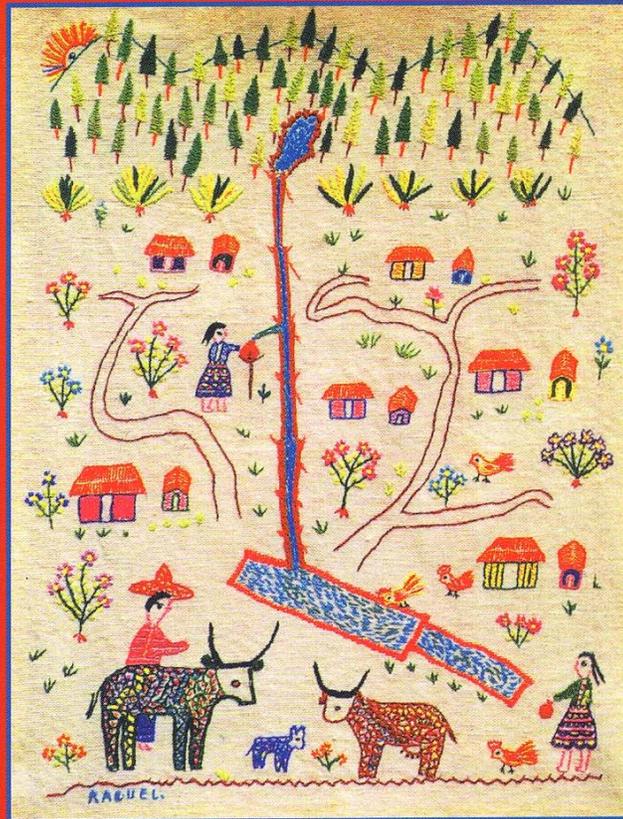


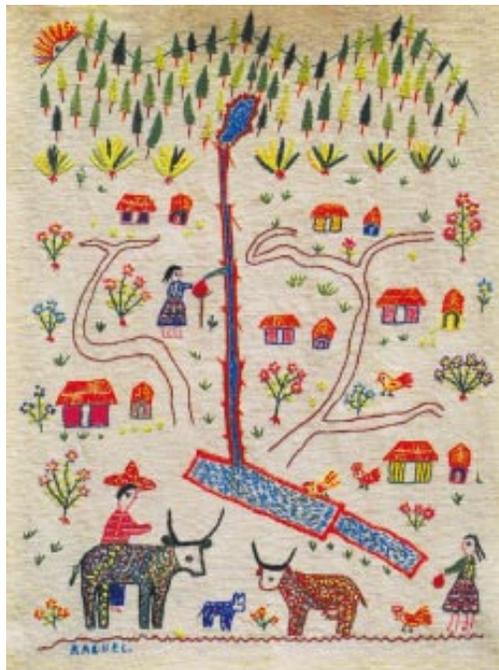
Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán



José A. Benjamín Ordóñez Díaz



Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán



José A. Benjamín Ordóñez Díaz

Julia Carabias Lillo
Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca

Enrique Provencio
Presidente del Instituto Nacional de Ecología

Francisco Giner de los Ríos
Director General de Regulación Ambiental-INE

Carlos Gay García
Asesor Científico de Cambio Climático
Dirección General de Regulación Ambiental-INE

Julia Martínez
Directora de Cambio Climático
Dirección General de Regulación Ambiental-INE

Fedro Carlos Guillén
Jefe de la Unidad de Participación Social,
Enlace y Comunicación-INE

Coordinación editorial:
Raúl Marcó del Pont Lalli
Director de Publicaciones de la Unidad de Participación Social,
Enlace y Comunicación (UPSEC)-INE

Ilustración de la portada: INI, 1997. *Los bordados de Raquel*. México. (Ilustración pág. 81).

DR © 1999
Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP
Av. Revolución 1425. C.P. 01040 México, D.F.

Consulte nuestra página en Internet: www.ine.gob.mx

ISBN: 968-817-375-4

Primera edición: junio de 1999
Impreso y hecho en México / *Printed in Mexico*

Índice

<i>Presentación</i>	5
<i>I. Cambio climático global</i>	7
1.1. El efecto invernadero	7
1.2. Gases de invernadero	8
1.3. El cambio climático global: causas y consecuencias	9
1.4. El dióxido de carbono: principales fuentes y sumideros	10
1.4.1. Los bosques como reservorios de carbono	12
<i>II. Ciclo del carbono</i>	13
2.1. El carbono	13
2.2. El carbono en ecosistemas forestales	14
2.3. La captura unitaria de carbono	15
2.3.1. Carbono en vegetación (Cv)	16
2.3.2. Carbono en descomposición (Cd)	16
2.3.3. Carbono en el suelo (Cs)	16
2.3.4. Carbono en productos (Cp)	16
2.3.5. Carbono ahorrado por sustitución de combustibles fósiles (Cf)	17
<i>III. Emisiones y captura de carbono en México</i>	19
3.1. Emisiones totales de carbono en México	19
3.2. Emisiones del sector forestal	20
3.3. Potencial del sector forestal para la captura de carbono	22
3.3.1. Opción de mitigación de carbono	22
3.4. Potencial de mitigación al año 2030	24
3.4.1. Conservación	24
3.4.1.1. Áreas naturales protegidas	25
3.4.1.2. Manejo de bosques naturales	25
3.4.1.3. Uso de estufas mejoradas	25
3.4.2. Reforestación	26
3.4.2.1. Plantaciones de reforestación	26
3.4.2.2. Plantaciones industriales	26
3.4.2.3. Plantaciones energéticas	29
3.4.2.4. Agroforestería	29
3.4.3. Conclusiones	29
<i>IV. El modelo CO₂FIX</i>	31
4.1. Descripción general del modelo	31
4.2. Flujos y almacenes de carbono en el modelo CO ₂ FIX	31

4.3. Operación del modelo	33
4.3.1. Estimación dinámica de la captura de carbono	34
4.3.2. Registro de datos	34
4.3.3. Presentación de resultados	36
<i>V. Nuevo San Juan Parangaricutiro</i>	37
5.1. Descripción general del área de estudio	37
5.1.1. Geología	38
5.1.2. Edafología	38
5.1.3. Hidrología	38
5.1.4. Climatología	38
5.1.5. Temperatura	39
5.1.6. Vegetación	39
5.1.7. Uso del suelo	39
5.2. Manejo forestal	41
5.3. Sistema de manejo forestal	42
<i>VI. La captura de carbono en Nuevo San Juan Parangaricutiro</i>	43
6.1. Método	43
6.2. Sistema de manejo del bosque de NSJP	43
6.3. Distribución del aprovechamiento forestal por tipo de productos en NSJP	44
6.4. Selección de parámetros fisiológicos y de biomasa para el género <i>Pinus</i>	45
6.5. Tabla de incremento del género <i>Pinus</i>	47
6.5.1. Identificación de rodales y subrodales	47
6.5.2. Diseño de base de datos	47
6.5.3. Sistematización y almacenamiento de datos en formato digital	48
6.5.4. Procesamiento estadístico de datos	48
6.5.5. Modelo de regresión	49
6.6. Resultados	51
6.6.1. Escenarios alternativos	56
<i>VII. Discusión</i>	59
7.1. Observaciones generales	59
7.1.1. Captura de carbono en los ecosistemas forestales	59
7.1.2. Modelo de simulación CO ₂ FIX	59
7.1.3. Parámetros	60
7.2. Comparación de estimaciones de captura potencial de carbono con otros estudios	60
7.3. Comparación de escenarios alternativos de captura potencial	61
7.4. Análisis de sensibilidad	61
7.5. Contribución de este estudio al conocimiento de la captura de carbono	65

Presentación

El Cambio Climático es un tema que desde hace varias décadas ha formado parte de las investigaciones del medio científico. Los avances en su comprensión y las crecientes evidencias de sus potenciales implicaciones ambientales, sociales y económicas, a escala nacional, regional y global, ha hecho que los gobiernos del mundo lo incorporen en sus diferentes agendas en los últimos años.

Una de las manifestaciones del Cambio Climático es el calentamiento global, producido por el incremento en la concentración de diversos gases en la atmósfera, conocidos como de efecto invernadero, entre los que destacan: el bióxido de carbono (CO_2), el metano, el óxido nitroso, el ozono, el bióxido de azufre y los clorofluorocarbonos. De estos, el primero es el que predomina y sus concentraciones atmosféricas se han elevado en un 30%, desde 1860 (de 280 a 360 partes por millón). Las actividades humanas que desde la revolución industrial intensificaron el uso de combustibles fósiles —así como la destrucción de muchos sistemas ecológicos que aportan un equilibrio dinámico de gases en la atmósfera— ha hecho que la acumulación antes mencionada de bióxido de carbono alcance niveles que no se registraban en la Tropósfera desde hace 200,000 años.

El Instituto Nacional de Ecología INE-SEMARNAP, tiene a su cargo la planificación, asignación, seguimiento y evaluación de diversos proyectos para la elaboración de estrategias de mitigación y adaptación al Cambio Climático.

Un ejemplo importante de los proyectos arriba mencionados fue la elaboración del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de México —con cifras de 1990— que ha posibilitado la identificación y cuantificación de las principales fuentes y sumideros de gases en el país, lo cual es básico para la definición de cualquier política relacionada con el Cambio Climático.

En dicho inventario destacaron las emisiones de CO_2 a la atmósfera por el cambio de uso de suelo. Es por eso que en las investigaciones realizadas para dar

cumplimiento a los compromisos adquiridos en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se han buscado estrategias para contribuir a que diversos sectores nacionales estén preparados para la mitigación y adaptación de fenómenos climáticos. Una de las opciones de mitigación más importantes para México es la denominada “captura de carbono en el sector forestal”, ya que el manejo sustentable de los bosques con estrategias de aforestación y reforestación, capturan CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis durante el crecimiento de la biomasa vegetal. Lo anterior implica una disminución en las emisiones de CO₂, al evitar la deforestación.

En la actualidad, en el Instituto de Ecología de la UNAM, campus Morelia, y en El Colegio de la Frontera Sur se desarrollan proyectos de investigación que abordan esta problemática. En este contexto, el presente estudio — cuya primera versión fue elaborada como tesis de licenciatura de José Antonio Benjamín Ordoñez Díaz, bajo la dirección del Dr. Omar Maserá,* en la UNAM—, es un valioso aporte ya que contribuye con el análisis de la estimación de la captura potencial de carbono en un bosque templado, que se encuentra bajo manejo forestal por la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro en el Estado de Michoacán, México.

Este trabajo proporciona los lineamientos metodológicos básicos en la obtención de los parámetros cuantificables necesarios para evaluar las opciones de mitigación potencial en el sector forestal en el corto, mediano y largo plazo. Asimismo, complementa con más detalle los cálculos de emisiones y captura potencial en diversos ecosistemas boscosos, a escalas regional y nacional.

El análisis metodológico realizado representa una aportación de México para los estudios de investigación a nivel mundial, que se tomarán en cuenta en la elaboración del Informe Especial del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, sobre cambio de uso de suelo y bosques, el cual será presentado a la Convención Marco de las Naciones Unidas en el año 2000.

* Los revisores de la tesis fueron el M. en C. Ben Jong, de ECOSUR, y los doctores Víctor Jaramillo, Carlos Gay y Alfredo Cuarón, de la UNAM.

I

CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

1.1. EL EFECTO INVERNADERO

Nuestro planeta está rodeado por una delgada capa de gases denominada atmósfera, compuesta por nitrógeno (78.3%), oxígeno (21.0%), argón (0.3%), dióxido de carbono (0.03%) y otros gases en cantidades menores como helio, neón y xenón. Además contiene aerosoles (partículas) en cantidades variables, dependiendo de su origen y concentración, y vapor de agua en concentraciones fluctuantes. Este último es responsable de gran parte de los fenómenos meteorológicos (Salati, 1990).

El efecto invernadero (figura 1.1) se debe a que ciertos gases en la atmósfera permiten que la mayor parte de la radiación solar incidente penetre hasta la superficie del planeta, mientras que se absorbe y reemite parte de la radiación infrarroja que el planeta regresa al espacio exterior. Cuanto mayor es la concentración de los gases de invernadero, menor es la cantidad de radiación infrarroja que el planeta emite libremente al espacio exterior. De esta manera, al aumentar la concentración de gases de invernadero, se incrementa la cantidad de calor atrapado en la atmósfera, dando origen a que se eleve la temperatura superficial del planeta.

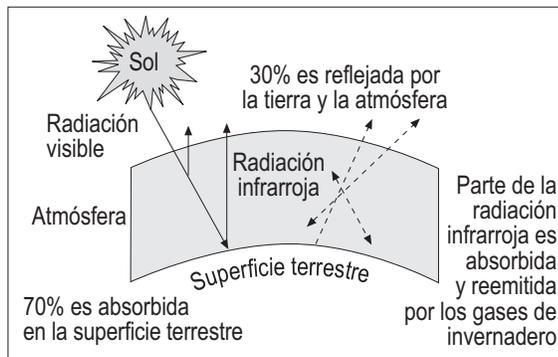


Figura 1.1. Efecto invernadero.

De la radiación solar que incide en nuestro planeta, la atmósfera y la superficie terrestre absorben un 70% (parte izquierda del diagrama). La radiación absorbida se refleja en forma de luz infrarroja (parte derecha del diagrama). Los gases de invernadero absorben y reemiten en varias ocasiones esta radiación, dando lugar a un calentamiento de la superficie del planeta 33°C mayor que el que resultaría de escapar libremente la radiación al espacio exterior (Modificado de Masera, 1991).

De mantenerse constantes las concentraciones de los gases de invernadero, la temperatura de la superficie terrestre estaría en equilibrio. Sin embargo, el desarrollo de las actividades humanas ha provocado un desequilibrio al incrementar en unas cuantas décadas las emisiones de componentes como el dióxido de carbono (CO_2), los clorofluorocarbonos (CFC) y otros gases de invernadero.

1.2. GASES DE INVERNADERO

Como ya se mencionó, el clima de la Tierra está dado por el balance radiactivo de la atmósfera, el cual depende, a su vez, de la entrada de energía en forma de radiación solar, su actividad radiactiva, la abundancia de gases de efecto invernadero en la atmósfera, nubes y aerosoles (IPCC, 1992).

Diferentes autores (Schneider, 1989; Houghton y Woodwell, 1989; Goudie, 1990; Dixon *et al.*, 1994; Masera, 1995) afirman que el dióxido de carbono (CO_2) es el principal gas de efecto invernadero. Otros gases con concentraciones menores producen el mismo efecto, tales como metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorocarbonos (CFC) y ozono (O_3).

Desde la revolución industrial, la concentración de gases de efecto invernadero se ha incrementado rápidamente, sobre todo como resultado de las actividades humanas. Muchos de estos gases tienen tiempos de vida (residencia atmosférica) que van desde décadas hasta centenares de años, por lo que los cambios en las concentraciones de la atmósfera responden lentamente como respuesta a los que se dan en las tasas de emisión (Goudie, 1990; IPCC, 1990).

La concentración de 353,000 ppb¹ del dióxido de carbono (CO_2) en 1990, resultó 25% mayor que en la etapa preindustrial (1750-1800), cuyo valor era de alrededor de 280,000 ppb, y por arriba, a su vez, de cualquier periodo durante los últimos 160,000 años (Goudie, 1990; Masera, 1991).

En el cuadro 1.1. se proporciona información sobre los principales gases de invernadero, la fuente antropogénica que los genera, la concentración actual estimada en el planeta, la concentración que alcanzó en la era preindustrial y su tiempo de residencia en la atmósfera.

¹ Ppb (partes por billón) equivale a una parte por mil millones (10^9 de partes).

Cuadro 1.1. Características de los principales gases de invernadero según Goudie, 1990

Gas	Fuentes antropogénicas	Concentración (ppb)*		Incremento anual de la concentración	Tiempo de residencia en la atmósfera (años)
		Preindustrial	Actual		
CO ₂	Uso de combustibles fósiles y leña, deforestación	275,000	353,000	0.5%	50-200
CH ₄	Cultivo de arroz, ganado, tiraderos de basura, uso de combustibles fósiles	800	1,720	0.9%	10
NO _x	Fertilizantes químicos, deforestación, uso de leña	285	310	0.2%	150-180
CFC	Aerosoles, refrigerantes, aislantes	0	3	5%	65-130

* Partes por billón.

1.3. EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL: CAUSAS Y CONSECUENCIAS

Se define al cambio climático como el posible aumento en la temperatura superficial del planeta que se produciría como consecuencia de un aumento importante y rápido de las concentraciones de gases de invernadero en la atmósfera (IPCC, 1995). La causa fundamental de este incremento es la emisión de estos gases provocados por actividades humanas (antropogénicas) que alteran la composición original de la atmósfera. En el cuadro 1.2. se resumen por sector las actividades que destacan como principales aportadoras de gases de efecto invernadero (CO₂, N₂O, CFC, CH₄).

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 1995) estima que un cambio de las emisiones de gases de efecto invernadero que duplique las concentraciones de CO₂ con respecto al nivel preindustrial daría como resultado un incremento de temperatura de 1.5 a 3.5 °C. Este cambio de temperatura provocaría, a su vez:

i) cambios en los patrones mundiales de precipitación pluvial, con diferencias regionales significativas.

ii) elevación del nivel del mar de 0.2 a 0.6 metros, tanto por la expansión térmica de los océanos como por el derretimiento parcial de glaciares en las montañas y de la capa de hielo en las regiones polares, como el caso de la Antártica, para la que se estima un desprendimiento de 200 km de masas de hielo.

