

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN TRES
ECOSISTEMAS DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA EL CIELO,
TAMAULIPAS, MÉXICO

TESIS DE DOCTORADO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

PRESENTA

M. EN C. RODRIGO RODRÍGUEZ LAGUNA

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

ENERO DE 2007

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN TRES
ECOSISTEMAS DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA EL CIELO,
TAMAULIPAS, MÉXICO


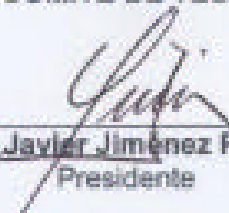



TESIS DE DOCTORADO

Como requisito parcial para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

Presenta

M. en C. RODRIGO RODRÍGUEZ LAGUNA

COMITÉ DE TESIS

 _____ Dr. Oscar A. Aguirre Calderón Secretario	 _____ Dr. Javier Jiménez Pérez Presidente	 _____ Dr. Eduardo Treviño Garza Vocal
 _____ Dr. Enrique Jurado Ybarra Vocal		 _____ Dr. José I. González Rojas Vocal

Linares, Nuevo León, México

Enero de 2007

Manifiesto que la presente investigación es original y fue desarrollada para obtener el grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Manejo de Recursos Naturales, donde se utiliza información de otros autores se otorgan los créditos correspondientes.

Rodrigo Rodríguez Laguna

Enero de 2007

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) por otorgarme el apoyo económico para mis estudios a través de una beca mediante el Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP).

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por el gran compromiso de formar personas con alto nivel académico en el área de Recursos Naturales.

Al Dr. Javier Jiménez Pérez por su confianza brindada, disposición, atinada dirección, valiosos consejos, invaluable amistad y todas las facilidades otorgadas para llegar a buen término esta investigación.

Al Dr. Oscar Aguirre Calderón por la confianza, consejos y amistad para lograr la meta de terminar esta investigación.

Al Dr. Eduardo Treviño Garza por sus valiosas sugerencias para publicar en revistas con prestigio y culminar con el presente estudio.

Al Dr. Enrique Jurado Ibarra por la confianza brindada y sus excelentes comentarios para llegar a buen termino el estudio.

Al Dr. José Ignacio González Rojas por su confianza y aceptar formar parte del comité de tesis.

A Claudio Castillo por brindarme apoyo en todo momento para tomar datos de campo y laboratorio y su apreciable amistad para culminar con este estudio.

A los compañeros de generación en Posgrado: Humberto, José, Rolando, Chuy, Jesús, Armando, Raúl, Eliud, Gabriel, Rafael, Antonio. Por compartir grandes momentos y experiencias de trabajo, así como por haber creado una amistad que estoy seguro perdurará por mucho tiempo.

A todas las personas que en este momento escapan de mi mente pero estoy seguro que brindaron su apoyo incondicionalmente para culminar en buen término este estudio, a todos Muchas Gracias.

DEDICATORIA

A MIS PADRES:

Esther Laguna Cisneros e Hilario Rodríguez Vargas por creer en mí y darme lo mejor de ellos para que yo pudiera abrirme camino, por los buenos consejos y enseñarme que el respeto, la humildad y la disciplina es la llave para vivir en armonía dentro de la familia.

A MI ESPOSA:

Iris González Ríos GRACIAS por todo tu amor que me has demostrado, por todo tu apoyo y todos los momentos felices que hemos compartido. Este logro también es tuyo, Te Amo.

A MIS HERMANOS:

Gloria, Ismael, Rafael, Medardo, Estela, Magdalena e Hilario por ser constantes en mantener la unión y comunicación con toda la familia, por compartir con ustedes muchos pero muchos inolvidables momentos.

A MIS CUÑADOS (AS):

Por mantener la sencillez y hacer más placentera la vida al lado de la familia.

A MIS SUEGROS:

Por brindarme apoyo y confianza para formar un hogar con su hija.

A MIS SOBRI NOS (AS):

Por ser la alegría, esperanza y la unión de la familia a todos los quiero mucho.

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN GENERAL	vii
SUMMARY	ix
CAPÍTULO 1	
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. OBJETIVO GENERAL	12
1.2. HIPÓTESIS	13
1.3. LITERATURA CITADA	13
CAPÍTULO 2	
2. CARBONO CONTENIDO EN EL BOSQUE TROPICAL SUBCADUCIFOLIO	19
RESUMEN	19
SUMMARY	20
2.1. INTRODUCCIÓN	20
2.2. MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.2.1. Diseño de muestreo	24
2.2.2. Selección de los sitios de muestreo	26
2.2.3. Selección de árboles para medición de carbono	26
2.2.4. Determinación del carbono en muestras de madera	27
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29

2.3.1. Diversidad de especies	29
2.3.2. Estimación de biomasa	30
2.3.3. Estimación de carbono	35
2.4. CONCLUSIONES	37
2.5. LITERATURA CITADA	38

CAPÍTULO 3

3. ESTIMACIÓN DEL CARBONO ALMACENADO EN UN BOSQUE MESOFILO	44
RESUMEN	44
ABSTRACT	44
3.1. INTRODUCCIÓN	45
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS	49
3.2.1. Selección de los sitios en campo	49
3.2.2. Funciones volumétricas y de biomasa	50
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
3.3.1. Categorías diamétricas	52
3.3.2. Inventario de carbono	59
3.4. CONCLUSIONES	60
3.5. LITERATURA CITADA	61

CAPÍTULO 4

4. ESTIMACIÓN DE CARBONO ALMACENADO EN EL BOSQUE DE PINO-ENCINO	66
RESUMEN	66
ABSTRACT	66

4.1. INTRODUCCIÓN	67
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS	71
4.2.1. Diseño de muestreo	72
4.2.2. Selección del sitio de muestreo	73
4.2.3. Selección de árboles en la medición de carbono	73
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
4.3.1. Características dasométricas	77
4.3.2. Biomasa en especies arbóreas	79
4.3.3. Estimación de carbono	84
4.4. CONCLUSIONES	85
4.5. LITERATURA CITADA	86

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES GENERALES	94
6. AGRADECIMIENTOS	95

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Tipo de gas y su contribución al efecto invernadero (Goudie, 1990; Krupa, 1999).	5
Cuadro 2. Coeficiente de determinación (R^2), valor de F y coeficientes de regresión (a_0 , a_1) para estimar biomasa en árboles individuales por especie en el BTS.	33
Cuadro 3 Distribución del carbono secuestrado en los depósitos del BTS dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.	37
Cuadro 4 Coeficiente de determinación (R^2) y valor de F para estimar volumen en especies del bosque mesófilo.	55
Cuadro 5 Número de individuos y biomasa por hectárea en categorías diamétricas por especie dentro del bosque mesófilo.	57
Cuadro 6 Coeficientes de la regresión (a_0 , a_1) para estimar biomasa en especies del bosque mesófilo.	58
Cuadro 7 Valores de carbono total por especie encontrado en el bosque mesófilo.	60
Cuadro 8. Ecuaciones lineales y no lineales para estimar biomasa en especies de un bosque de pino-encino.	75
Cuadro 9 Coeficiente de determinación (R^2), valor de F y coeficientes de la regresión (a_0 , a_1) en la determinación de biomasa por especie.	80
Cuadro 10 Distribución del carbono presente en los depósitos del bosque de pino-encino dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Contribución porcentual de las emisiones de carbono por región en el año 2000.	2
Figura 2. Se muestra el efecto invernadero que ocurre en la tierra.	3
Figura 3. Distribución de emisiones de CO ₂ por sectores en México.	7
Figura 4. Depósitos de carbono en un ecosistema forestal.	10
Figura 5. Ubicación de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México.	24
Figura 6. Vegetación característica del bosque tropical subcaducifolio	25
Figura 7. Representación de un sitio de muestreo en campo.	25
Figura 8. Equipo Solids TOC Analyzer en la Facultad de Ciencias Forestales-UANL.	28
Figura 9. Número de individuos por hectárea por categoría diamétrica en el BTS dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo.	30
Figura 10. Curvas de ajuste para estimar biomasa en: (A) <i>Robinsonella discolor</i> y (B) <i>Harpalyce arborescensis</i> en el BTS.	31
Figura 11. Vegetación característica del bosque mesófilo de montaña en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.	48
Figura 12. Número de individuos por categoría diamétrica por hectárea en el bosque mesófilo.	52
Figura 13. Determinación de volumen para <i>Carpinus caroliniana</i> en el bosque mesófilo.	54
Figura 14. Determinación de biomasa en <i>Carpinus caroliniana</i> en el bosque mesófilo.	56

