC. 2001a. Climate Change 2001: Mitigación. Resumen para responsables de políticas. Resúmenes del Grupo de Trabajo III. http://grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/spanish/pdf/wg3sum.pdf
- 42)IPCC. 2001b. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press. Melbourne, Australia.
- 43)Izurralde R. C., W. B. McGill, D. C. Jans-Hammermeister, K. L. Haugen-Kozyra, R. F. Grant and J. C. Hiley. 1996. Development of a technique to calculate carbon fluxes in agricultural soils at the ecodistrict level using simulation models and various aggregation techniques. Final report. Agriculture and Agri-Food Canada Greenhouse Gas Initiative. Edmonton, Canada, University of Alberta. 67 pp.
- 44)Jaramillo V.J. 1994. El cambio global: interacciones de la biota y la atmósfera. **Ciencias** **35**: 4-14.

- 45) Karjalainen T. 1996. Dynamics and potentials of carbon sequestration in managed stands and wood products in Finland under changing climatic conditions. **For. Ecol. Manage.** **80**, 113–132.
- 46) Kauppi P.E., K. Mielkainen, and K. Kuusela. 1992: Biomass and carbon budget of European forests, 1971-1990. **Science** **256**, 70-74.
- 47) Kirschbaum M.U.F., M. Küppers, H. Schneider, C. Giersch and S. Noe. 1998. Modeling photosynthesis in fluctuating light with inclusion of stomatal conductance, biochemical activation and pools of key photosynthetic parameters. **Planta** **204**, 16–26.
- 48) Li C., S. Frolking, G. J. Crocker, P. R. Grace, J. Klír, M. Körschens and P. R. Poulton. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the CNDC model. In P. Smith, D.S. Powlson, J.U. Smith & E.T. Elliot, eds. Evaluation and comparison of soil organic matter models. **Special issue of Geoderma**, (81) **1-2**.
- 49) Latif M., T. P. Barnett, M. A. Cane, M. Flügel, N. E. Graham, H. von Storch, J.-S. Xu, and S. E. Zebiak, 1994: A review of ENSO prediction studies. **Climate Dynamics** **9**, 167-179.
- 50) Lugo A. y S. Brown. 1992. Tropical forests as sinks of atmospheric carbon. **Forest Ecology and Management** **48**.
- 51) 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.
- 52) Martino D. L. 2001. Secuestro de carbono atmosférico: ¿un nuevo ingreso para los agricultores del Cono Sur? INIA, La Estancuela. En: Díaz Rossello (Ed.) Siembra directa en el cono sur. PROCISUR. Montevideo. 55 – 66 pp.
- 53) Maser, O. R., M. J. Ordóñez, y R. Dirzo. 1992. "Emisiones de Carbono a partir de la Deforestación en México". **Ciencia** **43**, 151-154. Número Especial "Reunión Continental sobre Cambio Global"
- 54) Maser O. R. 1995. Carbon Mitigation Scenarios for Mexican Forest: Methodological Considerations and Results. **Interciencia** (20) **6**, 388-395.
- 55) Maser O. R., M. R. Bellon and G. Segura. 1995a. Forest Management Options for Sequestering Carbon in Mexico. **Biomass and Bioenergy** (8) **5**, 357-367.
- 56) Maser O. R., M. J. Ordóñez and A. Guzman. 1995b. Chapter 5. Land use change and forestry. In: C. Gay, L.G. Ruíz-Suarez, M. Imaz, and J. Martínez (eds.) Preliminary national inventory of greenhouse gas: Mexico. September,

1995. Secretaria del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Mexico City. Updated March, 1997 by table: Summary Report for National Greenhouse Gas Inventory, J. Martinez. P. 56 – 100.
- 57) Masera O. R., M. J. Ordóñez and R. Dirzo. 1997. Carbon Emissions from Mexican Forest: Current Situation and Long-Term Scenarios. **Clim. Change** **35**, 265 – 295.
- 58) Masera O. R., J.F. Garza-Caligaris, M. Kanninen, T. Karjalainen, G.J. Nabuurs, A. Pussinen, B.J. de Jong, and F Mohren, 2003. Modeling Carbon Sequestration in Afforestation and Forest Management Projects: The CO2FIX V.2 Approach. **En prensa en Ecological Modelling** (ISI, FI: 0.85).
- 59) Masera O. R. y C. Sheinbaum. 2004. Mitigación de emisiones de carbono y prioridades de desarrollo nacional. En Martínez J. y A. Fernández (Comp.), Cambio climático: una visión desde México. INE-SEMARNAT. México D. F. 496 p.
- 60) Mery G. and M. Kanninen. 1999. Forest plantations and carbon sequestration in Chile. In: Palo, M. (Ed.), Forest Transitions and Carbon Fluxes, Global Scenarios and Policies. World Development Studies 15. United Nations University, World Institute for Development Economy Research (UNU/WIDER), Helsinki, pp. 74–100.
- 61) Morhen G.M.J. 1987. Simulation of forest growth, applied to Douglas-fir stands in The Netherlands. Wageningen Agricultural University, Wageningen, 184 pp.
- 62) Morhen G.M.J., J.F. Garza, O. Masera and 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 pp.
- 63) Moura Costa, P., M. Stuart, M. Pinard and G. Phillips. 2000. Elements of a certification system for forestry-based carbon offset projects. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change** **5**, 39–50.
- 64) Olvera, R. L. 1992. El guacamole una nueva opción: el oro verde en el umbral de un nuevo auge, Hortalizas, Frutas y Flores, México, pp.13-16.
- 65) Ordóñez, J.A.B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. INE-SEMARNAP. México, D.F.
- 66) Ordóñez, J.A.B. 2003. Emisiones y Captura de Carbono Derivadas de la Dinámica de Cambio en el Uso del Suelo en los Bosques de la Región Purépecha, Michoacán, México. Documento que para obtener la Candidatura