Cuadro 1.2. Actividades por sector industrial que contribuyen a la emisión de gases de invernadero (según Ahuja, 1990)

Actividad	Gas emitido
Sector energético	
Producción de carbón	CH ₄
Combustión de carbón	CO, CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Combustión de petróleo	CO, CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Combustión de gas	CO, CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Ventilación y fugas de gas	CH ₄
Sector agrícola, ganadero y forestal	
Ganadería intensiva	CH ₄
Cultivos de arroz	CH ₄
Uso de fertilizantes	N ₂ O
Combustión de biomasa	CO, CO ₂ , N ₂ O
Desforestación y cambio de uso del suelo	CO ₂ , N ₂ O
Sector industrial	
Producción de cemento, metalurgia	CO ₂
Uso de CFC	CFC
Relleno sanitario y otros procesos industriales	CH ₄

iii) cambios en la humedad del suelo al aumentar la evaporación del agua.

Estos tres factores afectarían directamente todas aquellas actividades humanas que dependen de la precipitación, la temperatura, la humedad y de los cuerpos de agua. El producto de esta alteración sería equivalente a desplazar una región cualquiera en 200 km de latitud, lo que provocaría, por ejemplo, la migración de las comunidades de las zonas costeras al interior de los continentes y cambios en el uso del suelo, entre otros factores, con las consiguientes crisis de tipo social, económico y político (modificado de Masera, 1995d).

1.4. EL DIÓXIDO DE CARBONO: PRINCIPALES FUENTES Y SUMIDEROS

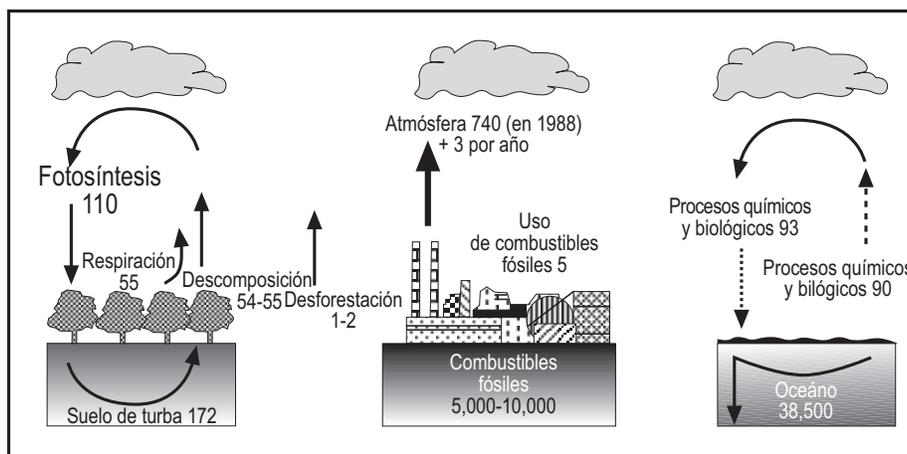
Se estima que el dióxido de carbono (CO₂) es el responsable del 71.5% del efecto invernadero (Lashof y Ahuja, 1990). Por esta razón, en lo que resta del trabajo se centrará la atención en este gas.

El uso de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo son considerados a nivel mundial como las dos principales fuentes netas de CO₂ a la atmósfera relacionadas con el cambio climático global (Mintzer, 1992).

La emisión entre 1989 y 1990 de CO_2 proveniente del uso de combustibles fósiles se estimó en $6.0 \pm 0.5 \text{ GtC}$ ($1 \text{ Gt} = 10^9 \text{ t}$), comparada con $5.7 \pm 0.5 \text{ GtC}$ emitidas en 1987 (IPCC, 1990). Por otro lado, el flujo neto de CO_2 emitido por cambio en el uso del suelo (principalmente por deforestación), se ha estimado en $1.6 \pm 1.0 \text{ GtC}$ para la década de los 80 (IPCC, 1992).

El ciclo global del carbono es complejo. En la figura 1.2. podemos observar el intercambio de carbono que se da entre la atmósfera y la biosfera; donde se aprecian los ciclos existentes (uno sobre tierra firme —representado por la vegetación— y otro sobre los océanos).

Figura 1.2. Principales fuentes y sumideros de carbono



Las unidades de esta figura están en GtC; modificada de Bolin *et al.*, 1986.

Los bosques, a través de sus procesos fisiológicos tales como la fotosíntesis, absorben 110 Gt Caño^{-1} , mientras que mediante la respiración emiten 55 Gt Caño^{-1} y por medio de la descomposición² emiten de 54 a 55 Gt Caño^{-1} . El suelo, el detritus y la turba almacenan 172 GtC aproximadamente. Los océanos absorben aproximadamente 93 Gt Caño^{-1} y emiten por procesos químicos y biológicos cerca de 90 Gt Caño^{-1} , además de que se considera que conservan grandes cantidades de carbono (38,500 GtC). Estos dos ciclos eliminan de la atmósfera casi tanto

² La descomposición y la respiración son los dos emisores naturales de los bosques. Sus emisiones suman un total aproximado de 110 GtC año^{-1} , por lo que en ausencia de deforestación hay un balance entre el carbono emitido y el capturado.

carbono como el que le aportan de forma natural; pero actividades humanas como la deforestación y la quema de combustibles fósiles están provocando un aumento en la cantidad de carbono atmosférico en unos 3 Gt Caño⁻¹ (Bolin *et al.*, 1986).

1.4.1. LOS BOSQUES COMO RESERVORIOS DE CARBONO

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

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

Actualmente la deforestación y la degradación forestal son factores importantes para el cambio climático global, puesto que producen emisiones netas de dióxido de carbono. Además generan grandes problemas locales y regionales, como el incremento de la erosión y el abatimiento de los mantos acuíferos, entre otros. Sin embargo, se ha estimado que, combinando estrategias de conservación forestal con proyectos de reforestación en todo el mundo, los bosques podrían resultar en un sumidero neto de carbono durante los próximos cien años, permitiendo reducir de 20 a 50% de las emisiones netas de dióxido de carbono a la atmósfera (IPCC, 1995).

Por lo anterior, es necesario conservar los bosques y manejarlos adecuadamente, y comenzar a reforestar en zonas altamente degradadas, permitiendo una regeneración de la cobertura vegetal acorde al tipo de suelo, fisonomía del terreno y cercanía de cuerpos de agua, e integrando este proceso en todo momento a las actividades agrícolas y pecuarias de una región determinada.

II

CICLO DEL CARBONO

2.1. EL CARBONO

En la naturaleza el carbono se halla por doquier: en el agua bajo la forma de compuestos carbónicos disueltos (los carbonatos), y en el aire como dióxido de carbono o anhídrido carbónico. Todos los organismos vivos están constituidos por compuestos de carbono, que obtienen como resultado de sus procesos metabólicos realizados durante su crecimiento y desarrollo, y que son liberados cuando éstos mueren. Aproximadamente, el 50% del peso seco de cualquier organismo lo constituye este elemento, por lo que es uno de los más importantes de la vida (Smith *et al.*, 1993b).

El ciclo del carbono (figura 2.1) comienza con la fijación del anhídrido carbónico atmosférico a través de los procesos de la fotosíntesis, realizada por las plantas y ciertos microorganismos. En este proceso, el anhídrido carbónico y el agua reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno en forma simultánea, que pasa a la atmósfera. Parte del carbohidrato se consume directamente para suministrar energía a la planta, y el anhídrido carbónico así formado se libera a través de sus hojas o de sus raíces. Otra parte es consumida por los animales, que también respiran y liberan anhídrido carbónico. Las plantas y los animales mueren y son finalmente descompuestos por microorganismos del suelo, lo que da como resultado que el carbono de sus tejidos se oxide en anhídrido carbónico y regrese a la atmósfera (Schimel, 1995; Smith *et al.*, 1993a).

La fijación de carbono por bacterias y animales es otra manera de disminuir la cantidad de bióxido de carbono, aunque cuantitativamente menos importante que la fijación de carbono por las plantas.

Cuando los organismos vegetales son comprimidos por depositación, no son atacados por las bacterias, sino que sufren una serie de cambios químicos para

formar turba, luego carbón pardo o lignita, y finalmente carbón. Los cuerpos de algunos organismos marinos pueden sufrir cambios semejantes y formar, en un largo periodo, petróleo. Estos fenómenos significan la sustracción de parte del carbono al ciclo, pero más tarde los trastornos geológicos o las obras de minería o perforación realizadas por el hombre llevan a la superficie el carbón o el petró-

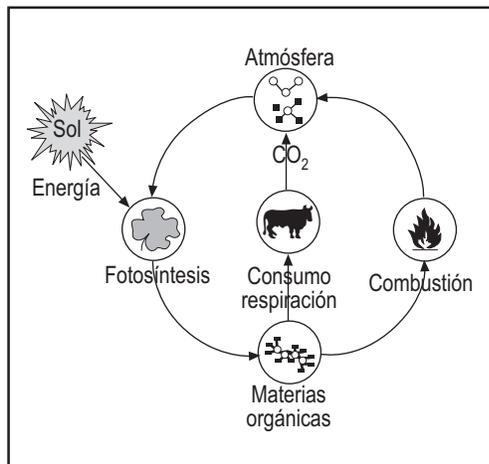


Figura 2.1. El ciclo del carbono.

Las plantas verdes absorben el CO_2 del aire. Con ayuda de energía luminosa del sol (fotosintetizan) y junto con el agua y las sales procedentes de la tierra, lo transforman en sustancias orgánicas más ricas en energía que su propia materia orgánica. Los animales se alimentan de vegetales y los degradan; al respirar consumen O_2 y emiten el CO_2 . Al quemarse, el carbón, la leña, el petróleo y la gasolina producen CO_2 . El carbono realiza en la naturaleza un ciclo ininterrumpido utilizando tan sólo la energía luminosa.

leo, que será quemado hasta convertirlo en CO_2 , volviendo en esta forma al ciclo inicial.

La mayor parte del carbono de la Tierra se encuentra en rocas bajo la forma de carbonatos, como la piedra caliza y el mármol. Las rocas se gastan poco a poco y con el tiempo los carbonatos vuelven al ciclo del carbono. Sin embargo, en el fondo del mar se forman otras rocas a partir de los sedimentos de animales y plantas muertas, de modo que la cantidad de carbono en el ciclo permanece casi constante (Sampson *et al.*, 1993).

2.2. EL CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES

El CO_2 atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. Este CO_2 participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y tronco). Al crecer, éste incrementa su follaje, ramas, flores, frutos y yemas de crecimiento (que en su conjunto conforman la copa) así como su altura y el grosor de su

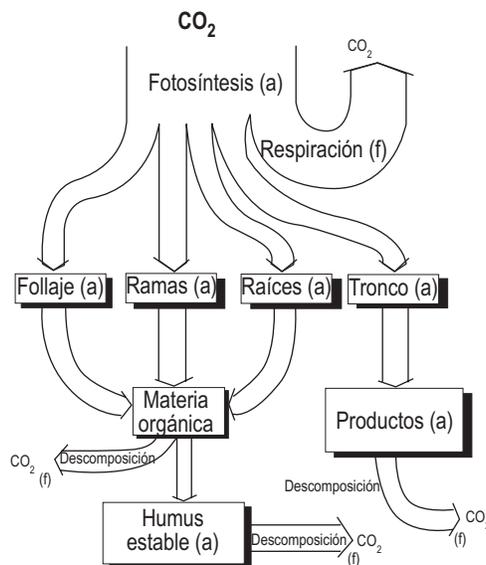
tronco. La copa necesita espacio para recibir energía solar sobre las hojas, lo que da lugar a que las copas de los árboles compitan por esta energía. Esto origina, a su vez, un dosel cerrado. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable, éste, a su vez, aporta nuevamente CO_2 al entorno.

Simultáneamente, los troncos al ir aumentando su diámetro y altura alcanzarán un tamaño aprovechable en términos comerciales, pudiéndose extraer productos como tablas, tablones y polines, que darán origen a subproductos elaborados, como muebles y casas. Estos productos finales tienen un tiempo de vida determinado, después del cual se degradan aportando CO_2 al suelo y/o a la atmósfera.

Durante el tiempo en que el CO_2 se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol —y hasta que es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera—, se considera almacenado. En el momento de su liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica y/o por la quema de la biomasa) el CO_2 fluye para regresar al ciclo del carbono.

La figura 2.2. representa los flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal, donde el follaje, las ramas, las raíces, el tronco, los desechos, los productos y el humus estable son almacenes de carbono, que se reincorporarán al ciclo por descomposición y/o quema de la biomasa forestal.

Figura 2.2. Flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal (modificado de Nabuurs y Morhen, 1993)



2.3. LA CAPTURA UNITARIA DE CARBONO

Para definir la captura unitaria de carbono se estima el carbono contenido en diferentes almacenes (que pueden ser emitidos o ahorrados, según Masera, 1995). Estos almacenes incluyen: C_v = carbono contenido en la vegetación; C_d = carbono contenido en la materia orgánica en descomposición; C_s = carbono contenido en los suelos; C_p = carbono contenido en productos forestales (e.g., muebles,

papel) y C_f = carbono ahorrado por no utilizar combustibles fósiles (por ej., proyectos bioenergéticos).

2.3.1. CARBONO EN VEGETACIÓN (C_v)

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

2.3.2. CARBONO EN DESCOMPOSICIÓN (C_d)

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

2.3.3. CARBONO EN EL SUELO (C_s)

Es el carbono contenido en las capas que conforman el suelo forestal. Se origina por la fragmentación de la roca madre meteorizada por el establecimiento de un organismo vegetal que con el tiempo forma capas por depositación de materiales. Al irse acumulando éstas y compactando, almacenan una cierta cantidad de carbono, misma que aumentará por la continuidad del proceso de formación del suelo.

2.3.4. CARBONO EN PRODUCTOS (C_p)

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

2.3.5. CARBONO AHORRADO POR SUSTITUCIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES (CF)

Es una alternativa para capturar carbono sustituyendo combustibles fósiles por el uso de la biomasa forestal para la producción de energía.

La captura unitaria de carbono Ct parte de la siguiente ecuación:

$$Ct = Cv + Cd + Cs + Cp + Cf$$

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

$$Ct = \int (Cv + Cd + Cs + Cp) / T + \Sigma Cf$$

donde T = tiempo

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

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

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

$$Cnet = Ctp - Ctref$$

donde:

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

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

III

EMISIONES Y CAPTURA DE CARBONO EN MÉXICO

3.1. EMISIONES TOTALES DE CARBONO EN MÉXICO

México ocupa una superficie de 196,718,300 ha, que en 1994 se estima se distribuían como sigue: 14% eran pastizales, 13% terrenos agrícolas, 11% terrenos agropecuarios, 16% bosques, 13% selvas, 29% arbustos y matorrales, 2% vegetación de desiertos y dunas, y el restante 2% caía en la categoría de otros tipos (SARH, 1994).

En nuestro país los principales emisores de gases de efecto invernadero son el sector energía (por el uso de combustibles fósiles) con 83.8 MtC (Gay y Martínez,

1995); el cambio en el uso del suelo y la forestería con 30.2 MtC (Masera *et al.*, 1995 y 1997, estiman 52.3 MtC, sin restar las tC absorbidas por arbustos y matorrales, por lo que se considera en este estudio la primera estimación); y los procesos de la industria del cemento con 3.1 MtC (Gay y Martínez, 1995), lo que da un total de 117.1 MtC (cuadro 3.1). El IPCC (1995) estima que las emisiones de México contribuyen con el 1.45% de las emi-

**Cuadro 3.1. Emisiones de carbono (en MtC)
en México por sector para 1990
(modificado de Gay y Martínez, 1995)
Estimación alta**

Fuente	Emisiones	%
Sector energía. Emisión total (combustión + fugitiva)	83.8	71.5%
Industria del cemento	3.1	3.1%
Cambio en el uso del suelo y forestería	30.2	25.8%
Total	117.1	100%

siones totales de carbono que se dan anualmente en nuestro planeta.

3.2. EMISIONES DEL SECTOR FORESTAL

En México los bosques y selvas ocupan una superficie¹ de 56,851,500 ha (cuadro 3.2). Adicionalmente, existen 57,638,400 ha de vegetación semiárida (a veces considerada como bosques “abiertos”), 22,425,800 ha de áreas forestales perturbadas y 3,147,400 ha de vegetación hidrófila y halófila (SARH, 1994).

Cuadro 3.2. Principales usos del suelo en México (SARH, 1994)

Uso del suelo	Porcentaje (%)	Superficie (ha)
Pastizales	14.2	27,933,900
Terrenos agrícolas	12.7	24,983,200
Terrenos agropecuarios	11.4	22,425,800
Bosques	15.5	30,491,300
Selvas	13.4	26,360,200
Arbustos y matorrales	29.3	57,638,400
Vegetación de desierto y dunas	1.6	3,147,400
Otros	1.9	3,737,600

La deforestación y la degradación del recurso forestal han sido muy importantes en las últimas décadas. La tasa de deforestación no se conoce con precisión pero oscila entre 370 y 670 mil ha año⁻¹ para principios de los 90, (sólo en bosques templados y selvas). Masera *et al.* (1997) afirman que probablemente la tasa más alta sea la correcta. De acuerdo con esta última estimación, la tasa de deforestación para los bosques templados resulta de 1% y para las selvas de 2% al año (Masera, *et al.*, 1995a).