Figura 15.	Vegetación característica del bosque de pino-encino en Tamaulipas.	72
Figura 16.	Número de individuos por hectárea por categoría diamétrica en un bosque de pino-encino dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.	78
Figura 17.	Curvas de ajuste para estimar biomasa en <i>Pinus teocote</i> (A) y <i>Quercus germana</i> (B) en el bosque de pino-encino.	82

RESUMEN GENERAL

Los bosques y selvas son los almacenes más importantes del mundo y son los responsables de la mayor parte de los flujos de carbono entre la tierra y la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración. En ese sentido, la Reserva de la Biosfera El Cielo, localizada al sur del estado de Tamaulipas, participa con grandes extensiones de distintos tipos de vegetación, motivo para justificar el presente estudio que tiene como objetivo principal evaluar la capacidad de almacenamiento de carbono en tres ecosistemas: bosque tropical subcaducifolio, bosque mesófilo de montaña y bosque de pino-encino mediante elementos arbóreos y/o arbustivos. Además, se determinó la distribución del carbono almacenado en la parte aérea y radicular. El muestreo se realizó en sitios de 1000 m², dividido en cuatro cuadrantes de 250 m². En el cuadrante I se midieron los árboles, arbustos y renuevos. La necromasa se pesó en una parcela interior de 25 m². En los cuadrantes II, III y IV se evaluaron los individuos con un diámetro (1.3 m) mayor a 5 centímetros y se pesó en cada cuadrante la hojarasca localizada en 1 m². Para determinar la cantidad de biomasa en cada ecosistema se generaron ecuaciones alométricas por especie. La biomasa de la hojarasca, necromasa y renuevos se estimó con el peso seco obtenido de submuestras en cada ecosistema.

El contenido de carbono se midió con el equipo solids TOC analyzer para las especies arbóreas del bosque de pino-encino, mientras que para el bosque tropical subcaducifolio y bosque mesófilo de montaña se utilizó el factor de conversión de carbono de 0.5 que contiene la biomasa seca.

El bosque de pino-encino almacena en promedio 110 tC ha⁻¹ en fustes, ramas, hojas, renuevos, necromasa, hojarasca y raíces. En esos mismos componentes, el bosque tropical subcaducifolio almacena en promedio 94.6 tC ha⁻¹, mientras que el bosque mesófilo de montaña almacena 56.7 tC ha⁻¹, en árboles y arbustos mayores de cinco centímetros de diámetro normal.

La superficie muestreada de los tres ecosistemas corresponden al 21.5% de la superficie total del área natural protegida, en dicha superficie se almacenan más de 2 766 327.1 tC. La mayor proporción se ubica en el fuste, ramas y hojas (79.6%), en las raíces se localiza el 11.8%, en la hojarasca se almacena el 7.8%, mientras que en la necromasa y regeneración se encuentra sólo el 0.4 y 0.5% respectivamente del carbono total de los tres ecosistemas de la Reserva de la Biosfera El Cielo.

SUMMARY

The forests and forests are the most important stores of the world and they are the responsible for most of the flows of carbon (C) between the earth and the atmosphere through the photosynthesis and the respiration. In that sense, the reserve of the biosphere El Cielo participates with great extensions of different types of vegetation, motive to justify the present study that has as objective to evaluate the capacity of storage of C in three ecosystems (tropical deciduous forest (BTS), mesophyll of mountain forest (BMM), pine-oak forest (BPE)) with arboreal and/or bushy elements inside the reserve, also, to determine the distribution of the C stored in the aerial part and the roots. The work was developed in the year 2004 in the three ecosystems, the sampling was realized in places of 1000 m² divided in four quadrants of 250 m², in the quadrant I, all the trees, bushes and sprouts were measured, also, weighing the rotten wood in a parcel of 25 m²; inside the quadrants II, III and IV, were only measured the trees and bushes of same or bigger to five centimeters of normal diameter, and weight for each quadrant the fallen leaves that is in 1 m². To determine the quantity of biomass in each ecosystem, equations allometric were generated by species. The biomass of the rotten wood, the fallen leaves and sprouts were estimated with the obtained dry weight of samples for each ecosystem. The biomass of roots was estimated of agreement with the literature that says, the biomass of roots it is 20% of the aerial total biomass of the tree. The content of C was obtained with the solids TOC analyzer for species of the BPE, while for the BTS and BMM was used

the factor of conversion of C that contains the dry biomass of 0.5 that mentions the literature. The BPE stores on the average 110 t C ha^{-1} in steams, branches, leaves, sprouts, the rotten wood, the fallen leaves and roots, in those same components the BTS stores 94.6 t C ha^{-1} , while the BMM stores 56.7 t C ha^{-1} only in steams of trees and bushes of same or bigger than five centimeters of normal diameter. The surface samples of the three ecosystems corresponds to 21.5% of the total surface of the protected natural area, in this surface are stored $2\,766\,327.1 \text{ t C}$, the major part is in the stems, branches and leaves (79.6%), in the roots are stays 11.8%, in the fallen leaves 7.8% is stored, while in the rotten wood and sprouts is only the 0.4 and 0.5% respectively of the total C of the three ecosystems in the reserve of the biosphere El Cielo.

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Uno de los fenómenos atmosféricos de mayor importancia mundial, es el cambio climático derivado del incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, mismos que provocan el incremento de la temperatura global de la atmósfera. Este fenómeno se debe a dos causas principales que son: el consumo de combustibles fósiles por las naciones industrializadas (Brown y Lugo, 1982; Garduño, 2004)) como causa principal. La mayor parte de los procesos productivos, el transporte, la producción de cemento, la generación de electricidad y los sistemas domésticos dependen de la energía derivada de los combustibles fósiles. La emisión se ha incrementado 3.5 veces desde 1950 hasta la década de los 90's, y el volumen de dióxido de carbono se calcula aproximadamente en 6.2 billones por año. La segunda causa es el cambio de uso del suelo, anualmente se deforestan aproximadamente 17 millones de hectáreas, lo que significa una liberación de cerca de 1.8 billones de toneladas de carbono, que corresponde del total de las emisiones antropogénicas (Montoya *et al.*, 1995).

Las emisiones en el año 2000 expresadas en términos de carbono se muestran en la figura 1. En las nueve regiones consideradas a nivel mundial existen ciertos países

que tienen mayor contribución, tal es el caso de Estados Unidos, que aporta 92.6% de la región Norteamérica. En Asia, China aporta 92.6% de las emisiones de esta región y es el principal productor de carbón y cemento en el mundo.

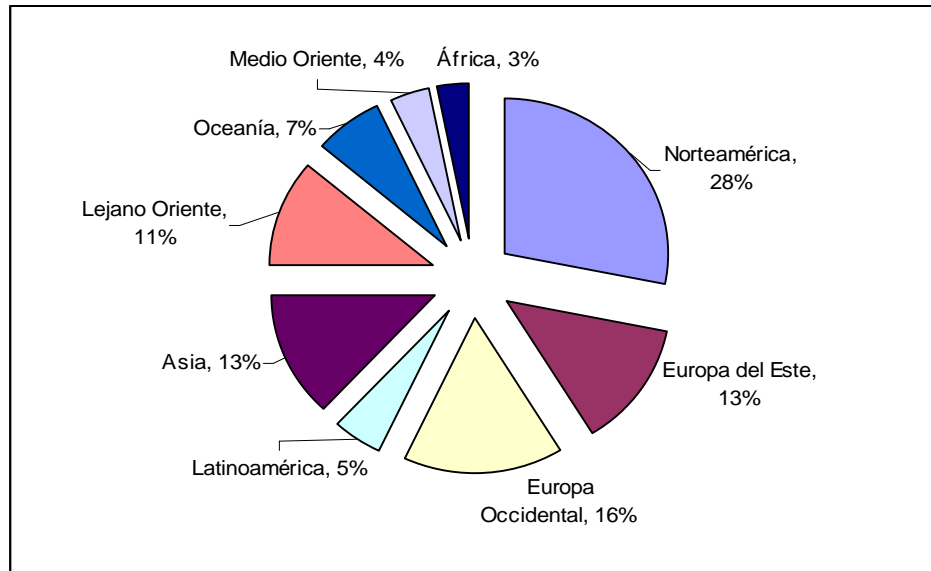


Figura 1. Contribución porcentual de las emisiones de carbono por región en el año 2000.