- a Doctor en Ciencias Biomédicas Presenta. Instituto de Ecología, UNAM. México. 24p.
- 67) Peng Ch. 2000. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. **Forest Ecology and Management 132**: 259-279.
- 68) Ponce-Hernandez R. 2004. Assessing carbon stocks and modelling win-win scenarios of carbon sequestration through land-use changes. Modelling Win-Win Scenarios of Carbon Sequestration Through Land-Use Changes. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome
- 69) Powlson, D. S., P. Smith and J. U. Smith. (eds.) 1996. Evaluation of soil organic matter models using existing, long-term datasets. NATO ASI Series I Vol. 38. Berlin, Springer-Verlag. 429 pp.
- 70) Romahn de la Vega C. F. 1984. Principales productos forestales no maderables de México. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. México. 561 p.
- 71) Sargent, N.E., 1988. Redistribution of the Canadian boreal forest under a warmed climate, **Climatological Bulletin 22**(3), pp. 23-34.
- 72) Schlamadinger B., L. Ciccarese, M. Dutschke, P. Feamside, S. Brown and D. Murdiyarso. 2005. Should we include avoidance of deforestation in the international response to climate change?. In: Murdiyarso D. and Herawati H. (Eds.). *Carbon Forestry: who will benefit?*. CIFOR, Indonesia, pp. 26-41.
- 73) Schlamadinger B. and G. Marland. 1996. The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle. **Biomass and Bioenergy 10**, pp. 275–300.
- 74) Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGAR), (2000). Centro de Estadísticas Agropecuarias. México.
- 75) Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1994. Inventario Forestal Nacional Periódico, México 94, Memoria Nacional Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre, México, 81 pp.
- 76) Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). 1998. *México ante el cambio climático*. Noviembre. 40 pp.
- 77) Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 1999. Nuevo San Juan, Parangaricutiro Michoacán. Regiones especiales. *Reportaje de Regiones*. México.
www.semarnat.gob.mx/regiones/nuevo-san-juan/generalidades.shtml

- 78) SEMARNAT. 2003. Comité Mexicano para proyectos de mitigación y captura de gases de efecto invernadero.
www.energia.gob.mx/work/resources/LocalContent/1815/1/mdl_semarnat.pdf
- 79) Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente (SUMA). 2006. Programa de Desarrollo Urbano del Estado de Michoacán de Ocampo. Diagnóstico. SUMA Morelia, Michoacán. Pp. 160.
- 80) Sedjo R. 1992. Temperate Forest Ecosystems in the Global Carbon Cycle. **Ambio**. **24**.
- 81) Sheinbaum C. and O. R. Masera. 2000. Mitigating Carbon Emissions While Advancing National Development Priorities: The Case of Mexico. **Climatic Change** **47**: 259-282.
- 82) Smith P., J. U. Smith, D. S. Powlson, W. B. McGill, J. R. M. Arah, O. G. Chertov, K. Coleman, U. Franko, S. Frolking, D. S. Jenkinson, L. S. Jensen, R. H. Kelly, H. Klein-Gunnewiek, A. Komarov, C. Li, J. A. E. Molina, T. Mueller, W. J. Parton, J. H. M. Thornley and A. P. Whitmore. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using seven long-term experimental datasets. *In* P. Smith, D.S. Powlson, J.U. Smith & E.T. Elliott, eds. Evaluation and comparison of soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. **Geoderma**, **81**: 153-225.
- 83) Sundquist E. T. 1993. The global carbon dioxide budget. **Science** **259**: 934-941.
- 84) Téllez K. L. 1994. La modernización del sector Agropecuario y Forestal, *Fondo de Cultura Económica*. México.
- 85) Toledo V. M. 1989. Bio-economic costs of transforming tropical forest to pastures in Latinamerica. En: S. Hecht (editor). *Cattle ranching and tropical deforestation in Latinamerica*, Westview Press, Boulder Colorado.
- 86) UNEP. 2007. Global Outlook for Ice and Snow report. United Nations Environment Programme. Pp 140.
- 87) Watson R. T., I. R. Noble, B. Bolin, N. H. Ravindranath, D. J. Verardo, and D. J. Dokken (eds.) 2000. Land use, land-use change and forestry: A special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 377 pp.
- 88) White A., M.G.R. Cannell and A. Friend. 2000. CO2 stabilization, climate change and terrestrial carbon sink. **Global Change Biol.** **6**, pp. 817–833.