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

Las causas de mayor impacto en la deforestación son el cambio en el uso del suelo, la conversión a praderas y a cultivos agrícolas, los incendios forestales y la tala irracional, entre otros. Estos factores varían en importancia según el tipo de ecosistema (cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Cambios en el uso del suelo (Masera *et al.*, 1995a)

Actividad	Bosque de pino		Bosque de encino		Selva alta		Selva Baja		Total	
	Miles de ha	%	Miles de ha	%	Miles de ha	%	Miles de ha	%	Miles de ha	%
Deforestación	163	100	82	100	237	100	322	100	804	100
Ganadería	45	28	23	28	139	58	187	57	394	49
Agricultura	26	16	14	17	24	10	45	14	105	13
Tala	8	5	4	5	5	2	16	5	32	4
Incendios forestales	79	49	39	47	52	22	23	7	193	24
Otros	5	3	2	3	17	7	52	16	80	10

Se calcula que las emisiones de carbono originadas por la quema, la descomposición de biomasa aérea y el cambio en el uso del suelo producto de la deforestación (incluyendo pérdidas de carbono en el suelo) van de 51.4 a 53.6 Mt Caño⁻¹, en estimaciones bajas (Masera *et al.*, 1995a y b), a 63.4 a 71.0 MtC año⁻¹ en una estimación alta (Cairns *et al.*, 1995). El IPCC (1995) calcula que para los otros gases invernadero las emisiones van de 58 a 195 Kt de metano, y de 504 a 1704 Kt de monóxido de carbono, más 1Kt de óxido nitroso y de 9 a 32 Kt de óxidos de nitrógeno.

Las conclusiones del trabajo de Masera *et al.* (1995b) destacan que entre las mayores fuentes de incertidumbre para estimar las emisiones y los almacenes de carbono, están las discrepancias y ausencias de información sobre la cobertura vegetal, las tasas de deforestación y el desconocimiento de las dinámicas de cambio de uso del suelo.

Como se mencionó en la sección anterior, actualmente los procesos de deforestación y degradación forestal en México constituyen la segunda fuente de emisiones de gases de efecto invernadero en nuestro país. Sin embargo, los bosques mexicanos tienen un enorme potencial para convertirse en “captadores netos” de

carbono. A continuación se analizan opciones de manejo forestal que, adecuadamente implementadas, permitirían conducir a México por la vía de reducción de gases de invernadero, principalmente carbono.

3.3. POTENCIAL DEL SECTOR FORESTAL PARA LA CAPTURA DE CARBONO

Bajo una adecuada política de apoyo, el sector forestal en nuestro país tiene la capacidad de reducir el crecimiento de las emisiones de CO₂ generadas por el sector energético, convirtiéndose en una de las opciones de mitigación más importantes a corto y mediano plazos.

3.3.1. OPCIÓN DE MITIGACIÓN DE CARBONO

Masera (1995c) define las opciones de mitigación de carbono como: cualquier acción que da como resultado una reducción del incremento neto en las emisiones de este gas de una área determinada y/o por la sustitución de combustibles fósiles. Asimismo, identifica dos opciones básicas de mitigación de carbono en el sector forestal: a) conservación, que consiste en evitar las emisiones de carbono preservando las áreas naturales protegidas, fomentando el manejo sostenible de bosques naturales y el uso renovable de la leña, y mediante la reducción de incendios; y (b) reforestación, dedicada a recuperar áreas degradadas mediante acciones como la protección de cuencas, la reforestación urbana, la restauración para fines de subsistencia (leña), el desarrollo de plantaciones comerciales para madera, pulpa para papel, hule, etc., así como de las plantaciones energéticas (producción de leña y generación de electricidad) y de los sistemas agroforestales. Acciones como éstas tienen por objetivo incrementar la fijación y almacenaje de carbono.

En resumen, la primer meta podría ser alcanzada evitando la degradación y aclareo de las áreas forestales. Esto usualmente se lleva a cabo mediante el cuidado propio de las áreas naturales protegidas y del manejo sustentable de los bosques nativos. Las emisiones de carbono también pueden ser evitadas por la quema de biomasa cosechada de forma sustentable, en lugar del uso de combustibles fósiles para energía (por ejemplo, utilizando plantaciones energéticas para hacer funcionar plantas de energía) y la sustitución de productos industriales en proce-

Cuadro 3.4. Captura de carbono acumulado, para diferentes opciones en los bosques mexicanos (Masera y Ordóñez, 1997)

Opción/Escenario	Área (millones de ha)			Carbono total acumulado (GtonC)				
	2000 (Pol)	2010 (Pol)	2030 (Pol)	2030 (Pot Tec)	2000 (Pol)	2010 (Pol)	2030 (Pol)	2030 (Pot Tec)
<i>Conservación</i>								
Áreas naturales protegidas	2.6	2.6	3.8	6.0	0.25-0.38	0.32-0.48	0.37-0.57	0.42-0.65
Manejo forestal (comercial)	6.8	10.7	13.2	18.7	0.68-0.92	0.92-1.24	1.36-1.81	2.13-2.80
Estufas mejoradas de leña	0.1	1.0	2.0	2.0	<0.01	<0.01	0.05	0.08
<i>Reforestación</i>								
Plantaciones de reforestación	0.2	0.5	0.8	4.2	0.04	0.06	0.19-0.20	0.31-0.33
Plantaciones para pulpa y papel	0.0	0.0	0.2	2.4	<0.01	0.02	0.13-0.14	0.20-0.21
Plantaciones energéticas	0.1	0.2	0.8	4.2	0.02	0.04	0.17	0.94
Sistemas agroforestales	1.0	1.1	1.5	1.9	0.05	0.06	0.08	0.10
Total	10.8	16.1	22.3	39.4	1.06-1.43	1.43-1.91	2.35-3.02	4.18-5.11

Nota: Pol= Políticas de apoyo adecuadas y PotTec= Potencial técnico.

so, que requieren del uso de combustibles fósiles, por productos hechos de madera (por ejemplo, sustituyendo cemento por madera, como señalan Schlamadinger y Marland, 1996). El segundo aprovechamiento incluye el incremento de la densidad de carbono en una área dada y/o los sumideros y almacenes de carbono. Aquí la opción básica es la reforestación de áreas (por ejemplo instrumentar en plantaciones industriales y/o bioenergéticas en zonas degradadas). También se pueden considerar opciones para incrementar la densidad de carbono en los bosques existentes (por ejemplo, aplicando sistemas de manejo integral, como el tiempo de rotación, aclareo, baja intensidad de corta selectiva, etcétera).

Una vez identificadas las opciones de mitigación, es necesario estimar la captura unitaria y el secuestro neto de carbono para cada una de las opciones. Estos parámetros serán la base para estimar las implicaciones del secuestro de carbono de futuros escenarios alternativos en el sector forestal.

3.4. POTENCIAL DE MITIGACIÓN AL AÑO 2030

Masera (1995c) estimó que para el año 2030 nuestro país tendría un potencial de captura total de carbono dentro de un rango de 2.34 a 3.02 GtC para una superficie de 26.4 Mha (Megahectáreas) en un escenario de política de apoyo, y de 4.18 a 5.12 GtC para una superficie de 39 Mha en un escenario de potencial tecnológico (Cuadro 3.4). Esto significa una captura anual de 67 a 116 MtC año⁻¹, que representa la mayor parte o el total de las emisiones actuales del sector energético e industrial en nuestro país.

A continuación se describe el potencial de captura de carbono por opción de manejo forestal, agrupados bajo dos rubros: a) conservación y b) reforestación.

3.4.1. CONSERVACIÓN

En México el manejo de las áreas naturales protegidas² y los bosques naturales son una de las mejores opciones para la captación de carbono, ofreciendo simultánea-

² Ordóñez y Flores (1995) consideran que los objetivos básicos del manejo de estas áreas deben dirigirse a la conservación de la diversidad biológica y cultural del país y al ofrecimiento de bienes y servicios derivados de los recursos naturales y culturales presentes en ellas.

mente una alternativa para incrementar la producción, tanto maderable como no maderable, el establecimiento de bancos de germoplasma y conservación de suelos, así como para cuidar la biodiversidad del país y, como consecuencia, la del planeta (cuadro 3.4). Prácticamente todo el aprovechamiento forestal en el país se da en los bosques naturales. Dentro de la conservación se incluyen tres modalidades de mitigación que contemplan: a) conservar adecuadamente y crear áreas naturales protegidas; b) el manejo de bosques naturales y c) el uso de estufas de combustión eficiente de leña.

3.4.1.1. Áreas naturales protegidas

Masera (1995c) estimó que las áreas naturales protegidas en México, tienen un potencial de captura de carbono para el año 2030 de 0.32 a 0.48 GtC (en un escenario de políticas de apoyo adecuadas) y de 0.42 a 0.65 GtC (en un escenario de potencial tecnológico) si es que se logra una conservación real de 2.6 millones ha (cuadro 3.4). Esta opción ofrece un importante potencial de captura de carbono a corto, mediano y largo plazos.

3.4.1.2. Manejo de bosques naturales

Esta opción considera dos grandes sistemas de manejo: a) el manejo selectivo de bosques templados (principalmente pino y pino-encino) y b) el manejo selectivo de selvas (principalmente selvas altas y bajas). Se busca realizar un manejo sostenible que permita mantener la productividad de los bosques a largo plazo.

El manejo forestal tiene un potencial de captura neta unitaria de carbono para bosques de 98 a 134 tC/ha⁻¹, y para selvas de 148 a 182 tC/ha⁻¹ (cuadro 3.5).

Con una captura potencial de carbono de entre 1.3 y 2.8 GtC, según el escenario, ésta es la opción más importante para nuestro país (cuadro 3.4).

3.4.1.3. Uso de estufas mejoradas

Esta opción considera la difusión de estufas de leña eficientes. Se estima que tienen un potencial de captura unitaria de carbono de 1 tC/estufa/año, que resulta en una captura total de 0.08 GtC en el largo plazo (cuadro 3.4).

3.4.2. REFORESTACIÓN

Consiste en la plantación de árboles en superficies desprovistas de vegetación o con vegetación muy degradada. Es una de las opciones de regeneración de la cobertura vegetal del país, ya que permite proteger cuencas y recuperar áreas que perdieron la cubierta vegetal, evitando también la erosión de suelos. La reforestación urbana genera pulmones de purificación de aire dentro de los núcleos urbanos. En esta opción se consideran también la restauración forestal para fines de subsistencia, como el caso de la leña en las comunidades rurales. Tradicionalmente, la reforestación se ha concentrado en las plantaciones de coníferas (por ej., pinos y cedros) con fines de restauración.

Para este rubro se consideran las plantaciones de reforestación en bosques, selvas, plantaciones para pulpa y papel, plantaciones energéticas y sistemas agroforestales.

3.4.2.1. Plantaciones de reforestación

Es una plantación que tiene por objetivo la regeneración de masas forestales en áreas degradadas o sin vegetación aparente. Considera bosques de pino, bosques de encino-pino, selva alta y selva baja. La captura unitaria de carbono para los bosques de pino de esta opción va del rango de 75 a 79 tC/ha⁻¹, mientras que para el encino va de 35 a 66 tC/ha⁻¹, para la selva alta el rango va de 128 a 150 tC/ha⁻¹; y para selva baja de 52 a 82 tC/ha⁻¹ (cuadro 3.5).

La captura total de carbono de esta opción en bosques de pino se estima en 0.2 a 0.3 GtC en el largo plazo (cuadro 3.4).

3.4.2.2. Plantaciones industriales

Estas plantaciones son principalmente para la producción de pulpa para papel. Las especies más usadas son pino y eucalipto. Suponiendo que se establezcan en tierras dedicadas a la agricultura y a la ganadería, el potencial de captura unitaria de carbono para las plantaciones de pino se estima entre 97 y 101 tC/ha⁻¹ y para plantaciones de eucalipto de 67 a 71 tC/ha⁻¹ (cuadro 3.5). La captura total de carbono para plantaciones comerciales se estima entre 0.13 y 0.21 GtC para el año 2030 (cuadro 3.4).

Cuadro 3.5. Captura unitaria de carbono por opción de mitigación en bosques mexicanos (Masera y Ordóñez, 1997)

Opción	Carbono en veget. (tC/ha)	Carbono en veget. Aérea (tC/ha)	Carbono en materia en desc. (tC/ha)	Carbono en el suelo (tC/ha)	Carbono en prod. (tC/ha)	Carbono sustit. (tC/ha/año)	Carbono total unitario (tC/ha)	Secuestro neto de C	
								Alta (tC/ha)	Baja (tC/ha)
<i>Conservación</i>									
Áreas naturales protegidas								Emisiones evitadas de carbono	
Bosque de pino	56	43	4	109-120	n.d.	n.d.	169-180	86	50
Bosque de encino	39	30	3	30-120	n.d.	n.d.	72-162	69	33
Selva alta	44	120	20	66-115	n.d.	n.d.	230-279	173	113
Selva baja	68	42	7	30-100	n.d.	n.d.	104-174	87	57
Bosques manejados									
Bosque	97	74	8	109-120	9	n.d.	222-233	134	98
Selva	44	120	20	66-115	9	n.d.	239-279	182	148
Estufas mejoradas								tC/est/año 1.0	tC/est. 42

Opción	Carbono en veget. (tC/ha)	Carbono en veget. Aérea (tC/ha)	Carbono en materia en desc. (tC/ha)	Carbono en el suelo (tC/ha)	Carbono en prod. (tC/ha)	Carbono sustit. (tC/ha/año)	Carbono total unitario (tC/ha)	Secuestro neto de C		
								Alta (tC/ha)	Baja (tC/ha)	
<i>Reforestación</i>										
Plantaciones de reforestación										
Bosque de pino	39	30	3	76-84	n.d.	n.d.	119-126	79	75	
Bosque de encino	27	21	2	21-84	n.d.	n.d.	50-113	66	35	
Selva perennifolia	101	84	14	46-81	n.d.	n.d.	161-195	150	128	
Selva caducifolia	47	30	5	21-70	n.d.	n.d.	73-122	82	52	
Plantaciones para pulpa y papel										
Pino	56	46	8	76-84	3	n.d.	140-148	101	97	
Eucalipto	23	19	11	76-84	3	n.d.	110-118	71	67	
Plantaciones energéticas	45	38	2	76-84	n.d.	3	124-131		tC/ha	215
Agroforestería (zona tropical seca)	20	17	n.d.	66-115	n.d.	n.d.	86-135	68	43	
Sistemas bajo sombra (Café + Inga)	26	22	n.d.	66-115	n.d.	n.d.	92-141	74	49	

3.4.2.3. Plantaciones energéticas

Estas plantaciones tienen por objeto satisfacer las necesidades de madera para uso energético, es decir, sustituir el uso de combustibles fósiles por madera (por ejemplo, el uso eficiente de estufas de leña), así como la generación de energía eléctrica mediante la utilización de calderas que funcionan con residuos de madera. El potencial de captura unitaria de carbono para esta opción es de 215 tC/ha⁻¹ (cuadro 3.5) y una captura total de 0.17 a 0.9 GtC en el largo plazo (cuadro 3.4).

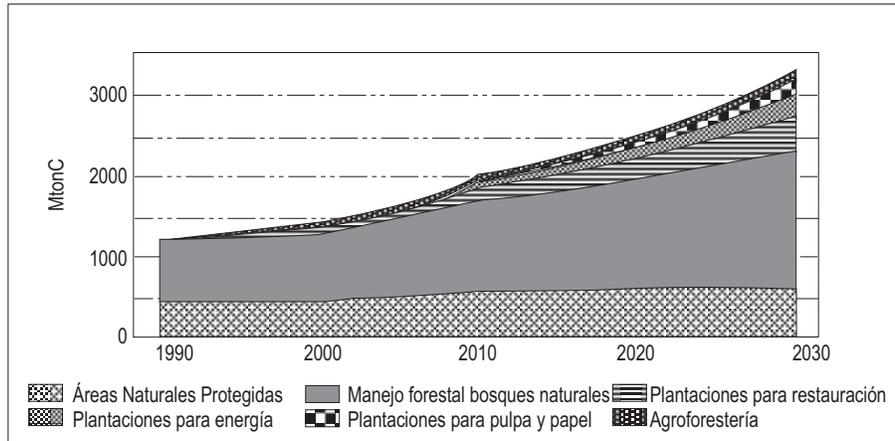
3.4.2.4. Agroforestería

Son sistemas que combinan el uso agrícola y forestal. Se consideran sistemas para climas templados y tropicales, e incluyen cercas vivas, manejo de acahuales, sistemas de plantación y árboles intercalados. El cultivo de café bajo sombra es un ejemplo de sistema agroforestal practicado extensamente en el país. La captura unitaria de carbono (cuadro 3.5) para el café bajo sombra con *Inga* va de 43 a 68 tC/ha⁻¹, para el bosque secundario se estima una captura unitaria que va de 49 a 74 tC/ha⁻¹, con una captura total en el largo plazo de 0.08 a 0.1 GtC (cuadro 3.4)

3.4.3. CONCLUSIONES

Se puede apreciar que la conservación (específicamente el manejo de bosques naturales) contiene las opciones con mayor potencial de captura de carbono en el país (figura 3.1).