El calentamiento global es producto del 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), que es el responsable del 71.5% del efecto invernadero (Lashof y Ahuja, 1990; Houghton, 1997) y otros gases con concentraciones menores producen el mismo efecto, tales como el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), el ozono (O_3), el bióxido de azufre (SO_2), los clorofluorocarbonos (CFC) y el vapor de agua que fluctúa durante el año (Houghton y Woodwell, 1989; Dixon *et al.*, 1994; Masera, 1995a).

El efecto invernadero ocurre por la incidencia de los gases en la atmósfera que permiten la mayor parte de la radiación solar penetrar hasta la superficie del planeta,

mientras que absorben y reemiten una fracción de la radiación infrarroja que el planeta emite de regreso al espacio exterior (Figura 2). Cuanto mayor es la concentración de los gases de efecto invernadero, menor es la cantidad de radiación infrarroja que el planeta libera al espacio exterior. De esta manera al aumentar la concentración de gases de efecto invernadero, se incrementa la cantidad de calor atrapado en la atmósfera, dando origen a que se eleve la temperatura superficial del planeta (Anderson, 1987; GraBl *et al.*, 2001).

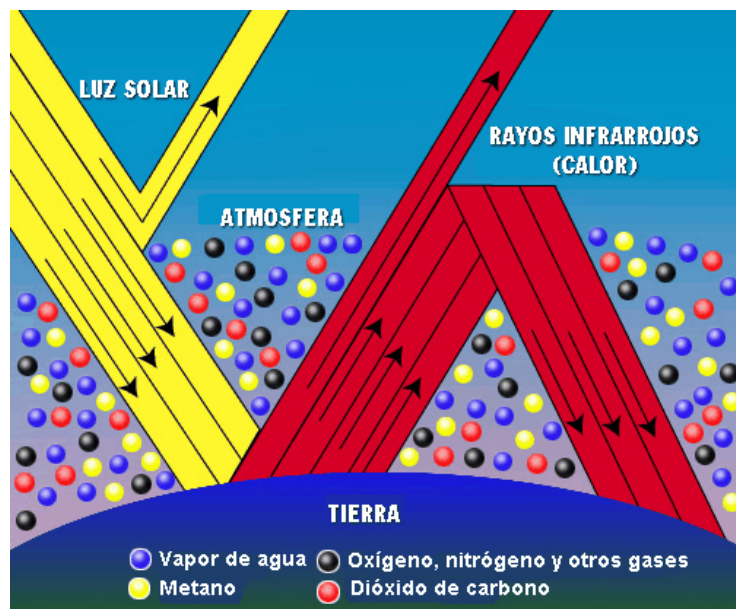


Figura 2. Se muestra el efecto invernadero que ocurre en la tierra.

Por la amenaza que el cambio climático global representa para la humanidad, se reunieron en Kyoto, Japón, en 1997, delegados de 38 países para analizar la situación. En esa reunión los representantes de los países industrializados se comprometieron a reducir, para el periodo 2008 - 2012 por lo menos 5.2% el total de la emisiones de

gases de efecto invernadero de sus respectivas naciones con respecto a los niveles de emisión de 1990 (Documento del Protocolo de Kyoto).

El Protocolo de Kyoto incluye tres mecanismos de flexibilización para ser utilizados en el cumplimiento de los compromisos de la Convención: aplicación conjunta, comercio de emisiones y Mecanismo de Desarrollo Limpio. El Mecanismo de Desarrollo Limpio está definido en el artículo 12 del Protocolo de Kyoto y se refiere a actividades de mitigación del cambio climático, entre los países industrializados y los países en desarrollo. La idea fundamental del Mecanismo de Desarrollo Limpio parte del hecho que los Gases de Efecto Invernadero que están ocasionando los trastornos climáticos, se distribuyen uniformemente en la atmósfera y por lo tanto la reducción y/o secuestro de estos gases en cualquier sitio del planeta produce el mismo efecto. Esta acción, permite a los países industrializados comprometidos en reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero van a efectuar dichas reducciones mediante acciones, a través de proyectos, en los países en desarrollo donde los costos de reducción son inferiores a los costos equivalentes en los países industrializados. Tal es el caso de el sistema de Bonos de Carbono los países desarrollados pueden comprar bonos de carbono, financiando así proyectos de captura o abatimiento de estos gases en otras naciones (principalmente en vías de desarrollo), acreditando tales disminuciones como propias. Esto abarata significativamente los costos de cumplimiento. En concreto, esto significa que una empresa de un país en desarrollo que disminuye sus emisiones de CO₂ puede vender esta reducción a países desarrollados que estén obligados a emitir menos gases de efecto invernadero, generando beneficios tanto económicos como ambientales.

La mayoría de estos gases tienen una residencia atmosférica, que ocurre 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; Houghton, 1997). Sin embargo Krupa (1999) indica que a pesar de que la mayoría de los gases de la atmósfera no son nuevos y provienen de fuentes naturales (Cuadro 1), estos han sufrido cambios significativos de su concentración en tiempo y espacio, mayormente influida esta variación por actividades antropogénicas.

Cuadro 1. Tipo de gas y su contribución al efecto invernadero (Goudie, 1990; Krupa, 1999).

Gas	Fuente antropogénica	C. A. (ppb)	I. A. C (%)	T. R. A. (años)	Contribución (%)
CO₂	Uso de combustibles fósiles, leña y deforestación.	353,000	0.5%	50-200	22.0
CH₄	Cultivo de arroz, ganado, tiraderos de basura y uso de combustibles fósiles.	1,720	0.9%	10	2.4
NO_x	Fertilizantes químicos, deforestación, uso de leña.	310	0.2%	150-180	4.2
CFC	Aerosoles, refrigerantes y aislantes.	3	5%	65-130	-----
Ozono	-----	-----	-----	-----	7.3
Vapor de agua	-----	-----	-----	-----	62.2

C. A. = concentración actual (ppb); I. A. C. = incremento anual de la concentración (%);
T. R. A. = tiempo de residencia en la atmósfera (años).

Los acontecimientos mencionados anteriormente, el hombre ha sido el actor principal, han reducido las reservas de carbono en la biomasa y en el suelo, y han incorporado grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Adicionalmente se han liberado a la atmósfera SO₂ y NO_x, como resultado de la combustión producido por los vehículos automotores. Estos gases a combinarse con el vapor de agua de la atmósfera generan ácidos, que al precipitarse junto con el agua de lluvia, nieve o niebla producen lluvia ácida o precipitaciones ácidas, con valores de pH entre 3 y 4. Estas precipitaciones han sido las causantes de grandes daños a los bosques en áreas cercanas a las zonas industrializadas y de enfermedades crónicas de la vegetación, también han producido alteraciones en los suelos, en el agua, en la macro y microfauna, y en la microflora (Claussen, 2001).

En México los recursos naturales y el medio ambiente están sometidos a tendencias de deterioro crónicas que se expresan en elevadas tasas de pérdida de diversidad biológica, deforestación, erosión del suelo, desertificación, contaminación de las principales cuencas hidrológicas y contaminación atmosférica en las grandes zonas metropolitanas. Por la situación anterior se describe que México debería tener alrededor de 0.7 ha *per cápita* para la presente década. Los datos actuales, no obstante indican que México alberga tan solo un 0.5 ha de cubierta forestal *per cápita* y que la predicción para el 2025 será de un 0.3 ha *per cápita*; es decir por debajo de la media mundial (Maser, 1995b; Velázquez *et al.*, 2001).