Figura 3.1 Potencial de captura de carbono en México según distintas opciones de manejo forestal (escenario de política de apoyo según Masera y Ordóñez, 1997)



IV

EL MODELO CO₂FIX

4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO

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. Se basa en una simulación del ciclo del carbono para rodales (*stands*) forestales bajo manejo silvícola. Con el modelo se puede calcular el carbono total capturado a nivel de una plantación.

El modelo original fue programado en Fortran 77, por lo que hubo que adaptarlo a interfaces gráficas usando Borland C++, Ver 4.5. De esta forma el usuario sin mucha experiencia puede 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 (para más detalles ver Mohren *et al.*, 1997).

El modelo CO₂FIX se ha aplicado en diferentes ecosistemas forestales del mundo, como bosque tropical lluvioso, bosque boreal y bosque templado decíduo, con una representación de sistemas de silvicultura tradicional como el abeto *norway spruce* en las montañas centrales de Europa y *douglas-fir* en el Pacífico noroeste de los Estados Unidos; el abeto *slash* en Brasil, el *Pinus caribbea* en Brasil y Venezuela, y el *Pinus radiata* en Nueva Zelanda y Australia (ver Nabuurs y Mohren, 1993).

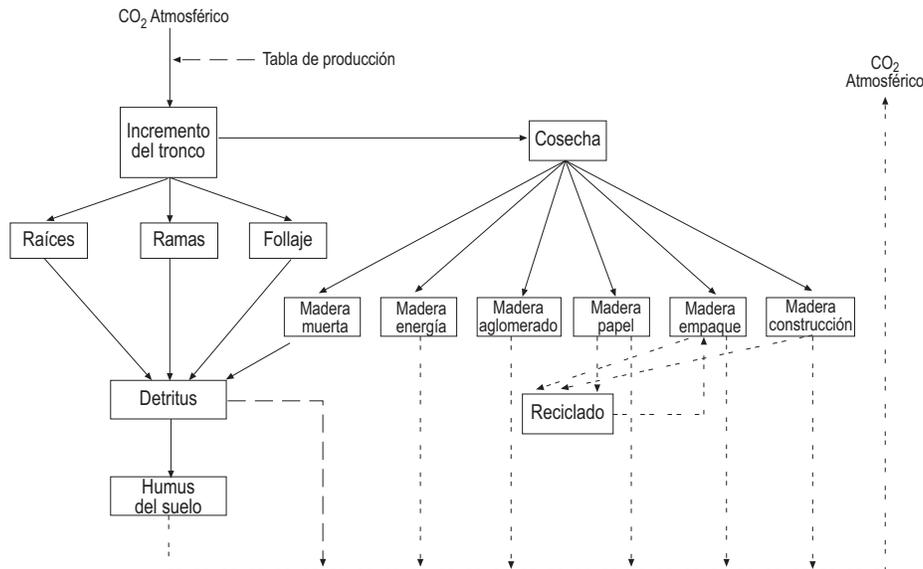
4.2. FLUJOS Y ALMACENES DE CARBONO EN EL MODELO CO₂FIX

La Figura 4.1, muestra de manera simplificada los flujos y almacenes de carbono comprendidos por el modelo CO₂FIX.

El CO₂FIX es un modelo de estimación que se fundamenta en el ciclo del carbono e integra el crecimiento anual y las tasas de pérdida de las principales combinaciones de biomasa, incluyendo además la relación de la dinámica de la descomposición de la materia orgánica en el suelo (basado en tablas de crecimiento e incremento del volumen maderable, como datos para el modelo). La distribución relativa de follaje, ramas y raíces, y su relación con el incremento en el volumen del tronco (es decir, cada uno de los componentes arbóreos) son integrados en conjunto con un tiempo de vida esperado.

La diferencia entre la asimilación y la descomposición durante el desarrollo forestal determina la cantidad neta de carbono fijado durante el desarrollo de rodales y de la suma total de carbono, el cual está permanentemente almacenado dentro de los ecosistemas.

Figura 4.1. Representación simplificada de los flujos y almacenes de carbono en el modelo CO₂FIX (Mohren *et al.*, 1997)



4.3. OPERACIÓN DEL MODELO

El programa modela la captura del carbono total que es acumulado durante el crecimiento de una especie forestal mediante procesos fisiológicos en una serie de reservorios que incluyen:

- a) Biomasa. Comprende el carbono contenido en la biomasa del tronco, las ramas, las raíces y el follaje, que depende de su incremento.
- b) Suelo. Aquí se integra el carbono que hay en humus y detritus, así como sus tasas de residencia y descomposición.
- c) Productos. Se consideran seis categorías: madera muerta, madera para papel, madera para empaque, madera para uso energético, madera para construcción y madera para aglomerados, e incluye una opción importante que es el reciclado.

La tasa de acumulación y descomposición de carbono en los reservorios, así como la cantidad total de carbono fijado, se da como la diferencia entre procesos fisiológicos tales como la acumulación de carbono por la fotosíntesis, *versus* la emisión por respiración. La fijación de carbono en biomasa se estima a partir de las tablas de incremento de la especie analizada. Se utilizan coeficientes para relacionar el incremento del tronco con raíces, ramas y follaje.

La dinámica de los compartimentos del suelo forestal se describen por las tasas de descomposición del detritus, el humus estable y las tasas de humificación del detritus. La fijación de carbono en el suelo es la diferencia entre el aporte de biomasa a madera, de madera a detritus, y de éste al humus, *versus* las tasas de descomposición del humus.

La captura de carbono en los productos forestales se incorpora en el modelo, acorde con las especificaciones del régimen de cosecha. La madera cosechada se distribuye en seis grupos de productos, basados en el diámetro del tronco. Se asume que los productos tienen una degradación exponencial con respecto a los tiempos promedio de residencia del carbono en madera para energía, papel, empaque, cajas de empaque, aglomerados y construcción, normalmente estimados en 1, 2, 3, 20 y 35 años, respectivamente. Para los productos maderables, la opción del reciclaje está siempre patente. En este caso, la degradación de los productos maderables no es exponencial, pero es el último lapso en el que los productos de madera se desplazan a madera de baja calidad.

4.3.1. ESTIMACIÓN DINÁMICA DE LA CAPTURA DE CARBONO

Para realizar el cálculo, el modelo parte de la simulación del ciclo del carbono y consiste en tres secciones principales: inicial, dinámica y final.

En la sección inicial se abren los archivos de entrada y salida de datos, y los datos de entrada se leen desde los archivos correspondientes. Dos archivos de introducción de datos son usados por el modelo, uno contiene los parámetros de la planta (BSOORT.SPE) y el otro contiene los datos del sitio del rodal (OPSTAND.SATA).

La parte dinámica consiste en un número de subsecciones que describen fenómenos tales como crecimiento del árbol, incremento forestal, acumulación del producto, descomposición, fijación de CO₂, manejo, aclareo y cosecha final, y corrida del control de salida.

El modelo se ejecuta con tiempos escalonados de un año e integraciones numéricas depuradas, así como con tasas de crecimiento y descomposición expresadas de forma anual. Al final de cada periodo, el detalle del resultado es desplegado en los archivos de salida. Un contador en pantalla indica el procedimiento del cálculo de la simulación para periodos posteriores, como 10 años y 30 años después. Al final de la simulación, se despliegan en pantalla los resultados del procedimiento en forma gráfica (una del balance de carbono en toda la plantación y otra del balance de carbono por rodal). De forma tabular despliega la suma total de los resultados obtenidos, el promedio del carbono fijado y el carbono contenido por la biomasa en pie y por los productos. Esto permite hacer una rápida comparación entre diferentes cálculos de simulaciones, así como obtener promedios a corto y largo plazo de la captura de carbono.

En la sección final del modelo se cierran los archivos de resultados, guardando la información del ejercicio con el nombre de la especie en cuestión, con lo cual el programa termina su ejecución.

4.3.2. REGISTRO DE DATOS

El modelo CO₂FIX presenta cuatro ventanas de captura para ingresar los datos de la especie en cuestión (ver Mohren *et al.*, 1997):

i) Parámetros del rodal. En esta ventana se ingresa el ciclo de rotación, número de rotaciones, intervalo de salida de datos, biomasa inicial, incremento relativo

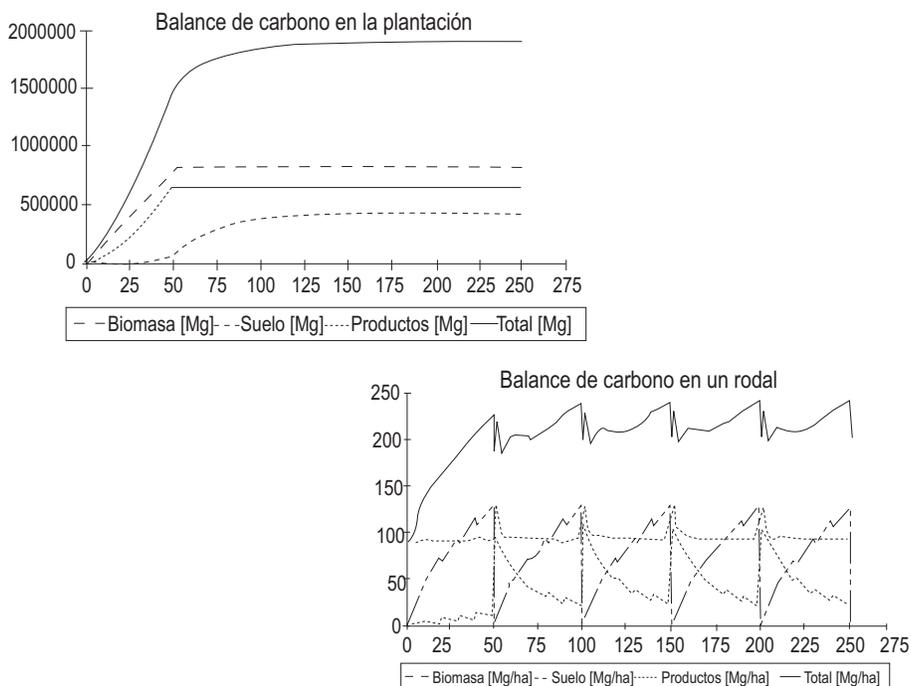
en follaje, ramas, raíces, si son rotaciones simples o múltiples y, por último, si el producto se recicla o no.

ii) Tabla de cosecha y aclareo. Esta ventana es alimentada con los años en los que se realizan los aclareos y la cantidad porcentual de la fracción cosechada, así como con el porcentaje que se destina a diferentes usos (energía, papel, construcción) por cada aclareo.

iii) Especificaciones de la especie. Aquí se indica la especie en cuestión y se incluyen datos característicos de la misma, como densidad de la madera, carbono contenido en materia seca, tasas de decaimiento para la biomasa en follaje, ramas y raíces, tasa de mortalidad, tiempo de residencia de carbono en promedio en productos y detritus, tasa de humificación y contenido de carbono en el humus (suelo estable).

iv) Crecimiento de la especie. En esta ventana se ingresan los datos del incremento de la especie (incremento corriente anual para diferentes edades en $\text{m}^3\text{año}^{-1}$) y el aumento como proporción del crecimiento de hojas, ramas y raíces.

Figura 4.2. Despliegue gráfico: *a)* figura de la estimación de captura potencial de carbono en toda la plantación y *b)* figura de la captura de carbono en un rodal. Eje X=años, eje Y=Mg($10^6\text{g}=1\text{ ton}$).



4.3.3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Una vez registrada la información, el modelo realiza los cálculos de la estimación desplegando en pantalla un indicador del proceso. Al finalizar dicho proceso, muestra dos gráficas simultáneas de resultados (figura 4.2). La primera corresponde al balance de carbono en la plantación y la segunda al balance de carbono en un rodal. Como complemento también muestra los resultados en forma de cuadros (con un total de 12) relativos al proceso de las estimaciones de captura de carbono en una plantación (figura 4.3).

Los cuadros permiten ver de manera cuantitativa la cantidad de carbono almacenada en biomasa, en suelo, en productos; la suma de los tres da el carbono total. Esto para cada año en que se realiza el tratamiento, durante el primer turno y los subsecuentes (ver Morhen *et al.*, 1997).

Figura 4.3. Despliegue tabular de los resultados por el modelo.

YEAR	TOCBICH	TOCSOH	TCPRODF	TCTOTAL
1.00	399.46	15445.98	0.00	15845.44
10.00	35917.27	141142.66	0.00	177059.92
15.00	35917.27	141142.66	0.00	177059.92
20.00	138095.36	301067.31	2269.13	442431.78
25.00	138095.36	301067.31	2269.13	442431.78
30.00	278299.62	458332.72	8525.94	745158.31
35.00	278299.62	458332.72	8525.94	745158.31
40.00	455578.12	618083.38	19186.82	1098848.38
45.00	455578.12	618083.38	19186.82	1098848.38
50.00	663796.75	776273.69	33991.25	1474061.62
55.00	663796.75	776273.69	33991.25	1474061.62
60.00	661945.25	818476.56	168751.47	1649173.25
65.00	661945.25	818476.56	168751.47	1649173.25
70.00	661187.19	815764.06	355127.53	1732068.75
75.00	661187.19	815764.06	355127.53	1732068.75
80.00	660652.56	819262.44	311837.84	1791722.88

V

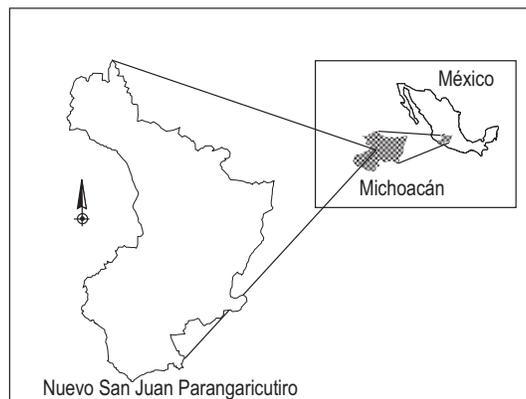
NUEVO SAN JUAN PARANGARICUTIRO

5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Nuevo Parangaricutiro se localiza al sur de la región Purépecha, en el centro occidente del Estado de Michoacán (figura 5.1), entre los paralelos $19^{\circ} 21' 00''$ y $19^{\circ} 24' 45''$ N y los meridianos $102^{\circ} 08' 15''$ y $102^{\circ} 17' 30''$ W. Tiene una extensión de 23,431.00 ha.

La comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro se ubica en el municipio de Nuevo Parangaricutiro, a 15 km al poniente de la ciudad de Uruapan. Administrativamente forma parte del Centro de Apoyo Agropecuario y Forestal N° 01 de Nuevo San Juan Parangaricutiro, del Distrito de Desarrollo Rural Integral N° 087, con sede en Uruapan, y a la jefatura del Programa Forestal y Delegación Estatal de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGAR), en Morelia, Michoacán. Cuenta con una superficie de 18,318 ha, lo que representa el 78% de la superficie municipal total.

Figura 5.1. Localización del área de estudio



5.1.1. Geología

La región pertenece al periodo Cuaternario y tiene rocas del medio superior volcánico de la era Cenozoica. Se encuentran en el área, de manera predominante, rocas ígneas de tipo andesíticas, riolitas, basaltos, tobas, cenizas volcánicas, porfidios y brechas andesíticas. También, aunque en menor medida, rocas sedimentarias compuestas por material detrítico. En 1967 Howel determinó para la zona la existencia de basalto de olivino, andesitas basálticas y lavas, provenientes de diversos volcanes pequeños con edades distintas. En la región abundan los conos cineríticos grandes y pequeños, barrancas, llanuras volcánicas y algunos valles, con altitudes que van de los 1500 a 3250 msnm.

5.1.2. Edafología

Los suelos que dominan el área son profundos y de texturas medias. Sus unidades corresponden, según el sistema FAO-UNESCO, a andosol vítrico, regosol eútrico, litosol, luvisol crómico y cambisol eútrico (Cuanalo *et al.*, 1989).

5.1.3. Hidrología

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

5.1.4. Climatología

De acuerdo al sistema de clasificación de Köppen, modificado por García (1964), y a las cartas de clima elaboradas por la Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP), Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), y la Dirección General de Geografía (DGG), hay un clima templado húmedo, (C (m) (w) big con variantes) con abundantes lluvias en verano; lluvia invernal menor del 5%; con temperatura media anual de 18 °C y la del mes más frío entre -3 y 18 °C. Existe una precipitación anual entre 1500 y 2000 mm, una frecuencia de heladas entre 20 y 40 días anuales y de granizadas de tres días al año.

5.1.5. Temperatura

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

5.1.6. Vegetación

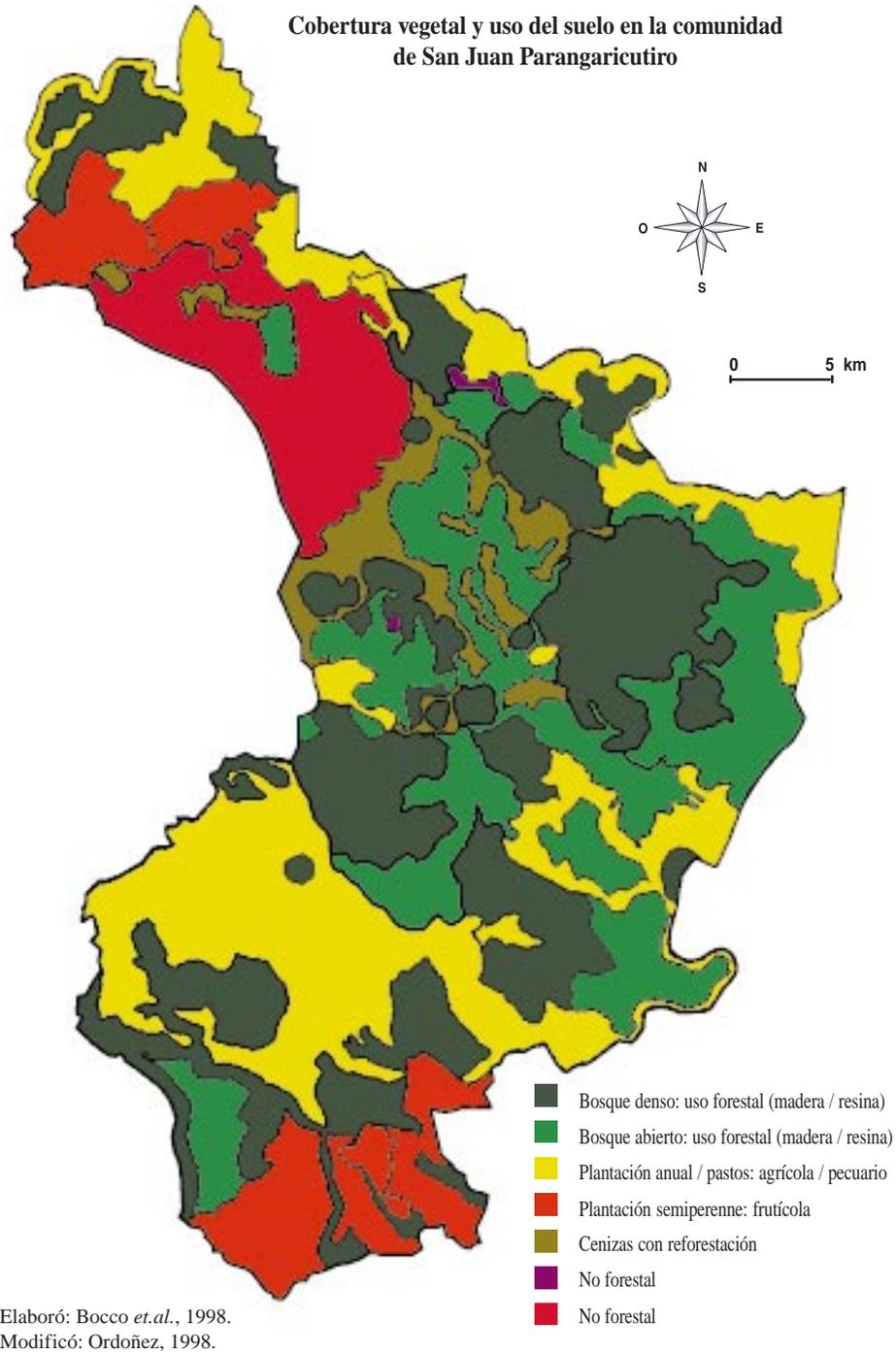
La vegetación en su mayor parte está representada por bosque de pino, bosque de pino-encino y bosques de pino-encino con vegetación secundaria arbustiva (figura 5.2). Madrigal (1982) menciona la existencia de bosque de oyamel y reporta las siguientes especies de coníferas *Abies religiosa* var. *emarginata*, *Pinus douglasiana*, *P. lawsonii*, *P. leiophylla*, *P. maximinoi*, y *P. michoacana*. Las especies de encino registradas por Bello y Labat (1987), para el municipio son: *Quercus candicans*, *Q. castanea*, *Q. crassipes*, *Q. laurina*, *Q. obtusata* y *Q. rugosa*.

5.1.7. Uso del suelo

El uso del suelo en la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro se reporta en el cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Uso del suelo en la comunidad indígena de Nuevo San Juan, Michoacán (SARH, 1988)

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



5.2. MANEJO FORESTAL

Desde 1988 la comunidad de NSJP puso en marcha un modelo de manejo forestal basado en la organización comunal, el establecimiento de una industria, la reinversión de utilidades y la capacitación permanente del personal técnico y administrativo. Desde el inicio de este programa, la comunidad se propuso como meta principal la extracción del arbolado, permitiendo su regeneración. Con base en un estudio del potencial dasonómico se tienen establecidos los programas de manejo, que abarcan los aspectos de protección, fomento e industria forestal. Adicionalmente se ha hecho una división de áreas para los aprovechamientos. Así, de las aproximadamente 11,000 ha forestales, se usan, en promedio, 1,000 ha al año para la extracción de 80,000 a 100,000 m³, de las especies de pino (*Pinus* spp.), Oyamel (*Abies religiosa*), encino (*Quercus* spp), y otras especies (SARH, 1988).

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

Un aspecto relevante en la actividad forestal de la comunidad han sido las plantaciones forestales para la reforestación (cuadro 5.2), especialmente en las áreas degradadas con arenales y terrenos abandonados por la improductividad forestal. En un lapso de cinco años han establecido viveros locales, con la colecta de semilla de los bosques comunales, de donde se han reforestado cerca de 1,300 ha, sobresaliendo algunas zonas donde se ha igualado y superado la constante de crecimiento de la regeneración natural.

Cuadro 5.2. Crecimiento de cuatro plantaciones de pino (*Pinus pseudostrobus*) en la comunidad de NSJP

Sitio	msnm	Año de la plantación	Densidad (árboles/ha)	Altura de los árboles (m)
San Nicolás	2,700	1991	2,500	3.6
Los Cañones	2,450	1991	2,500	2.7
La Alberca	2,350	1991	2,500	3.1
El Puerto	2,550	1992	2,500	2.5

5.3. SISTEMA DE MANEJO FORESTAL

El sistema de manejo forestal tiene como objetivo obtener un rendimiento sostenido del bosque, el cual está conformado de conjuntos de árboles que cubren una extensión de terreno (Grijpma, 1984).

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

En NSJP el bosque se encuentra dividido en rodales, que son áreas del bosque formadas por árboles de aproximadamente la misma edad, o de diferentes edades que tienen factores o características, comunes como pendiente, exposición al sol y tipo de suelo. Los rodales se pueden dividir en subrodales, si se comparten características distintivas en el área.

El bosque se aprovecha con un turno de 50 años y un ciclo de corta de 10, de forma que se aplican cinco tratamientos: tres aclareos, una corta de regeneración y una corta de liberación. También se realizan las siguientes prácticas:

1. Aclareos. La finalidad principal es la redistribución del incremento en el volumen de los mejores árboles que se quedan en pie, aplicándose los principios de las cortas de saneamiento, recuperación y mejoramiento. El tratamiento de aclareo tiene la función de dejar a la masa forestal en mejores condiciones de densidad, sanidad y vigor, además de que contribuye a la productividad forestal. Se aplica normalmente un aclareo cada 10 años, tres durante los 30 años del periodo de rotación del bosque.

2. Corta de regeneración. Se lleva a cabo en un rodal maduro y es la cosecha principal del bosque, en la que se quedan en pie los mejores sujetos como árboles padres que darán origen a la nueva masa forestal. En la aplicación de este tratamiento se deben realizar labores complementarias para favorecer el establecimiento de la regeneración natural, como son quemadas controladas, chaponeo y cuidado de estas áreas contra los animales. Se aplica 10 años después del último aclareo y es el cuarto tratamiento en el periodo de rotación. Con este proceso se extrae del 50 al 60% del volumen total.

3. Corta de liberación. Su finalidad principal es lograr la liberación gradual de la nueva masa para que ocupe definitivamente toda la superficie, cortando todos los árboles padres. Es el último tratamiento en el periodo de rotación del bosque, se aplica 10 años después de la corta de regeneración.

VI

LA CAPTURA DE CARBONO

EN NUEVO SAN JUAN PARANGARICUTIRO

Como se mencionó en el capítulo II, el ciclo del carbono en la vegetación es muy dinámico y sumamente complejo, por lo que para hacer una estimación del potencial de captura de carbono en un ecosistema forestal es necesario analizar los componentes que lo integran.

En el presente capítulo se describe el método para realizar la estimación de la captura de carbono en el bosque de la Comunidad Indígena (CI) en Nuevo San Juan Parangaricutiro (NSJP) tomando como base al género *Pinus*.

6.1. MÉTODO

Para realizar la estimación de captura de carbono es necesario determinar una serie de parámetros agrupados en los siguientes rubros:

- a) Sistema de manejo del bosque de NSJP.
- b) Distribución del aprovechamiento forestal por tipo de productos en NSJP.
- c) Selección de parámetros fisiológicos y de biomasa para el género *Pinus*.
- d) Tabla de incremento del género *Pinus*.

6.2. SISTEMA DE MANEJO DEL BOSQUE DE NSJP

En NSJP, se aplica el sistema de manejo conocido como método de árboles padres (ver capítulo V) donde se consideran cinco tratamientos que consisten en tres aclareos, una corta de regeneración y una corta de liberación. El tratamiento se realiza cada 10 años y el turno o ciclo de rotación es la suma de los cinco tratamientos, que dan un total de 50 años (cuadro 6.1).

Cuadro 6.1 Sistema de manejo (SARH, 1988)

Turno de 50 años					
Tratamientos	Aclareos			Corta de regeneración	Corta de liberación
	primero	segundo	tercero		
Años	10	20	30	40	50

6.3. DISTRIBUCIÓN DEL APROVECHAMIENTO FORESTAL POR TIPO DE PRODUCTOS EN NSJP

Los principales productos en NSJP son madera muerta, madera para la construcción, madera para pulpa y papel y madera para muebles. Hasta hoy no se tiene cuantificada la madera para uso energético (leña), para embalaje y los residuos como el aserrín.

En el cuadro 6.2 se resumen los principales productos maderables del bosque de NSJP, en porcentajes, respecto del aprovechamiento total. Estos datos se repiten para cada tratamiento.

Cuadro 6.2. Principales productos forestales de NSJP (SARH, 1988)

Producto	% de la producción
Madera muerta	0.05
Energía	0
Papel	0.05
Embalaje	0
Muebles (productos)	0.621
Construcción	0.279

6.4. Selección de parámetros fisiológicos y de biomasa para el género *Pinus*

En el bosque de NSJP hay diferentes tipos de vegetación arbórea. La dominante es el bosque de pino, seguido por la de pino-encino, pino-otras hojosas y pino-abies. El género *Pinus*¹ (Martínez *et al.*, 1948) tiene una cobertura aproximada de 8,900 ha (ver Capítulo V) y sus principales especies son: *Pinus douglasiana*, *P. leiophylla*, *P. michoacana*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*², y *P. teocote*. Como el *Pinus pseudostrobus* es el más abundante (SARH, 1988), y comparte todas las características que definen al género, la información característica de la especie se tomó como base para estimar la captura de carbono en el bosque de NSJP.

En el cuadro 6.3, se muestran los parámetros fisiológicos y del suelo forestal asociado, obtenidos de una amplia revisión de la literatura existente. El cuadro 6.4 indica del incremento relativo en peso seco del follaje, ramas y raíces con respecto al tronco. El cuadro 6.5 presenta los valores obtenidos para la biomasa inicial. Es importante mencionar que no hay estudios a nivel regional de los parámetros antes mencionados, lo que implicó usar datos bibliográficos de estudios de caso que contenían información para el género *Pinus*.

Cuadro 6.4. Incremento relativo respecto al tronco por edad durante el desarrollo del rodal, en peso seco de follaje, ramas y raíces (Nabuurs y Mohren, 1993)

Incremento en volumen del follaje, ramas y raíces respecto del tronco durante el desarrollo del rodal										
Edad del rodal (años)	0	6	10	14	18	22	25	30	40	50
Follaje	0.8	0.4	0.2	0.15	0.15	0.2	0.25	0.3	0.6	0.8
Ramas	0.8	0.5	0.2	0.15	0.15	0.2	0.3	0.4	0.7	0.9
Raíces	0.9	0.6	0.3	0.25	0.25	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0

¹ El género *Pinus* pertenece a la familia de las Pináceas. Los pinos son árboles siempre verdes, más o menos resinosos, con hojas aciculares (en forma de aguja) en número de una a ocho, protegidas en la base por una vaina caediza y persistente y con los frutos en forma de cono leñoso, formado por escamas que abrigan la semillas (Martínez, 1948).

² *Pinus pseudostrobus* Lindl.; especie registrada por Lindley (Bot. Reg. XXV Misc. 63, 1839). Es variable, al grado que hay diferencias a veces notables aún en una misma localidad. Sus caracteres generales son: cinco hojas delgadas, cono ovoide o largamente ovoide, ramillas con tinte ceniciento en sus partes tiernas, entrenudos largos, base de las brácteas alargadas y espaciadas, poco salientes y como sumergidas en la ramilla, corteza casi lisa durante mucho tiempo en los árboles jóvenes.

Cuadro 6.3. Parámetros fisiológicos y del suelo forestal asociado

Nombre de la especie: <i>Pinus pseudostrabus</i> *		Fuente
Densidad de la madera (Kg/m ³)	500	a
Contenido de carbono en materia seca (Kg/Kg)	0.50	b
Tasa de decaimiento para la biomasa del follaje (1 año)	0.3	a
Tasa de decaimiento para la biomasa de las ramas (1/año)	0.05	a
Tasa de decaimiento para la biomasa de las raíces (1/año)	0.10	a
Tasa de mortalidad (o autoclareo) (1/año)	0.02	a
Tiempo de residencia promedio de madera muerta en el bosque (años)	20	a
Tiempo de residencia promedio del papel (años)	2	a
Tiempo de residencia promedio del aglomerado (años)	20	a
Tiempo de residencia promedio de madera para energía (años)	1	a
Tiempo de residencia promedio de madera para empaque (años)	3	a
Tiempo de residencia promedio de madera para la construcción (años)	35	a
Tasa de humificación (1/año)	0.05	a
Tiempo de residencia promedio del detritus (1/años)	2	a
Tasa de residencia promedio del humus estable (años)	320	a
Contenido de carbono en humus en suelo estable (años)	0.58	c

* Se designó como especie representativa del género por su abundancia (SARH, 1988). A: el registro de los valores de los parámetros fueron derivados de fuentes de literatura (por ej., Cannell, 1982; Kimmins *et al.*, 1985; Millemann y Boden, 1986; De Vries *et al.*, 1990), registrados en Mohren *et al.*, 1997; b: Ajtay *et al.*, 1997 y c: Buringh. 1984.

Cuadro 6.5. Valores asignados a la biomasa inicial (Nabuurs y Mohren, 1993)

Variable	Valor
Peso seco del follaje (ton ms/ha)	3
Peso seco de raíces (ton ms/ha)	0.5
Peso seco del detritus (ton ms/ha)	0
Peso seco del humus estable en suelo (ton ms/ha)	150
Peso seco de ramas (ton ms/ha)	0.5
Volumen inicial de los componentes de la biomasa en tronco (ton ms/ha)	1
Cantidad total de desperdicios de madera muerta en el bosque (ton ms/ha)	0

6.5. Tabla de incremento del género *Pinus*

Para obtener las tablas de incremento del género *Pinus* en el bosque de la C.I. de NSJP se realizó un análisis detallado del estudio dasonómico conducido en la comunidad (SARH, 1988). Este análisis implicó:

- a) Identificación de rodales y subrodales que contienen al género *Pinus*.
- b) Diseño de base de datos.
- c) Sistematización y almacenamiento de datos en formato digital.
- d) Procesamiento estadístico de datos.
- e) Modelo de regresión.
- f) Obtención de la curva de incremento.

Para validar el análisis se realizó una verificación en campo que incluyó:

- a) Un recorrido detallado por la zona de estudio a fin de comprobar la veracidad de la información obtenida en el mapa de vegetación.
- b) Verificación de rodales de distintas edades y bajo diferentes tratamientos.
- c) Asimismo, se realizaron varias reuniones con los encargados de la dirección técnica forestal de la comunidad para ajustar detalles sobre diversos aspectos del plan de manejo y los tratamientos silvícolas.

6.5.1. IDENTIFICACIÓN DE RODALES Y SUBRODALES

Dentro del estudio dasonómico realizado por SARH (1988) se identificaron 31 rodales que contenían al género *Pinus*, con un total de 211 subrodales.

6.5.2. DISEÑO DE BASE DE DATOS

De las áreas de estudio seleccionadas (rodales y subrodales), la SARH en 1988 realizó mediciones a los individuos del género *Pinus*, para obtener su diámetro, altura, edad y número de árboles por ha; con esto calculó su incremento corriente anual (ICA), incremento medio anual (IMA), existencias reales (ER), volumen de madera aprovechable por ha y se determinó en qué tratamiento se colocaba a cada rodal y subrodal. Con esta información se estructuró la base de datos para obtener las curvas de incremento.

En el cuadro 6.6. se enlistan los parámetros evaluados en el estudio dasonómico realizado por SARH (1988) y con el cual se estructuró la base de datos.