En México los principales emisores de gases de efecto invernadero son el sector energía (por el uso de combustibles fósiles) con 83.8 Mt C (Gay y Martínez, 1995); el cambio en el uso del suelo y la forestería con 30.2 Mt C (Maser *et al.*, 1995 y 1997); y

los procesos de la industria del cemento con 3.1 Mt C (Gay y Martínez, 1995) lo que da un total de 117.1 Mt C. La SEMARNAT (2001) ubica al sector forestal en segundo término en lo que refiere a las emisiones de CO₂ (Figura 3). El Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1995) estima que las emisiones de México contribuyen con el 1.45% de las emisiones totales de carbono que se dan anualmente en nuestro planeta.

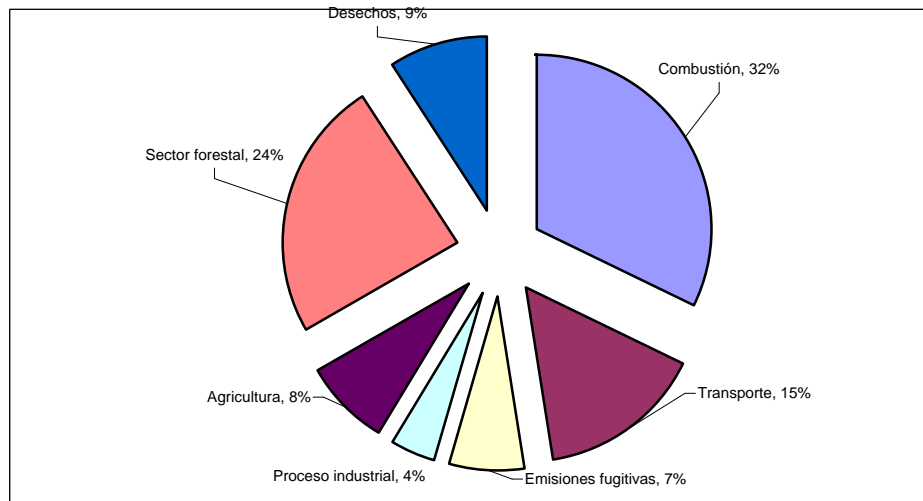


Figura 3. Distribución de emisiones de CO₂ por sectores en México.

La tasa de deforestación en México no se conoce con precisión pero oscilaba entre 370 y 670 mil ha año⁻¹ para principios de los 90's, sólo en bosques templados y selvas (Masera *et al.*, 1997; Ordóñez, 1999). Las causas de mayor impacto en la deforestación son el cambio de uso del suelo, la conversión a praderas y cultivos agrícolas, los incendios forestales y la tala irracional principalmente. 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) ocurren entre 51.4 a 53.6 Mt C año⁻¹, en estimaciones bajas (Masera *et al.*, 1995), a 63.4 a 71.0 Mt C año⁻¹ en una estimación alta (Cairns *et al.*, 1995).

Para mitigar el cambio climático se considera cualquier acción que de como resultado una reducción del incremento neto en las emisiones de carbono de un área determinada y/o por la sustitución de combustibles fósiles. Además se identifican dos opciones básicas para mitigar el cambio climático en el sector forestal: a) conservación, que consiste en evitar las emisiones de carbono a través de la preservación de áreas naturales protegidas, el fomento hacia manejo sostenible de los bosques naturales y el uso renovable de leña, así como 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 y sistemas agroforestales. Acciones como éstas tienen por objetivo incrementar la fijación y almacenaje de carbono (Masera, 1995c).

Para proponer estrategias viables dirigidas a la mitigación del cambio climático es imprescindible conocer la dinámica del carbono en los ecosistemas forestales y las modificaciones a los flujos de carbono derivadas de los patrones de cambio de uso de suelo. Para lograr la mitigación del cambio climático es indispensable contar con la información básica sobre los contenidos de carbono en los diferentes almacenes del ecosistema (Ordóñez, 1998; Pagiola *et al.*, 2002).

El sector forestal puede contribuir en gran medida a la mitigación del cambio climático, se han identificado tres estrategias principales de manejo de carbono

1)Incrementar la cantidad o tasa de acumulación de carbono, al crear o incrementar sumideros de carbono, 2)Prevenir o reducir la tasa de liberación de carbono ya fijado en los sumideros ya existentes y 3)Reducir la demanda de combustibles fosiles incrementando el uso de productos de madera renovables. Para ello se han fijado acciones generales mediante programas operativos existentes: Programa Nacional de Reforestación (PRONARE), Programa para el Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN), Programa para el Desarrollo Forestal (PRODEFOR), Programa de la Defensa de la Frontera Forestal, Programa Nacional de Protección contra Incendios Forestales, Programa Nacional de Sanidad Forestal (SEMARNAT, 2001).

En un ecosistema forestal se reconocen cinco diferentes depósitos (Figura 4) donde se acumula el carbono: a) biomasa sobre el suelo, que considera árboles, vegetación arbustiva y vegetación herbácea, b) biomasa bajo el suelo, se refiere a las raíces de la vegetación del ecosistema, tanto de árboles como del sotobosque, c) hojarasca, que es la capa de material orgánico (hojas, ramillas, semillas, etc.) no descompuesto y cuyas formas se pueden reconocer a simple vista, también llamado mantillo o litera, d) necromasa, que se refiere tanto a los árboles muertos en pie, como a los caídos, también troncos y todo el material muerto que se encuentra en el ecosistema, y e) suelo, el cual es considerado por el IPCC (1996) hasta una profundidad de 30 cm, debido a que el cambio de uso de la tierra tiene un mayor efecto en los estratos superiores.

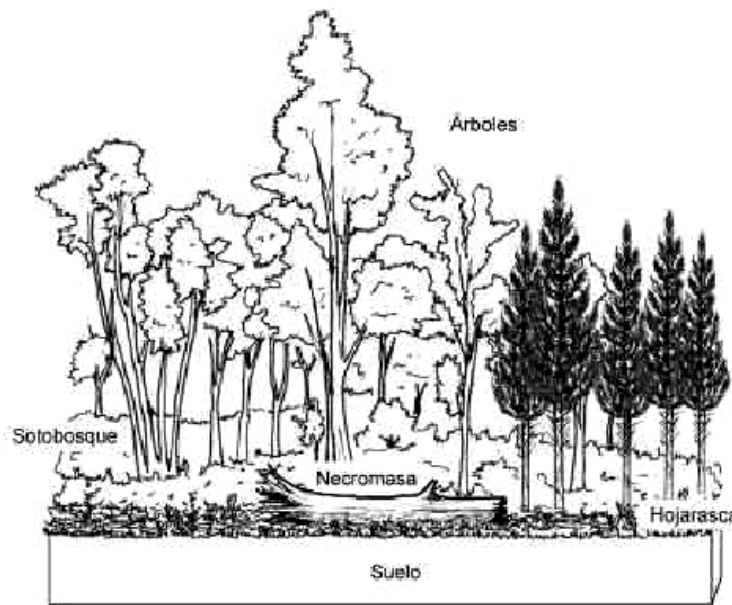


Figura 4. Depósitos de carbono en un ecosistema forestal.

La determinación adecuada de la biomasa de un bosque, es un elemento de gran importancia debido a que ésta permite determinar los montos de carbono por unidad de superficie y tipo de bosques, además de otros elementos químicos existentes en cada uno de sus componentes (Birdsey y Heath, 2001; Snowdon *et al.*, 2001). Esta información es de especial importancia en la actualidad, debido a la necesidad de conocer los montos de carbono capturado por los bosques naturales y plantaciones, como un medio para mitigar los cambios climáticos generados por el consumo de combustibles fósiles, que liberan una gran cantidad de dióxido de carbono.