Cuadro 6.6. Datos colectados en el estudio dasonómico (SARH, 1988)

Variable	Criterio o parámetro de evaluación
Tratamiento	Se refiere al manejo forestal en el momento en que se hizo el estudio dasonómico: aclareos, corta de regeneración y corta de liberación
Altura (m)	Es la distancia vertical entre el suelo y la última parte comerciable del tronco (fuste). Se mide de forma indirecta usando un altímetro y midiendo la distancia entre el punto focal donde se tomó el ángulo de la yema terminal y la base del tronco, se calcula sacando la tangente del ángulo y multiplicándola por la distancia
Diámetro (cm)	El diámetro de árboles en pie se debe medir a una altura de 1.30 m por encima del nivel del suelo. Este diámetro se llama diámetro a la altura del pecho (DAP)
Existencias reales (m ³ /ha)	Volumen total de árboles que existen en un bosque dado por unidad de superficie
Incremento medio anual (m ³ /ha/año)	Es el incremento anual en una hectárea durante la edad del árbol
Rodal/Subrodal	Un rodal es una parte del bosque que se diferencia de otras por su composición, edad o estado. Se puede dividir en subrodales
Edad (años)	La edad de los árboles constituyen la base para calcular el incremento de madera de los bosques por año. En especies de árboles con periodo de reposo anual se puede determinar la edad contando los anillos

6.5.3. SISTEMATIZACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS EN FORMATO DIGITAL

La información obtenida en el estudio dasonómico se sistematizó siguiendo el orden de los datos obtenidos por la SARH en 1988, y se almacenó en formato digital en una hoja de cálculo del programa Lotus.

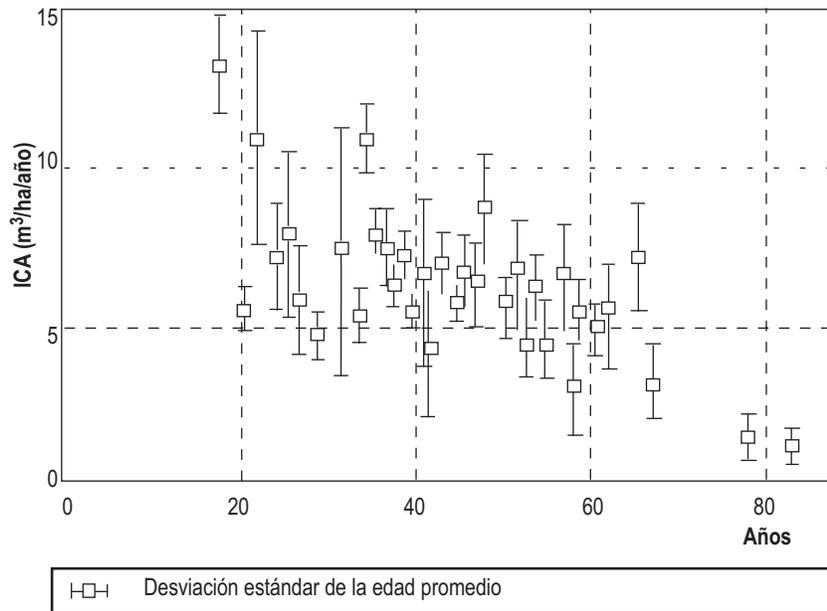
6.5.4. PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS

El siguiente paso fue ordenar los rodales y subrodales por edad, en orden ascendente y se obtuvo la media aritmética de la edad e ICA; posteriormente se agruparon los árboles que se encontraban en un mismo rango de edad. Como resultado de este

proceso, de los 210 subrodales se observó una distribución en un rango de edades que va de 16 a 83 años. Dejando solamente el promedio de los datos, agrupados según su edad (en números enteros) y su ICA, obteniendo un total de 92 datos.

En la figura 6.1, se observa el ICA respecto del promedio de las edades de los árboles del género *Pinus* en el bosque de NSJP.

Figura 6.1. ICA respecto del promedio de edades de los árboles del género *Pinus*, en NSJP

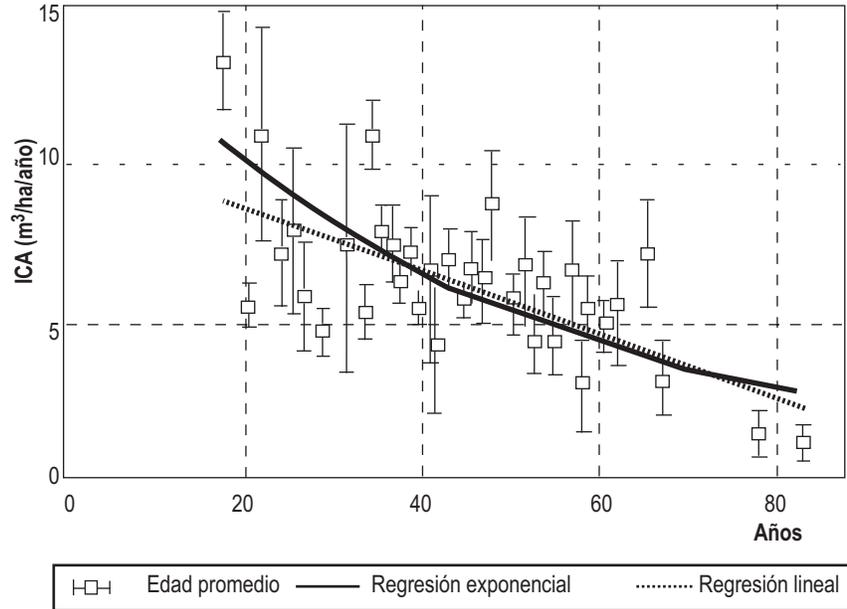


6.5.5. MODELO DE REGRESIÓN

A los datos generados por el procesamiento anterior se les sometió a dos tipos de regresiones, una de tipo lineal y otra de tipo exponencial; se analizaron ambas regresiones para ver cuál de las curvas se ajustaba a la distribución de los valores promedio (figura 6.2). La regresión de tipo exponencial presentó un mejor coeficiente de correlación, así mismo la distribución de datos fue más homogénea y se adecúa más a los valores promedio (ICA respecto al promedio de las edades de los árboles del género *Pinus*; cuadro 6.7). Por estas razones, se eligió la regresión de tipo exponencial para estimar los valores del ICA del *Pinus pseudostrobus*. Al transformar las variables de la regresión se obtiene la siguiente ecuación entre el ICA y la Edad:

$$\ln ICA = -0.029 \text{ Edad} + 2.67$$

Figura 6.2. Curva promedio y curvas de regresión lineal y exponencial.



El cuadro 6.7, muestra los resultados derivados del análisis de las regresiones (exponencial y lineal) aplicadas a los valores promedio.

Cuadro 6.7. Resultados de las regresiones exponencial y lineal

Regresión exponencial: resultados		Regresión lineal: resultados	
Constante	2.6	Constante	10.56
Error de estimación Y	0.33	Error de estimación Y	1.72
Coef. Determinación (r ²)	0.51	Coef. Determinación (r ²)	0.43
Tamaño de la muestra	45	Tamaño de la muestra	45
Grados de libertad	43	Grados de libertad	43
Coefficiente (s) X	-0.02	Coefficiente (s) X	-0.10
Error coef. X	0.003	Error coef. X	0.016
Pend. Exponencial	-0.02	Pend. Lineal	-0.10
Ecuación lnICA= -0.029 edad + 2.67		Ecuación ICA= -0.10 edad + 10.56	

En el cuadro 6.8, se muestran los valores obtenidos de la regresión exponencial estimada para *Pinus pseudostrobus*.

Cuadro 6.8. Valores obtenidos de la regresión exponencial, para estimar el incremento de *Pinus pseudostrobus* respecto a su edad

Edad (años)	ICA (m ³ /ha/año)	Edad (años)	ICA (m ³ /ha/año)
0	0	45	5.90
5	14.11	50	5.29
10	12.65	55	4.74
15	11.35	60	4.25
20	10.17	65	3.81
25	9.12	70	3.42
30	8.18	75	3.06
35	7.33	80	2.75
40	6.58	85	2.46

Los valores obtenidos en la regresión exponencial se ajustaron en incrementos de 5 años en adelante.

Los parámetros descritos en las secciones anteriores se utilizaron para alimentar el modelo CO₂FIX para Windows Ver. 1.2., con el cual se realizó la estimación del potencial de captura de carbono en el bosque templado de la C.I. de NSJP.

6.6. RESULTADOS

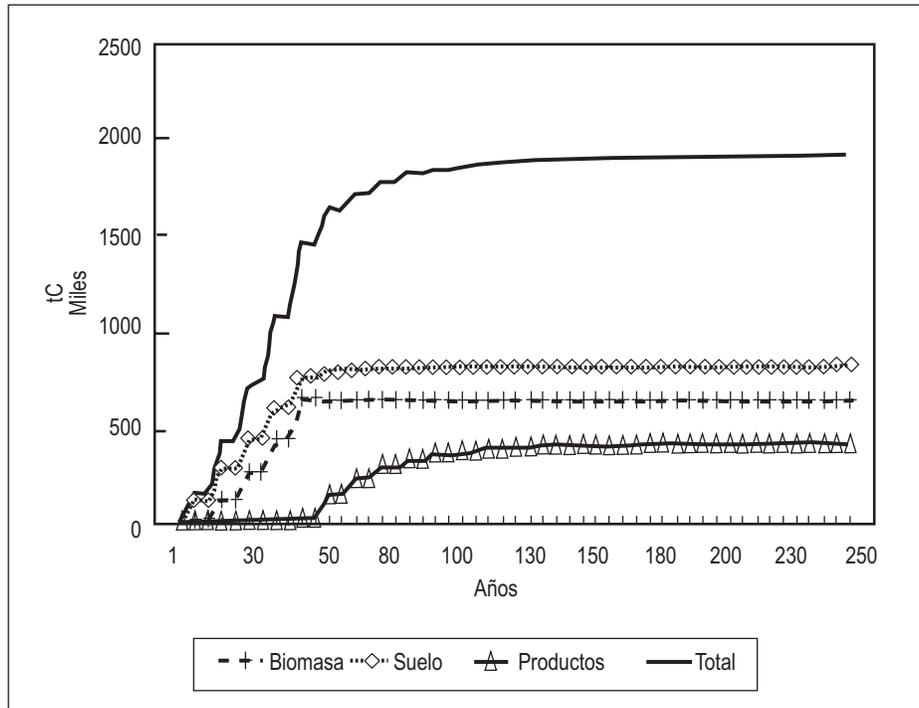
A continuación se describen los principales resultados obtenidos de los cálculos realizados por el modelo CO₂Fix para Windows Ver. 1.2., observando lo siguiente:

a) La figura 6.3, muestra la captura potencial de carbono en toda el área de estudio (considerada por el modelo como una plantación). Se aprecia el contenido e incremento de carbono en la biomasa, en el suelo en los productos, así como la suma de estos tres almacenes, que representa el carbono total del bosque.

En la misma figura se aprecia que hacia los 80 años la captura de carbono en biomasa y suelo comienza a estabilizarse, mientras que el carbono en productos alcanza esta estabilidad a los 100 años, debido a que el tiempo de produc-

ción y descomposición de los productos es diferente al ciclo natural del carbono en el ecosistema forestal. La captura total de carbono crece de forma constante entre los 50 y 100 años y comienza a estabilizarse a partir de esta última edad.

Figura 6.3. Captura potencial del carbono contenido en la plantación de *Pinus* de NSJP

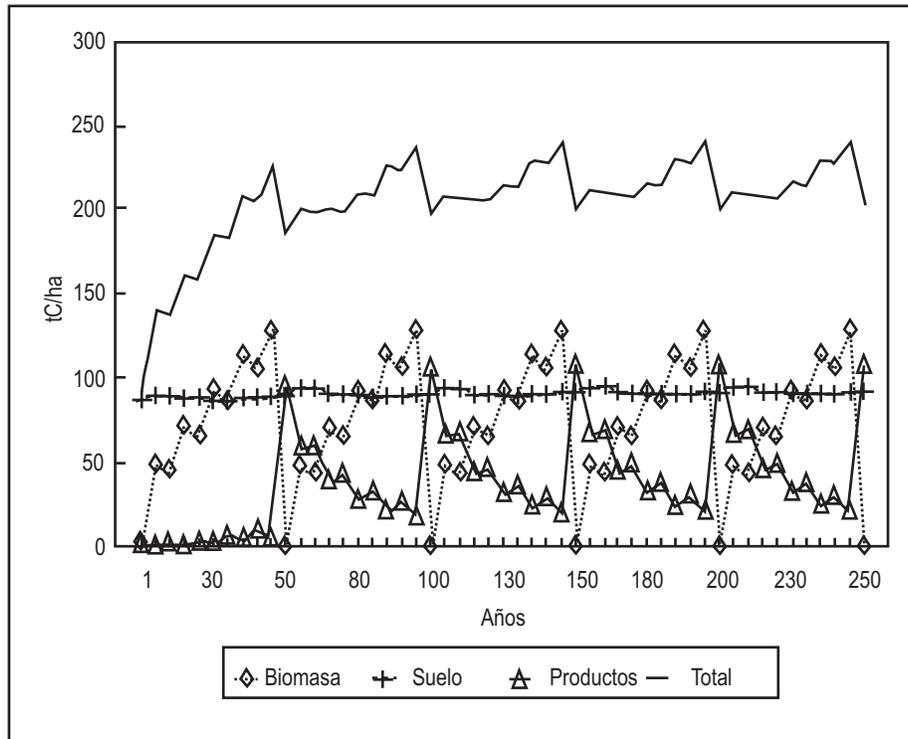


b) La figura 6.4, muestra la captura potencial de carbono en un rodal. Aquí se aprecia el incremento y decremento cíclico, es decir, la dinámica del carbono en cada uno de los diferentes almacenes.

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

productos después del primer turno. A partir de entonces este reservorio muestra un comportamiento cíclico.

Figura 6.4. Captura potencial de carbono en un rodal de *Pinus* en NSJP

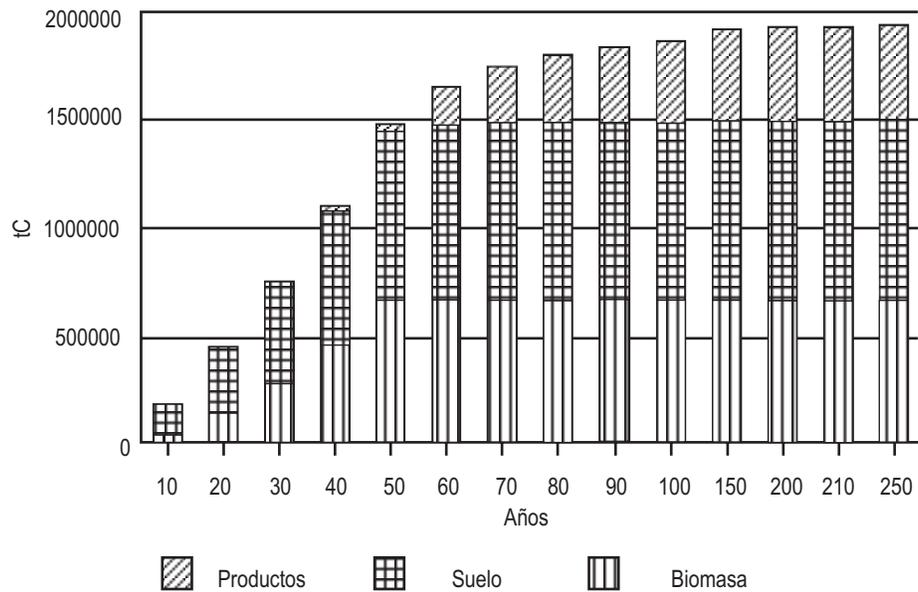


El potencial de captura total de carbono estimado para el bosque natural de la C.I. de NSJP mediante el empleo del modelo CO₂FIX fue de 1.5 MtC a los 50 años³, en una superficie de 8870 ha de *Pinus* (cuadro 6.9 y figura 6.5). En el cuadro 6.9, se observa que a partir del primer turno, la biomasa presenta un incremento constante en los valores del contenido de carbono hasta los 100 años, momento en que se estabiliza. El contenido de carbono en suelo a partir del año 60 comienza a estabilizarse y se incrementa ligeramente respecto al tiempo; en cuanto al contenido de carbono en los productos, hasta el año 200 comienza a estabilizarse (ver representación en la figura 6.5).

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

Cuadro 6.9. Captura potencial de carbono en el bosque natural de NSJP

Años	Biomasa (tC)	Suelo (tC)	Productos (tC)	Total (tC)
10	35917	141143	0	177060
20	139095	301067	2269	442432
30	278300	458333	8526	745158
40	455578	616083	19187	1090848
50	663797	776274	33991	1474062
60	661945	810477	168751	1641173
70	661187	815754	255128	1732069
80	660653	819242	311838	1791733
80	660653	819242	311838	1791733
90	660220	821633	349525	1831378
100	659848	823357	374879	1858084
150	659848	828127	421780	1909755
200	659848	831206	430390	1921444
210	659848	831752	431004	1922604
250	659848	833762	432227	1925837

Figura 6.5. Captura potencial de carbono en el bosque natural de NSJP

Respecto del contenido de carbono por hectárea, se obtuvo que, a largo plazo, la captura total unitaria alcanza 217 tC/ha, de los cuales 94 tC/ha provienen del suelo, 74 tC/ha de biomasa y 49 tC/ha de productos (ver cuadros 6.10 y 6.11).