La medición de la cantidad de biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema requiere un análisis destructivo (Brown *et al.*, 1989) o estimaciones indirectas de material vegetal para hacer las inferencias respectivas; este último caso es más práctico cuando se desea estimar la biomasa aérea de las especies arbóreas. Sin

embargo, se debe contar con funciones de regresión que definan la biomasa total con base en el tamaño y dimensiones de las especies; es decir, funciones matemáticas basadas en las relaciones alométricas que ocurren entre los individuos (Huxley, 1932, citado por Acosta *et al.*, 2002) o alternativamente con métodos de percepción remota mediante modelos previamente calibrados (Escandon *et al.*, 1999).

Las relaciones alométricas se han utilizado en especies forestales de clima templado-frío para estimar la biomasa aérea total y el área foliar, a partir del diámetro normal o del área de la albura (Chapman y Gower, 1991; Castellanos *et al.*, 1996). Además, las relaciones entre las dimensiones del fuste y la cantidad de biomasa se han empleado para estimar la biomasa de los componentes de un árbol (Bartelink, 1996), y su distribución dentro de los árboles (Landsberg y Gower, 1997).

Si bien en México existen algunos trabajos sobre secuestro de carbono en diferentes tipos de vegetación (Olguín, 2001), en los ecosistemas del estado de Tamaulipas no se cuenta con información relativa a este tópico; por lo que es indispensable iniciar investigaciones tendientes a establecer bases metodológicas sobre la medición de biomasa y carbono almacenado en los diversos ecosistemas de la Reserva de la Biosfera El Cielo, ya que éste último se considera un servicio ambiental y representa una alternativa de manejo de los recursos naturales, encaminado al desarrollo sustentable y, además que genera nuevas alternativas aptas para el desarrollo e ingreso de las comunidades locales.

En el estado de Tamaulipas se localiza la Reserva de la Biosfera El Cielo con una extensión de 144,530.00 hectáreas, ocupando parte de los municipios de Gómez Farías, Ocampo, Llera y Jaumave (Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2003). Las

condiciones particulares de la reserva permiten que las masas de aire cargadas de vapor del océano tropical se eleven y se enfrían con la altitud, depositando su humedad (más de 2000 mm al año) en forma de niebla y lluvia sobre las laderas de la Sierra Madre Oriental (Sánchez *et al.*, 2005).

Así, la Reserva de la Biosfera El Cielo cuenta con distintos tipos de vegetación: selva seca decidua, bosque tropical subcaducifolio, bosque mesófilo de montaña, bosque de encino, bosque de pino-encino, bosque de pino, bosque abierto de piñonero, magueyales y desierto. Esta excepcional riqueza de especies en las distintos tipos de vegetación contribuye al mantenimiento de la capa de ozono, por la consecuente producción de oxígeno (Sánchez *et al.*, 2005). Aunado a la abundancia de especies maderables en el bosque tropical subcaducifolio, el bosque mesófilo de montaña y el bosque de pino-encino se suman grandes cantidades de biomasa. Por ello, estos tres ecosistemas forestales almacenan carbono por varias décadas, además de favorecer con diversos servicios ambientales que proporciona la Reserva de la Biosfera El Cielo a la población local, regional y mundial.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad de almacenamiento de carbono en tres ecosistemas con elementos arbóreos y/o arbustivos en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México.

Bajo los siguientes objetivos específicos:

- Determinar el contenido de carbono en la biomasa aérea del bosque tropical subcaducifolio dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo.

- Estimar el carbono almacenado en el bosque mesófilo en la Reserva de la Biosfera El Cielo.
- Establecer la distribución del carbono almacenado en los diferentes componentes aéreos del bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera El Cielo.
- Comparar los contenidos de carbono de los ecosistemas evaluados.

Para lograr los objetivos planteados, se analizó cada ecosistema de forma aislada (bosque tropical subcaducifolio; bosque mesófilo de montaña; bosque de pino-encino), y se compararon los resultados obteniendo conclusiones globales del presente estudio.

1.2. HIPÓTESIS

Ho: La capacidad de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea es independiente del tipo de ecosistema presente en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México.

1.3. LITERATURA CITADA

Acosta M. M.; J. Vargas H.; A. Velásquez M. y J. D. Etchevers 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.

Anderson S. H. 1987. *Environmental science*. Merrill publishing Co., USA. 3th Edition. 505 p.

Bartelink H. H. 1996. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. *Forest Ecology and Management* 86: 193-203.

- Birdsey R. A. y L. S. Heath 2001. Forest inventory data, models and assumptions for monitoring carbon flux. In: Soil carbon sequestration and the greenhouse effect. USDA Forest Service, Pennsylvania. Special publication number 57. pp. 125-135
- Brown S. y A. E. Lugo 1982. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14: 161-187.
- Brown S.; J. R. Gillespie A. and E. Lugo 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35: 881-902.
- Cairns M.; J. Barker; R. Shea and P. Haggerty 1995. Carbon dynamics of Mexican tropical evergreen forest: influence of forestry mitigation options and refinement of carbon flux estimates. *Interciencia* 20(6): 401-408.
- Castellanos B. J.; A. Velásquez M.; J. Vargas H.; C. Rodríguez F. y A. Fierros 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30: 123-128.
- Chapman J. W. and T. Gower 1991. Aboveground production and canopy dynamics in sugar maple and red oak trees in southwestern Wisconsin. *Canadian Journal of Forest Research* 21: 1533-1543.
- Claussen E. 2001. Climate change science, strategies & solutions. The pew center on global climate change. Arlington, Virginia. 399 p.
- Dixon R. K.; S. Brown; R. A. Houghton; A. M. Solomon; M. C. Trexler and J. Wisniewski 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- Escandon C. J.; J. J. Ben H.; S. Ochoa G.; M. I. March y M. A. Castillo 1999. Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos Landsat TM en Jusnajib, La Laguna, Chiapas, México: estudio de caso. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. México. Núm. 40.*

- Garduño R. 2004. ¿Qué es el efecto invernadero? *In*: Cambio climático: una visión desde México. Copiladores J. Martínez y A. Fernández. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. México pp. 29-40.
- Gay C. and J. Martínez 1995. Mitigation of emissions of greenhouse gases in Mexico. *Interciencia* 20(6): 336-342.
- Goudie A. 1990. The human impact on the natural environment. Basil Blackwell Ltd. Oxford, U. K. 3th Edition. 388 p.
- Houghton J. 1997. Global warning. The complete briefing. Second edition. Cambridge University Press. Cambridge. 251 p.
- Houghton R. A. and C. M. Woodwell 1989. Global climate change. *Scientific American* 260(4): 36-40.
- 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) 1995. Climate change 1995. The supplementary report to the IPCC scientific assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 1996. Climate change 1996. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 2. Disponible en (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5a.htm>)
- Jiménez P. J. 2003. Programa: fijación de carbono en la reserva de la biosfera El Cielo. Informe final. Dirección de recursos naturales y medio ambiente. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. 64 p.

- Krupa S. V. 1999. Polución, población y plantas. Traducido por De la Isla Bauer, M. L. y H. De Lille. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México. 184 p.
- Landsberg J. J. and S. T. Gower 1997. Applications of physiological ecology to forest management. Academic Press. San Diego, USA. 354 p.
- Lashof D. A. and D. R. Ahuja 1990. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature* 344(5): 529-531.
- Masera O. 1995a. Carbon mitigation scenarios for Mexican forest: methodological considerations and results. *Interciencia* 20(6): 388-395.
- Masera O. 1995b. Deforestación y degradación forestal en México. Documento de trabajo 19. Grupo interdisciplinario de Tecnología rural apropiada A. C. Pátzcuaro, Michoacán, México. 50 p.
- 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. México.
- Masera O.; M. R. Bellon and G. Segura 1995. Forest management options for sequestering carbon in Mexico. *Biomass & Bioenergy* 8(5): 357-367.
- Masera O.; Ordóñez A. and R. Dirzo 1997. Carbon emissions from Mexican forest: current situation and long-term scenarios. *Climatic change* 35: 265-295.
- Miller G. T. 1991. Environmental science, sustaining the earth. Wadsworth publishing company, USA. 3th Edition. 465 p.
- Montoya G.; L. Soto; Ben de Jong; K. Nelson; P. Farias; Pajal Yakac Tic; J. Taylor y R. Tipper 1995. Desarrollo forestal sustentable: Captura de carbono en las zonas

- Tzeltal y Tojolabal del estado de Chiapas. Instituto Nacional de Ecología, Cuadernos de Trabajo 4. México, D. F. 50 p.
- Olguín M. 2001. Incorporación de la captura de carbono como propuesta de manejo forestal integral: Estudio de caso en una comunidad de la Meseta Purépecha. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. 73 p.
- Ordóñez A. 1998. El modelo CO₂ Fix. Memorias del taller de metodologías para la evaluación de la captura de carbono en el área forestal. INE-SEMARNAP. México D. F. Marzo pp. 19-20.
- Ordóñez A. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP. México D. F. 72 p.
- Pagiola S.; J. Bishop and N. Landell-Mills 2002. Selling forest environmental services. Market-based mechanisms for conservation and development. London, N. Y. 299 p
- Sánchez R. G.; P. Reyes C. y R. Dirzo 2005. Historia natural de la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Universidad Autónoma de Tamaulipas. 732 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) 2001. México II Comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático. Comité intersecretarial sobre cambio climático. SEMARNAT-INE. México, D. F 374 p.
- Snowdon P.; J. Raison; H. Keith; K. Montagu; K. Bi; P. Ritson; P. Grierson; M. Adams; W. Burrows and D. Eamus 2001. Protocol for sampling tree and stand biomass. National carbon accounting system technical report No. 31 Draft-March 2001. Australian greenhouse office. 114 p.

Velásquez A.; F. Mas J.; R. Mayorga S.; L. Palacio J.; G. Bocco; G. Gómez R.; L. Luna G.; I. Trejo; J. López G.; M. Palma; A. Peralta y J. Prado 2001. Inventario forestal nacional 2000: Potencial de uso y alcances. Ciencias 64: 13-19.

CAPITULO 2

2. CARBONO CONTENIDO EN UN BOSQUE TROPICAL SUBCADUCIFOLIO

RESUMEN

La captura de carbono es un importante servicio ambiental que proporcionan los bosques y selvas. Su relevancia es de primer orden porque se relaciona con los más graves problemas ambientales que hoy afectan al planeta. Contribuyendo a tal situación, en este estudio se planteó como objetivo generar información del contenido de carbono para el bosque tropical subcaducifolio y estimar la cantidad de carbono presente en la biomasa aérea y su distribución en dicho ecosistema dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas. De octubre a diciembre del 2004 se midió el diámetro y la altura de árboles y arbustos en sitios de muestreo de 1000 m², la hojarasca y necromasa se pesó en parcelas de 1 y 25 m² respectivamente. En los resultados se obtuvo en promedio 778.8 ind ha⁻¹ y 1655 renuevos ha⁻¹. Con el modelo potencial se estimó para el bosque tropical subcaducifolio en promedio 94.6 tC ha⁻¹, de las cuales 68.5 t se encuentran almacenadas en los fustes, ramas y hojas, en las raíces se encuentran 13.7 t, la hojarasca almacena 10.8 t, mientras que en los renuevos y necromasa se almacenan 0.9 y 0.7 tC ha⁻¹ respectivamente, cantidades considerables que ayudan a mitigar el cambio climático.

SUMMARY

The carbon capture is an important environmental service that provides the forests and jungle. Its relevance is of first order because it is related to the most serious environmental problems than today they affect the planet. Contributing to such situation in this study, considerate the objective to generate information of the carbon content and to estimate the amount of present carbon in the aerial biomass and its distribution in this tropical deciduous forest within the reserve of the biosphere El Cielo, Tamaulipas. Of october to december of the 2004 diameters and heights in trees and shrubs were measured in 1000 sites m^2 , the fallen leaves and rotten wood was weighed in parcels of 1 and 25 m^2 respectively. In the results was obtained in average 778.8 ind ha^{-1} and 1655 sprouts ha^{-1} . With the potential model was estimated in average 94.6 tC ha^{-1} for the tropical deciduous forest, of which 68.5 t are stored in the woods, branches and leaves, in the roots are 13,7 t, the fallen leaves stores 10,8 t, whereas in the sprouts and rotten wood are stored 0.9 and 0.7 tC ha^{-1} respectively, considerable amounts that help to mitigate the climatic change, the effect hothouse and the thinning of the ozone layer.

2.1. INTRODUCCIÓN

En México la tasa de deforestación no se conoce con precisión pero oscila entre 370 y 670 mil hectáreas $año^{-1}$ para principios de los 90's, sólo en bosques templados y selvas (Maser *et al.*, 1997; Ordóñez, 1999). Las causas de mayor impacto en la deforestación son el cambio de uso del suelo (la conversión a praderas y a cultivos agrícolas), los incendios forestales y la tala irracional, entre otros. 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 C año⁻¹, en estimaciones bajas (Maser, 1995), a 63.4 a 71.0 Mt C año⁻¹ en una estimación alta (Cairns *et al.*, 1995).

Sin embargo, la vegetación hábilmente asimila CO₂ atmosférico, por medio del proceso fotosintético, al formar carbohidratos y ganar volumen (Leith y Whitacker, 1975; Raev *et al.*, 1996). En los organismos vivos se encuentra presente el carbono, por ello, los árboles en particular, asimilan y almacenan grandes cantidades de carbono durante toda su vida (Ludevid, 1997; Nakama *et al.*, 2003). Aproximadamente el 90% de la biomasa acumulada en la tierra se encuentra en los bosques en forma de fustes, ramas, hojas, raíces y materia orgánica (Nakama *et al.*, 2003).

No obstante, los árboles al ir aumentando su diámetro y altura alcanzarán un tamaño aprovechable en términos comerciales para extraer productos elaborados. Estos productos finales tienen un tiempo de vida determinado, después del cual se degradan aportando CO₂ al suelo y/o atmósfera. Durante el tiempo en que el CO₂ se encuentra en alguna estructura del árbol —y hasta que es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera— se considera almacenado (Ordóñez, 1999). Aunque autores como Houghton *et al.* (1999), Smaglik (2000), afirman que la tasa de acumulación de carbono en los ecosistemas terrestres y los mecanismos responsables del funcionamiento de los sumideros de carbono son inciertos.

Los principales almacenes de carbono en los ecosistemas forestales se encuentran fraccionados en cuatro componentes: biomasa sobre el suelo (vegetación), hojarasca, sistema radicular y carbono orgánico del suelo (Snowdon *et al.*, 2001). La vegetación es la encargada de incorporar el carbono atmosférico al ciclo biológico mediante el proceso de la fotosíntesis (Salisbury, 1994; Sarmiento y Gruber, 2002; Lozano, 2004).

La capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar carbono en forma de biomasa aérea varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal (Schulze *et al.*, 2000). La determinación adecuada de la biomasa de un bosque, es un elemento de gran importancia debido a que ésta permite determinar los montos de carbono por unidad de superficie y tipo de bosques, además de otros elementos químicos existentes en cada uno de sus componentes (Snowdon *et al.*, 2001). Esta información es de especial importancia en la actualidad, debido a la necesidad de conocer el carbono capturado por los bosques naturales y plantaciones, como un medio para mitigar los cambios climáticos generados por el consumo de combustibles fósiles, que liberan una gran cantidad de CO₂ a la atmósfera (Binkley *et al.*, 1997).

En México existen estudios científicos sobre el secuestro de carbono en diferentes ecosistemas (Olguín, 2001). Sin embargo en los ecosistemas del estado de Tamaulipas no se cuenta con información relativa a este tópico. Pero, por su privilegiada ubicación geográfica, presenta características fisiográficas que propician una gran variedad de ambientes y una amplia gama de hábitats. Autores como Puig y Bracho (1987); Jiménez (2003); Sánchez *et al.* (2005), mencionan que en esta región de Tamaulipas se presenta un gradiente de vegetación que oscila desde: el bosque tropical subcaducifolio, bosque mesófilo de montaña, bosque templado-frío hasta la vegetación tipo xérica en solo 21 km en línea recta, observándose que la transición de un tipo de vegetación a otro es conspicua. Por ello se requiere un conocimiento confiable para que los inventarios puedan ser comparados entre si y reflejen la cantidad real de carbono acumulado por cada ecosistema forestal.