Cuadro 6.10. Captura potencial de carbono en el bosque natural de NSJP por ha

Años	Biomasa (tC/ha)	Suelo (tC/ha)	Productos (tC/ha)	Total (tC/ha)
10	4	16	0	20
30	16	34	0	50
40	31	52	1	84
50	1	69	2	123
60	75	88	4	166
70	75	91	19	185
80	75	92	29	195
80	74	92	35	202
90	74	92	35	202
100	74	93	39	206
150	74	93	42	209
200	74	93	48	215
210	74	94	49	217
250	74	94	49	217
	659848	833762	432227	1925837

Cuadro 6.11. Captura de carbono en el bosque natural de NSJP por ha en el largo plazo (250 años)

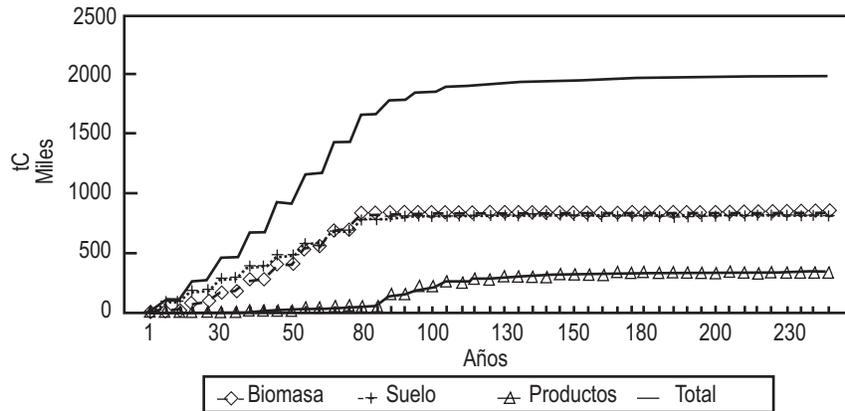
Captura de carbono en el largo plazo (250 años) en tC/ha	
Biomasa	74
Productos	49
Suelo	94
Total	217

6.6.1. ESCENARIOS ALTERNATIVOS

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

a) Al prolongar el turno a 80 años se observó que la captura total de carbono en el bosque a los cincuenta años era de 0.9 MtC, mientras que en el turno normal (de 50 años) era de 1.5 MtC. También se observó que al término del turno de 80 años la captura total de carbono fue de 1.6 MtC (figura 6.6) todavía menos que la captura del bosque con el turno original de 50 años. Sólo en el largo plazo la captura de carbono con un ciclo de 80 años resulta marginalmente mayor que en el ciclo original.

Figura 6.6. Captura de carbono en la plantación de NSJP, con un turno de 80 años



b) Al considerar que todo el aprovechamiento del bosque se almacena en productos con un tiempo de vida de 100 años, la captura de carbono, en lugar de estabilizarse a lo largo del tiempo continúa creciendo indefinidamente. Por ejemplo el carbono total almacenado se incrementa de 1.4 MtC a los 50 años a 3.0 MtC a los 250 años (figuras 6.7 y 6.8).

Figura 6.7. Contenido de carbono para un escenario donde los productos tienen un tiempo de duración de 100 años

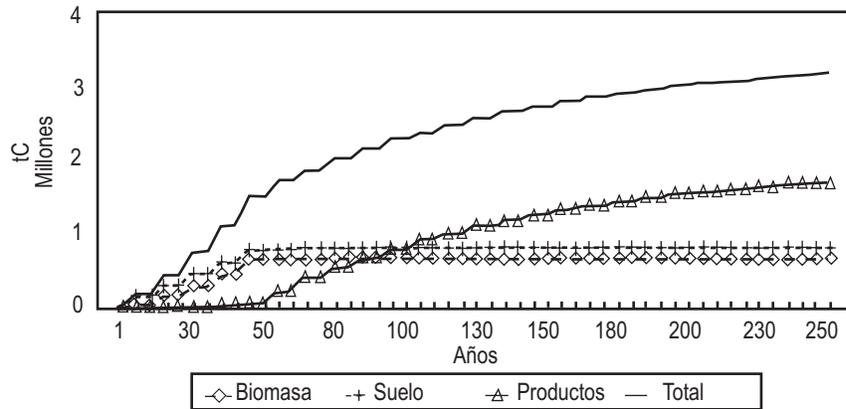
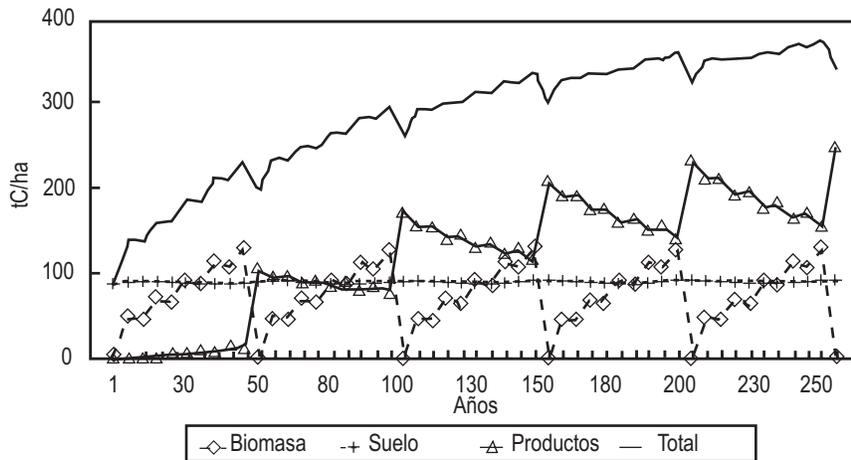


Figura 6.8. Contenido de carbono en un rodal con productos que tienen una duración de 100 años



VII

DISCUSIÓN

7.1. OBSERVACIONES GENERALES

7.1.1 CAPTURA DE CARBONO EN LOS ECOSISTEMAS FORESTALES

La dinámica del ciclo del carbono en los ecosistemas forestales es muy compleja, por lo que, para hacer una estimación del potencial de captura de carbono, es necesario analizar los distintos componentes que integran los ecosistemas. Esto implica analizar conjuntamente el carbono capturado en vegetación (aérea y subterránea), suelos (incluyendo materia en descomposición) y productos forestales. Para obtener la dinámica temporal de la captura de carbono es necesario utilizar modelos de simulación.

En este estudio se integró toda la información que fue posible obtener localmente, complementándola con estudios de caso de ecosistemas similares en otros países para poder ejecutar el modelo de simulación CO₂FIX y así realizar una estimación dinámica del potencial de captura de carbono en la comunidad de Nuevo San Juan Parangaricutiro.

7.1.2 MODELO DE SIMULACIÓN CO₂FIX

En el presente trabajo se utilizó el modelo dinámico CO₂FIX para Windows Ver. 1.2., para obtener la captura potencial de carbono en la comunidad de NSJP. La simulación se basó, en la medida de lo posible, en datos disponibles localmente. Específicamente la información disponible fue: a) superficie del área de estudio; b) manejo forestal: ciclos de aclareos, corta de regeneración y corta de liberación,

existencias reales (ER), y volumen de madera extraído; c) crecimiento del árbol: incremento corriente anual (ICA), diámetro, altura, edad, e incremento medio anual (IMA); y d) productos derivados, como papel, cajas de empaque, madera para construcción, madera para muebles, madera para energía y madera muerta.

El uso de modelos de simulación, permite realizar las estimaciones de captura de carbono de una manera más ágil y, al mismo tiempo, facilita la generación de escenarios alternativos a corto, mediano y largo plazos, asimismo se confirmaron aseveraciones previas en el sentido de poder estimar la captura de carbono usando estos modelos (Mohren y Goldewijk, 1990; Nabuurs y Mohren, 1993; Masera, 1994; De Jong *et al.*, 1995; Ordóñez, 1997). Sin embargo, los modelos requieren de una multitud de parámetros que no siempre se pueden obtener a nivel local.

7.1.3 PARÁMETROS

Los parámetros fueron obtenidos de la revisión exhaustiva de la literatura existente, siendo el estudio dasonómico del plan de manejo forestal de la comunidad indígena de NSJP (SARH, 1988) el que aportó mayor cantidad y calidad de datos. Uno de los parámetros más importantes para el modelo es la curva de crecimiento de la especie analizada, es decir el ICA por categoría de edad. Estos datos no son usualmente accesibles directamente de los planes de manejo forestal, por lo que se requiere un trabajo intenso de síntesis e integración de la información de base. En el presente estudio se obtuvo la curva del ICA a partir del análisis estadístico del crecimiento registrado en 210 rodales y subrodales que integran el bosque de NSJP.

Sin embargo, datos como: a) Parámetros fisiológicos (por ej., el incremento en volumen de las ramas, las raíces y el follaje, respecto al tronco), y b) contenido de carbono en suelo, detritus y humus, no estaban disponibles regionalmente y se obtuvieron de estudios de caso comparativos a nivel internacional.

7.2 COMPARACIÓN DE ESTIMACIONES DE CAPTURA POTENCIAL DE CARBONO CON OTROS ESTUDIOS

Para saber si la estimación realizada por el modelo es cercana a estimaciones derivadas de muestreo directo, se compararon los resultados obtenidos en la captura de carbono en el largo plazo con los de estudios previos. El valor estimado

para otras especies de *Pinus* es cercano a la estimación realizada en este trabajo, siendo las 217 tC/ha un dato conservador. Es importante resaltar que estudios previos, a excepción de Nabuurs y Morhen (1993), no contemplan el carbono almacenado en productos forestales, como se hizo en este trabajo (cuadro 7.1).

Cuadro 7.1. Comparación de resultados con estudios previos

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

n. d. = no determinado; c. b. = contenido en la biomasa.

Fuente: a: De Jong *et al.*, 1997, b: Nilsson y Schopfhauser, 1995, c: Nabuurs y Morhen, 1993.

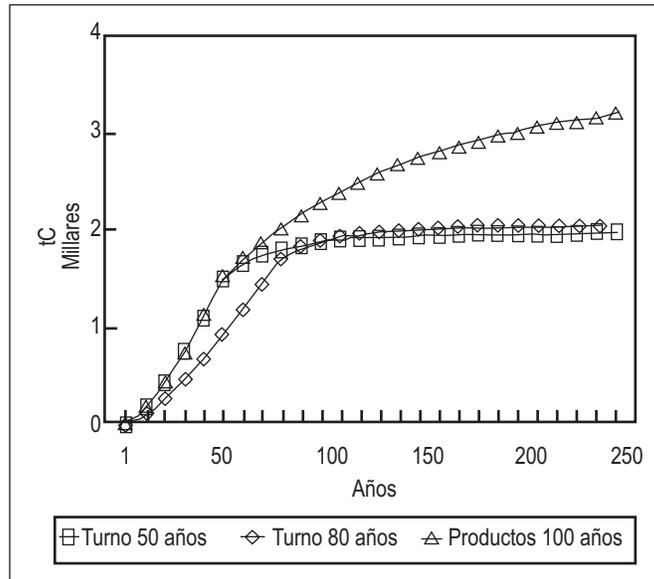
7.3. COMPARACIÓN DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS DE CAPTURA POTENCIAL

Los resultados obtenidos se compararon con dos escenarios: a) se prolonga el turno de 50 a 80 años y b) se asigna un tiempo de vida de 100 años a los productos. Como resultado de esta comparación, podemos concluir que alargar el ciclo de rotación produce sólo beneficios marginales en términos de la captura total de carbono y éstos se dan a muy largo plazo. Por el contrario, transformar la madera extraída en productos de tiempos de vida muy largos produce una ganancia sustantiva en cuanto a la captura total de carbono en los bosques de la comunidad (figura 7.1).

7.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

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

Figura 7.1. Análisis comparativo de los dos turnos y el incremento en la vida de los productos



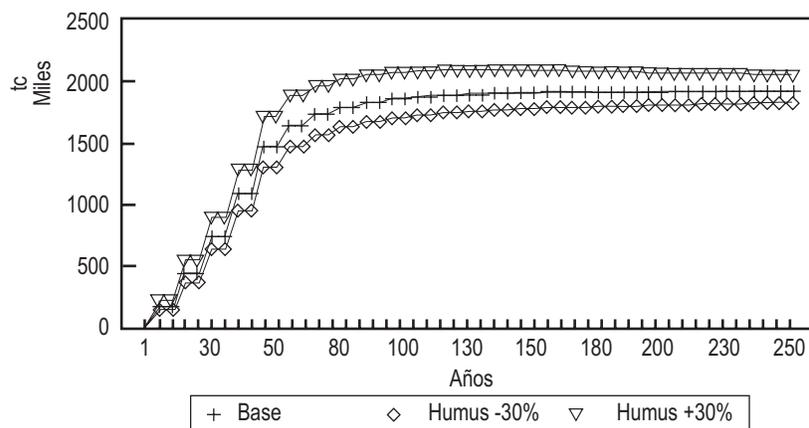
Para este fin se seleccionaron tres tipos de parámetros sobre los que se estima existe la mayor incertidumbre en la estimación del potencial de captura de carbono en NSJP. Se aplicaron variaciones en sus valores de -30% y +30% para compararlos con los valores base. El porcentaje de variación se aplicó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

- a) Carbono contenido en el humus
- b) Tiempo de residencia promedio en los productos:
 - tiempo de residencia promedio de madera muerta en el bosque
 - tiempo de residencia promedio del papel
 - tiempo de residencia promedio del aglomerado
 - tiempo de residencia promedio de madera para energía
 - tiempo de residencia promedio de madera para empaque
 - tiempo de residencia promedio de madera para la construcción
- c) Coeficientes de humificación y descomposición:
 - Tasa de humificación
 - Tasa de residencia promedio del detritus
 - Tasa de residencia promedio del humus estable.

La sensibilidad observada en el análisis fue la siguiente:

a) Para el carbono contenido en la biomasa inicial del humus se obtuvo una diferencia de ± 100 KtC con respecto a la estimación base. Esta diferencia (que se observa en la figura 7.2) tiende a estabilizarse en el largo plazo (cerca de los 500 años). Es decir, aun cuando el desarrollo del bosque comience con una diferencia de más 30% y de menos 30% en el contenido de carbono en el humus en el largo plazo, el carbono total será aproximadamente el mismo.

Figura 7.2. Sensibilidad del carbono contenido en la biomasa inicial del humus en tres casos: base -30% y +30% respecto de la base



b) Para el tiempo de residencia promedio en los productos se obtuvo una diferencia de ± 100 KtC en el largo plazo, considerado de 250 años (figura 7.3). Estas diferencias representan el equivalente a $\pm 5\%$ de la captura de carbono respecto de la estimación base, por lo que podemos concluir que no es tan crítico utilizar estimaciones generales de los tiempos de residencia ante la ausencia de datos locales.

c) Para los coeficientes de humificación y descomposición se obtuvo una diferencia de ± 300 KtC en el largo plazo. Al término del primer turno la diferencia se incrementa notablemente, tanto que al finalizar el quinto turno alcanza 300 KtC. En la figura 7.4 se observa su comportamiento, donde se ve que el incremento tiende a ser mayor en el largo plazo, diferencia que constituye una ganancia muy importante en la obtención de créditos en la captura de carbono, mismos que se pueden perder en caso de tener un 30% menor en los coeficientes de humificación y descomposición.

Figura 7.3. Sensibilidad en el tiempo de residencia promedio en los productos en tres casos: base -30% y +30% respecto de la base

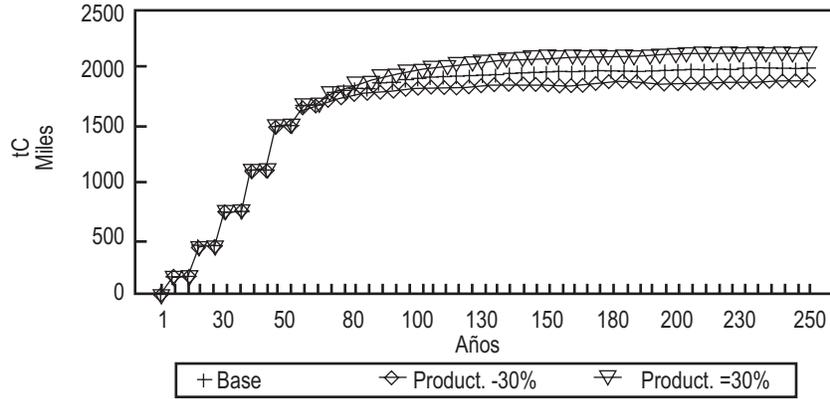
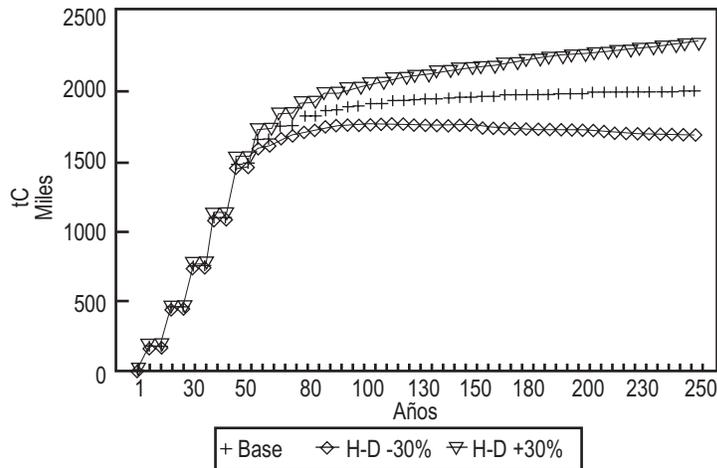


Figura 7.4. Sensibilidad en los coeficientes de humificación y descomposición en tres casos: base -30% y +30% respecto de la base



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

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

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

7.5. CONTRIBUCIÓN DE ESTE ESTUDIO AL CONOCIMIENTO DE LA CAPTURA DE CARBONO

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

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

VIII

CONCLUSIONES

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

Como resultado del presente trabajo se estimó que:

- Al término del turno (50 años) la captura potencial de carbono para el bosque de Nuevo San Juan Parangaricutiro (NSJP) es de 1.5 millones de tC, para una superficie de 8,870 ha del género *Pinus*. En el largo plazo (250 años) esta captura se estabiliza en 1.9 millones de tC, equivalentes a 217 tC/ha.
- Si se quisiera aumentar la captura potencial de carbono en el área de bosques naturales, la línea más promisoría sería derivar la cosecha de madera a productos con tiempo de residencia muy largos.
- El análisis de sensibilidad demuestra que la estimación base es bastante robusta en relación con la variación de parámetros críticos. La mayor sensibilidad se presenta respecto de las incertidumbres con las tasas de humificación y descomposición.