El presente trabajo engloba al bosque tropical subcaducifolio de la Reserva de la Biosfera El Cielo, que presenta una gran diversidad de especies vegetales que ayudan a mitigar el problema del cambio climático mediante el almacenamiento de carbono en sus estructuras que conforman cada especie vegetal. En tal sentido se plantean los siguientes objetivos:

-Generar información acerca del contenido de carbono que existe en la biomasa aérea del bosque tropical subcaducifolio dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México.

-Estimar la cantidad de carbono presente en cada componente aéreo del bosque tropical subcaducifolio en la Reserva de la Biosfera El Cielo.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México, ubicándose dentro de los paralelos 22° 55' 30" y 23° 25' 50" Norte y los meridianos 99° 05' 50" y 99° 26' 30" Oeste (Figura 5). El bosque tropical subcaducifolio (BTS) se encuentra principalmente en las comunidades Gómez Farías, El Azteca, El Nacimiento y Nuevo Pensar Campesino, localizadas en el municipio de Gómez Farías; las localidades de El Encino, La Libertad y El Peñón, se encuentran en el municipio de Llera, pertenecientes al estado de Tamaulipas. Las comunidades antes citadas suman una superficie de 7 812.75 hectáreas de BTS (Jiménez, 2003).

Al BTS también es conocido como selva mediana subcaducifolia, se desarrolla entre 200 y 800 m de altitud, en comunidades primarias la altura promedio es de 20 m. Se distinguen 2 estratos arbóreos, uno superior de 18 a 22 m y otro inferior de 8 a 15 m. Las especies más comunes son: *Bursera simaruba*, *Mirandaceltis monoica*, *Brosimum*

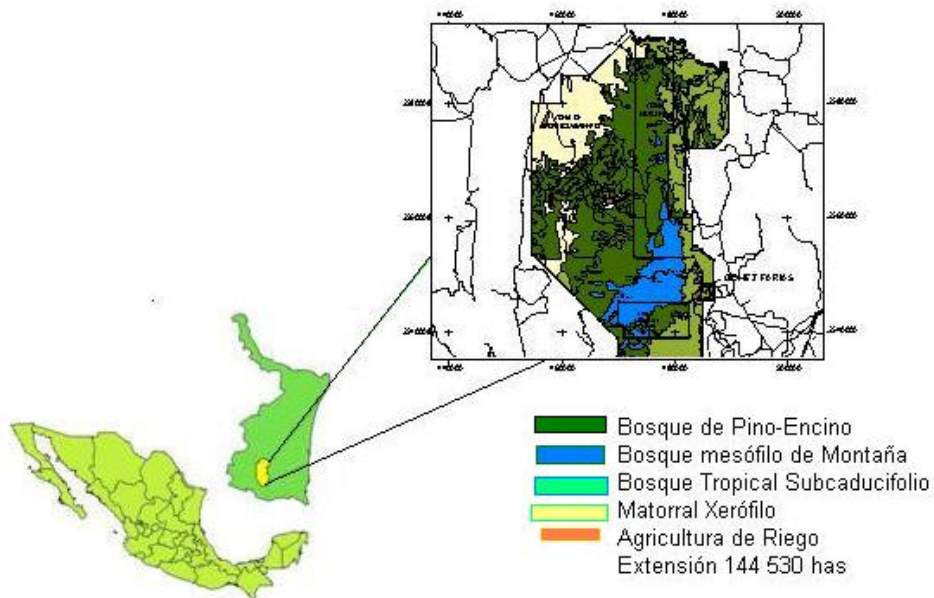


Figura 5. Ubicación de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México.

alicastrum, *Guazuma ulmifolia*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Ficus* spp. y *Phoebe tampicensis* (Sánchez *et al.*, 2005). La mayoría de estos elementos son de afinidades tropicales (Figura 6). Los árboles pierden las hojas durante la estación seca, entre diciembre y abril. Los árboles de 8 a 15 m de altura ocupan el 80% del dosel del bosque. Existe un estrato arbustivo denso y las lianas y epifitas no son muy abundantes. Se desarrolla en un clima semicálido-húmedo.

2.2.1. Diseño de muestreo

Por tratarse de un área natural protegida, se utilizó un diseño de muestreo dirigido, la unidad de muestreo utilizada fue un sitio de 1000 m² (20 x 50 m) dividido en cuatro cuadrantes (Figura 7). En el cuadrante I, se mide en su totalidad los árboles, arbustos y la regeneración de árboles y arbustos. En los cuadrantes II, III y IV se midieron únicamente los individuos mayores de 5 cm de diámetro normal (Schlegel *et al.*, 2001).



Figura 6. Vegetación característica del bosque tropical subcaducifolio

La medición en campo se realizó de octubre a diciembre del 2004 antes de perder el follaje, las variables que se midieron para cada individuo son altura total, diámetro normal, diámetro de copa (norte-sur, este-oeste) y altura de inicio de copa viva. En la misma fecha se pesó la hojarasca y la necromasa. Para la hojarasca se utilizaron una parcela de 1 m² dentro de los cuadrantes II, III, IV, formados previamente, se pesó toda la biomasa de hojas y ramas. En la medición de la materia muerta o necromasa se utilizó una parcela de 25 m² ubicada en el cuadrante I, pesando todo el material muerto de ramas sobre el suelo con un diámetro mayor de 5 cm.

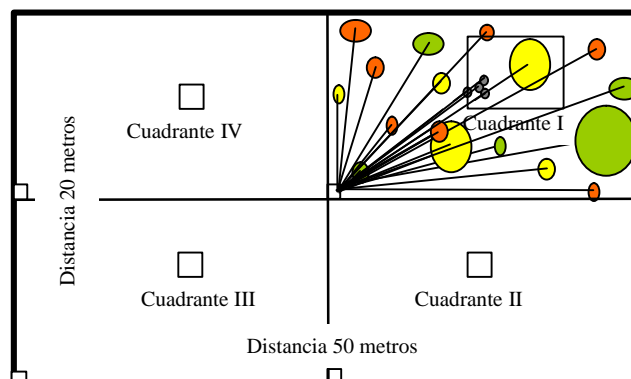


Figura 7. Representación de un sitio de muestreo en campo.

2.2.2. Selección de los sitios de muestreo

El reglamento dentro del área natural protegida es restrictivo y mayor cuando implica derribar una especie arbórea dentro de dicha área. Al seleccionar el sitio de muestreo en campo se consideró que el sitio fuera representativo del lugar además de las características siguientes: a) sitio conservado sin vegetación indicadora de perturbación, b) con diversidad de especies, c) con individuos de diferente diámetro, d) especies características del tipo de vegetación y, e) con condiciones para realizar la medición.

2.2.3. Selección de árboles para la medición de carbono

Se tomaron muestras de madera en los árboles representativos del ecosistema. Sin embargo, permitieron tomar muestras de hojarasca y necromasa, a las cuales se les tomó el peso húmedo en campo y después fueron llevadas al laboratorio de la Facultad de Ciencias Forestales-UANL en Linares, Nuevo León. Las muestras fueron secadas en una estufa de flujo de aire a una temperatura de 105 °C hasta alcanzar el peso constante (peso seco). Se obtuvo la relación peso seco/peso húmedo para las muestras de hojarasca y necromasa, esta relación se multiplicó por el peso total de cada parcela de 1 m² obteniendo el peso seco de hojarasca y necromasa.

Dado que no fue posible derribar el árbol para ser pesado en cada uno de sus componentes, se procedió a calcular el volumen por árbol por especie, utilizando el coeficiente de forma que reporta la Memoria del Inventario Forestal del estado de Hidalgo (1985) para ciertas especies de hojosas, además, se consideró agregar el 30% del volumen fustal obtenido, que representa los brazuelos y ramas que conforman la copa del árbol; para el tocón, hojas y ramas menores de 5 cm de diámetro se agregó el 5% del volumen fustal obtenido. El volumen individual por especie se multiplicó por la

densidad básica respectiva de cada especie obteniendo la biomasa. Cabe mencionar que se utilizó la densidad básica reportada por Tuset y Durán (1979), Barajas y León (1989), Reyes *et al.* (1992), Martínez y Martínez (1996), para algunas especies presentes en el área de estudio.