Respecto del uso del modelo CO₂FIX, se pudo notar que su versión actual tiene ciertas limitaciones para la estimación de captura de carbono en bosques naturales. Específicamente, sólo trabaja con una especie forestal y no incluye la biomasa contenida en el sotobosque. Sería conveniente que futuras versiones del modelo permitan integrar más especies forestales, incluir la biomasa contenida el sotobosque y estimar la captura neta al considerar la biomasa inicial y restarla de la biomasa final.

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

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

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

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

Finalmente, si tomamos en cuenta que a nivel internacional se ha fijado un precio aproximado de US \$10/tC por concepto de captura de carbono como “servicio ambiental” en proyectos forestales (Montoya *et al.*, 1995; De Jong *et al.*, 1998), se generaría una derrama económica considerable para la C.I. de NSJP. De hecho, considerando una captura neta de alrededor de 100 tC/ha, los beneficios mínimos estimados serían del orden de \$9 millones de dólares. Este recurso ayudaría a conservar los bosques de la comunidad y a seguir obteniendo otros beneficios, como conservación de suelo, acumulación de agua, almacenamiento y reciclaje de nutrientes, limpieza del aire, y sobre todo, conservación y mantenimiento de la riqueza y diversidad biológica del lugar.

IX

BIBLIOGRAFÍA

- Ahuja, D.R., 1990. Estimating Regional Anthropogenic Emissions of Greenhouse Gases. Report # 20p-20006, United States Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Washington, D.C. (Septiembre).
- Ajtay, G.L., P. Ketner y P. Duvigneaud, 1997 Terrestrial Primary Production and Phytomass. En: B. Bolin, E.T. Degens, S. Kempe, y P. Ketner (eds.). *The Global Carbon Cycle*. Published on behalf of the Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) of the International Council of Scientific Unions (ICSU). *SCOPE*, 13, pp. 129-181.
- Apps, M.J., W.A. Kurz, R.J. Luxmoore, L.O. Nilsson, R.A. Sedjo, R. Schmidt, L.G. Simpson, y T.S. Vinson, 1993. Boreal Forests and Tundra. In Wisniewski, J. y R.N. Sampson (Eds). *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 39-53.
- Bello, M.A. y J.N. Labat, 1987. *Los encinos (Quercus) del Estado de Michoacán, México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. SARH y Centre D' Etudes Mexicaines et Centroamericaines. Collection Etudes Mesoamericaines. México. 98 pp.
- Bolin, B., B.R. Döös, J. Jager y R.A. Warrick, 1986. *The Green House Effect, Climate Change and Ecosystems*. Ed. John Wiley & Sons.
- Bocco, G., A. Torres, J. Velázquez y C. Siebe. 1998. Geomorfología y Recursos Naturales en Comunidades Rurales. El caso de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. *Geomorfología y Desarrollo*, 16, 71-84.
- Brown, S., Ch. Hall, W. Knabe, J. Raich, M. Trexler, y P. Woomer, 1993. Tropical Forest: their Past, Present and Potential Future Role In The Terrestrial Carbon Budget. *Water, Air and Soil Pollution*, 70, pp. 71-94.
- Buringh, P. 1984. "Organic carbon in soils of the world", en G.M. Woodwell (ed): *The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle: measurement by remote sensing*. SCOPE 23. Published on behalf of the scientific committee on problems of the environment. John Wiley & Sons. Chichester, pp. 91-110.
- Cairns, M., J. Barker, R. Shea, y P. Haggerty, 1995. Carbon Dynamics of Mexican Tropical Evergreen Forest: Influence of Forestry Mitigation Options and Refinement of Carbonflux Estimates. *Interciencia*, 20:6, pp. 401-408.
- Cannell, M.G.R. (ed.), 1982. *World Forest Biomass and Primary Production Data*. Natural Environment Research Council. Institute of Terrestrial Ecology. Academic Press New York. 391 pp.
- Cuanalo de la C.H., E.T. Ojeda, A.O. Santos y C.A. Ortiz, 1989. Provincias y subregiones terrestres de México. Colegio de Postgraduados. Centro de Ecología. Chapingo, México. 624 pp.
- De Jong, B., G. Montoya-Gómez, K. Nelson, L. Soto-Pinto, J. Taylor, y R. Tipper, 1995. Community Forest Management and Carbon Sequestration: a Feasibility Study from Chiapas, Mexico. *Interciencia*, 20:6, pp. 409-416.
- De Jong, B., M.A. Cairns, N. Ramírez-Marcial, S. Ochoa-Gaona, J. Mendoza-Vega, P.K. Haggerty, M. González-Espinosa y I. March-Mifsut, 1998. Land-use change and carbon flux between the 1970s and 1990s in the central highlands of Chiapas. Mexico. *Environmental Management* (Aceptado el 4 de junio de 1998)
- Detwiler, R.P., C.A.S. Hall, y P. Bogdonoff, 1985. Land Use Change and Carbon Exchange in the Tropics II: Estimates for the Entire Region. *Environmental Management*, 9:4, pp. 335-344.

- De Vries, W., A. Hol y S. Tjalma, 1990. *Literatuurstudie naar voorraden en verblijftijden van elementen in bosecosystemen*. Staring Centrum, Instituut voor onderzoek van het landelijk gebied. Rapport 94. Wageningen. 205 pp.
- Dixon, R.K., J.A. Sathaye, S.P. Meyers, O.R. Masera, A.A. Makarov, S. Toure, W. Makundi y S. Wieg, 1996. Greenhouse Gas Mitigation Strategies: Preliminary Results from the U.S. Country Studies Program. *Ambio*, 25:1, pp. 26-32.
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler, y J. Wisniewski, 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, 263, pp. 185-190.
- García, E., 1964. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). México, D.F. Offset Larios. 3ª ed. corregida y aumentada 1988.
- Gay, C. y J. Martínez., 1995. Mitigation of Emissions of Greenhouse Gases in Mexico. *Interciencia*, 20:6, pp. 336-342.
- Goudie, A., 1990. *The Human Impact on the Natural Environment*. Basil Blackwell Ltd, Oxford, U.K. 3rd Edition. 388 pp.
- Grijpma, I.P., 1984. *Producción Forestal*. Ed Secretaría de Educación Pública (SEP)/Trillas, 3ª Reimpresión. México, D.F. 134 pp.
- Heath, L.S., P.E. Kauppi, P. Burschel, H. Gregor, R. Guderian, G.H. Kohlmaier, S. Lorenz, D. Overdieck, F. Scholz, H. Thoasius, y M. Weber, 1993. Contribution of Temperate Forests to the World's Carbon Budget. In Wisniewski, J. y R.N. Sampson (Eds). *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂*. Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands, pp. 55-69.
- Houghton, R.A. y C.M. Woodwell. 1989. Global Climate Change. *Scientific American*, 260:4, pp. 36-40.
- Houghton, R.A., J.E. Hobbie, J.M. Melillo, B. Moore, B.J. Peterson, G.R. Shaver y C.M. Woodwell, 1983. Changes in the Carbon Content of Terrestrial Biota and Soils Between 1860 and 1980: A Net Release of CO₂ to the Atmosphere. *Ecological Monographs*, 53:3, pp. 235-262.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1990. *Climate Change 1990*. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1992. *Climate Change 1992*. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1995. *Climate Change 1995*. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kauppi, P.E. y E. Tomppo, 1993. Impact Of Forests on Net National Emissions of Carbon Dioxide in West Europe, *Water, Air, and Soil Pollution*, 70, pp. 187-196.
- Kimmins, J.P., D. Binkley, L. Chatarpaul y J. De Catanzaro, 1985. *Biogeochemistry of Temperate Forest Ecosystems: Literature on Inventories and Dynamics of Biomass and Nutrients*. Petawawa National Forestry Institute. Canadian Forestry Service. Information Report PI-X-47E/F.
- Lashof, D.A y D.R. Ahuja, 1990. Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming. *Nature*, 344:5, pp. 529-531.
- Lemus, O., 1995. Propuestas para el mejoramiento de dos agroecosistemas tipo en la Región Purhépecha, Michoacán. Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía. Marín, N.L.
- 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.
- Martínez, M., 1948. *Los pinos mexicanos*. Segunda edición, Ed. Botas. México, D.F. 360 pp.
- Masera, O., 1991. México y el cambio climático global: un balance crítico. *Ciencia y Desarrollo*, 17:100, pp. 52-67.
- Masera, O., 1995a. Carbon Mitigation Scenarios for Mexican Forests: Methodological Considerations and Results. *Interciencia*, 20:6, 388-395.
- Masera, O., 1995b. Desforestacion y Degradación Forestal en México. Documento de Trabajo 19. Grupo

- Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. Pátzcuaro, Micoacán, México. 50 pp.
- Masera, O., 1995c. Future Greenhouse Emission and Sequestration Scenarios from Land Use Change in Mexico. Report to UNEP from the Project Mexico's Country Study on Greenhouse Gas Emissions, Instituto Nacional de Ecología, Mexico City.
- Masera, O., 1995d. Los Bosques y El Cambio Climático Global. *Universidad de México*, 536-537, 43-47.
- Masera, O., M.R. Bellon, y G. Segura, 1995a. Forest Management Options for Sequestering Carbon in Mexico. *Biomass & Bioenergy*, 8:5, 357-367.
- Masera, O., T. Hernández, A. Ordóñez, y A. Guzmán, 1995b. Land Use Change and Forestry. In *Preliminary Inventory of National Greenhouse Gases: Mexico*, UNEP PROJECT # GF/4102-92-01 (pp/3011) Mexico City. 56-100. (sept.)
- Masera, O.R. y J.A. Ordóñez, 1996. Bosques y Cambio Climático Global: Referencias Seleccionadas. Reporte al Proyecto Estudio de País sobre Cambio Climático Global, Instituto Nacional de Ecología, U.S, Environmental Protection Agency.
- Masera, O.R. y J.A. Ordóñez, 1997. Forest Management Mitigation Options. En prensa.
- Masera O., M.J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change*, 35, 265-295.
- Millemann, R.E. y T.A. Boden, 1986. *Worldwide Organic Soil Carbon and Nitrogen Data*. Carbon Dioxide Information Centre. Oak Ridge National Laboratory for the US Department of Energy. 136 pp.
- Mintzer, I.M., 1992. *Confronting Climate Change. Risk Implications and Responses*. Cambridge, University Press, Cambridge.
- Morhen, G.M.J., J.F. Garza, O. Masera y G.J. Nabuurs, 1997. *User's Manual CO2Fix For Windows: a Dynamic Model of the CO2-Fixation in Forest Stands Version 1.2*. IBN Research Report-Instituto de Ecología de la UNAM. 26 pp.
- Mohren, G.M.J. y C.G.M. Klein Goldewijk, 1990. CO₂ Fix: A Dynamic Model of The CO₂ Fixation in Forest Stands. Rapport NR. 624, Research Institute For Forestry and Urban Ecology, Wageningen.
- Montoya, G., L. Soto, Ben de Jong, K. Nelson, P. Farias, Pajal Yakac Tic, J. Taylor y R. Tipper. 1995. Desarrollo Forestal Sustentable: Captura de Carbono en las Zonas Tzeltal y Tojolobal del Estado de Chiapas. Instituto Nacional de Ecología, Cuadernos de Trabajo 4. México, D.F.
- Nabuurs, G.J. y G.M.J. Mohren, 1993. *Carbon Fixation Through Forestation Activities: a Study of the Carbon Sequestering Potential of Selected Forest Types, Commissioned by the Foundation Face*. Report Ibn 93/4. Institute for Forestry and Nature Research, Forests Absorbing Carbondioxyde Emission. Netherlands. 206 pp.
- Nilsson, S. y W. Schopfhauser, 1995. The Carbon-Sequestration Potential of a Global Afforestation Program. *Climatic Change*, 30, 267-293.
- Ordóñez, A., 1998. El modelo CO₂Fix. Memorias del Taller de Metodologías para la Evaluación de la Captura de Carbono en el Área Forestal. México, D.F., Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP. Marzo 19 y 20.
- Ordóñez, A., 1998. Estimación del Potencial de Captura de Carbono. Memorias del Taller Participativo para la Conservación de la Biodiversidad de "El Carricito", Sierra de los Huicholes (o de Bolaños), Zapopan, Jalisco. Enero 8-10.
- Ordóñez, A., 1997. Estimación del Potencial de Captura de Carbono. Memorias del Taller de Captura de Carbono para la Región de los Tuxtlas. Veracruz, Ver., Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP. 8 de agosto.
- Ordóñez, A., 1997. El Modelo CO₂Fix. Puede consultarse en la siguiente dirección electrónica: http://www.ine.gob.mx/INE/documentos/ucc/cam_clima/chi18.htm.
- Ordóñez, A., 1997. Estimación del Potencial de Captura de Carbono para un Estudio de Caso de Bosque Templado en San Juan Nuevo Parangaricutiro, Mich. Resultados Preliminares. Memorias del Taller sobre Proyectos de Secuestro de Carbono e Implementación Conjunta. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. abril 11-12.

- Ordóñez, M.J. y O. Flores, 1995. *Áreas naturales protegidas*. PRONATURA, A.C. México, D.F. 43 pp.
- OECD, 1991. Estimation of Greenhouse Gas Emissions and Sinks. Final Report of the Expert Meeting, February, at Paris. Organization for Economic Cooperation and Development.
- Salati, E., 1990. Los Posible Cambios Climáticos en America Latina y el Caribe y sus Consecuencias. Report # 90-7-1223, Naciones Unidas and Comision Económica para America Latina y el Caribe-CEPAL. Santiago de Chile, 12-14 de Septiembre, 45 pag.
- Sampson, R.N., M. Apps, S. Brown, C. Cole, J. Downing, L. Heath, O. Ojima, T. Smith, A. Solomon y J. Wisniewski, 1993. Workshop Summary Statement: Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes-quantification of Sinks and Sources on CO₂. *Water, Air and Soil Pollution*, 70, pp. 3-15.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1988. Estudio de Manejo Integral del Recurso Forestal en la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, Municipio de Nuevo Parangaricutiro, Michoacán. Jefatura del Programa Forestal en el estado de Michoacán, Distrito de Desarrollo Rural Integral 087, Uruapan, Michoacán-Comisión de Silvicultura de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. 800 pp.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. (SARH). México, D.F. 81 pp.
- Schimel, D.S., 1995. Terrestrial Ecosystems and The Carbon Cycle. *Global Change Biology*, 1, 77-91.
- Schlamadinger, B. y G. Marland. 1996. *Full fuel cycle carbon balances of bioenergy and forestry options. Energy conversion and management*. 37:6/8, p. 813.
- Schneider, S.H., 1989. The Greenhouse Effect: Science and Policy. *Science*, 243:10, 271-281
- Smith, T.M., W.P. Cramer, R.K. Dixon, R. Leemans, R.P. Neilson, and A.M. Solomon, 1993. The Global Terrestrial Carbon Cycle. En Wisniewski, J. y R.N. Sampson (Eds). *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. pp. 19-37.
- Smith, T.M., W.P. Cramer, R.K. Dixon, R. Leemans, R.P. Neilson, and A.M. Solomon, 1993. The Global Terrestrial Carbon Cycle. *Water, Air and Soil Pollution*, 70, pp. 19-37
- Solomon, y J. Wisniewski, 1993. Workshop Summary Statement: Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes-quantification of Sinks and Sources on CO₂. *Water, Air and Soil Pollution*, 70, pp. 3-15.
- Tipper, R., 1998. Update on carbon offsets. *Tropical Forest Update*, 8:1, pp. 2-5.
- Varela, S., P. García, R. Cardoza y V. Sosa, 1995. Marco de Referencia sobre Estimaciones de Deforestación en México. Documento presentado al Grupo de Trabajo sobre Deforestación. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), México, D.F.

*Captura de carbono en un bosque templado:
el caso de San Juan Nuevo, Michoacán
de José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz*
se terminó de imprimir en junio de 1999 en los talleres de
Desarrollo Gráfico Editorial, S.A. de C.V.
Municipio Libre 175, Col. Portales, México D.F.

La edición y el cuidado de la producción estuvieron a cargo
de la Unidad de Participación Social, Enlace y Comunicación (UPSEC)
del Instituto Nacional de Ecología.

El tiraje fue de 1,000 ejemplares.

Agradecimiento

Este trabajo se publica en el marco del Programa Nacional de Acción Climática, con fondos del proyecto promovido por el Instituto Nacional de Ecología con la Agencia Internacional para el Desarrollo, del Gobierno de los Estados Unidos (USAID-523-G-0096-00058-00).