Con los datos obtenidos de biomasa individual por especie, se procedió a desarrollar funciones de regresión de biomasa, utilizando el paquete estadístico de cómputo (Statistica versión 6.0). De los cuales para este caso se utilizó el modelo potencial (Prodan *et al.* 1997; Ter-Mikaelian y Korzukhin, 1997; Acosta, 2003) por presentar para cada especie el mayor coeficiente de determinación (R^2), además por su simplicidad en la ecuación $\beta = a_0 * D^{a_1}$ donde β es el peso seco total de la biomasa aérea (kg), D es el diámetro normal (cm), y a_0 y a_1 son los coeficientes de la regresión.

2.2.4. Determinación de carbono en muestras de madera

Las muestras de hojarasca y necromasa se molieron y acondicionaron para medir la concentración del carbono total mediante el equipo de Solids TOC Analyzer (Figura 8). Se obtuvo un promedio de las tres muestras en porcentaje de concentración decarbono para el BTS. Los resultados del equipo son confiables al obtener una calibración de $R^2 = 0.9990$ en el equipo, dichos resultados son recomendados por Dennis *et al.* (2001), quienes son los responsables de la metodología y calibración del equipo Solids TOC Analyzer.

Dado que no se obtuvieron muestras de madera para determinar la concentración de carbono por especie se tomó como referencia los resultados de Smith *et al.* (1993), Montoya *et al.* (1995), MacDicken (1997) y Husch (2001), todos ellos afirman que en promedio la materia vegetal seca contiene 50% de carbono. Sin embargo, para estimar

con mayor certeza la cantidad de carbono almacenado en la hojarasca y necromasa, se utilizó el valor promedio de concentración de carbono obtenido con el equipo.



Figura 8. Equipo Solids TOC Analyzer en la Facultad de Ciencias Forestales-UANL.

El determinar la biomasa bajo el suelo, o biomasa radicular, es un proceso muy costoso, sin embargo, para tener mejores estimaciones de carbono total por hectárea en este ecosistema, se recurrió a la literatura para estimar la biomasa radicular, desafortunadamente no se encontró información para este ecosistema. Sin embargo, MacDicken (1997), obtuvo un 15% de biomasa radicular con respecto a la biomasa aérea en bosques de Chile, valores mayores obtuvo Cairns *et al.* (1997), para distintos lugares del mundo, teniendo a razón de raíz/tallo entre 0.20 y 0.30, es decir 20 a 30% de biomasa radicular con respecto a la biomasa aérea (fustes, ramas y hojas). Se consideró para este trabajo el valor de 20% de biomasa radicular respecto de la biomasa aérea obtenida.

Estos valores se multiplicaron por la biomasa seca de cada componente, se agregó el carbono estimado en el sistema radical de los árboles, con la suma de estos cuatro depósitos de carbono se obtuvo la cantidad total de carbono almacenado ($tC\ ha^{-1}$) en la parte aérea y radicular del BTS dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. Diversidad de especies

La diversidad biológica en el BTS de la Reserva de la Biosfera El Cielo, es un factor determinante en la producción y la productividad en términos de proveer servicios ambientales. Este ecosistema presenta en especies arbóreas y arbustivas en promedio 778.8 individuos por hectárea con diámetros mayores de 5 cm, y más de 1655 renuevos por hectárea (diámetros menores de 5 cm). En este caso se estimó que *Brosimum alicastrum* se encuentra con mayor frecuencia en el bosque ($70\ ind\ ha^{-1}$ y $275\ renuevos\ ha^{-1}$), otra de las especies con mayor frecuencia es *Guazuma ulmifolia* al encontrar $131.3\ ind\ ha^{-1}$ con diámetros mayores de 5 cm y $70\ renuevos\ ha^{-1}$. El resto de las especies se encuentran con menor frecuencia, es posible que en los sitios de muestreo no se presentaron algunas especies, ya que Sánchez *et al.* (2005), presentan una lista de especies superior en número para este ecosistema.

No obstante, se ubicaron especies con amplio rango en diámetro como *Brosimum alicastrum*, la cual presenta individuos menores de 5 cm de diámetro hasta la categoría diamétrica de 95 cm, otra especie con amplio rango en diámetro es *Guazuma ulmifolia* con individuos de menos de 5 cm hasta la categoría diamétrica de 45 cm. Sin embargo, se obtuvo un gran número de individuos por hectárea en especies arbóreas y arbustivas

con categoría diamétrica 5 y 10 cm, este número se reduce considerablemente a partir de la categoría diamétrica de 20 cm (Figura 9).

Autores como González (2005), considera que el BTS se encuentra conservado, al momento de realizar el muestreo se constato que en general el BTS presenta una estructura cerrada y esta fisonómicamente compacto, los árboles mayores de 40 cm de diámetro, corresponden principalmente a especies como *Brosimum alicastrum*, *Sabal mexicana*, *Guazuma ulmifolia*, *Bursera simaruba*, *Phyllostylon brasiliense* y *Leucaena pulverulenta*. En el segundo estrato se desarrollan árboles más bajos entre los cuales se mezclan algunos arbustos, entre los que destacan *Anonna goblifora*, *Bauhinia divaricata*, *Randia laetevirens* y *Trichilia havanensis*.

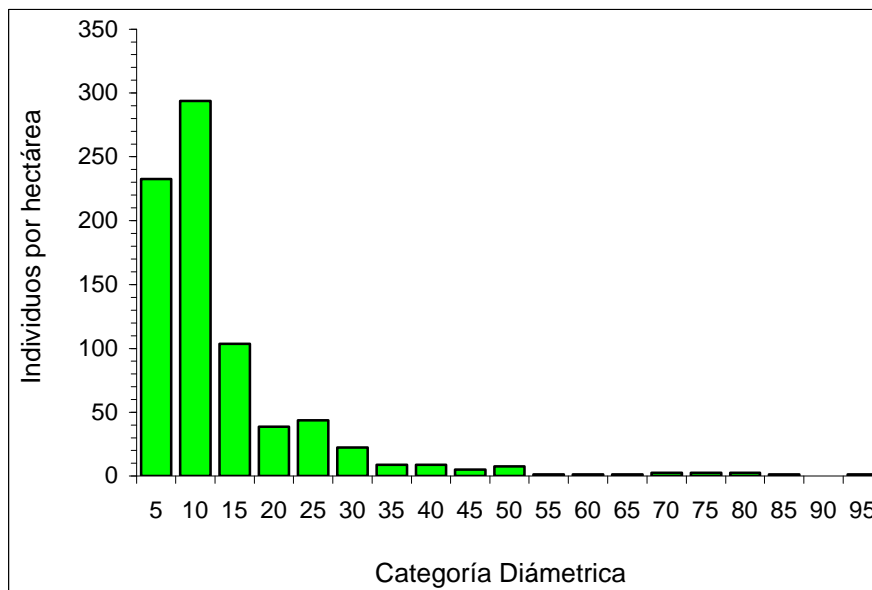


Figura 9. Número de individuos por hectárea por categoría diamétrica en el BTS dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo.

2.3.2. Estimación de biomasa

Una vez obtenido el volumen por árbol se inició el proceso matemático para estimar la biomasa correspondiente a cada árbol por especie. Se aplicó el modelo potencial

para cada especie, en este caso se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) por arriba de 0.95 para cada especie, excepto para *Bauhinia divaricata* con 0.94, *Brosimum alicastrum* y *Harpalyce arborescensis* con 0.92, lo que representa una alta confiabilidad del modelo. En la figura 10 se muestra la curva de ajuste con un R^2 de 0.99 para *Robinsonella discolor* y con una R^2 de 0.92 para *Harpalyce arborescensis*. Estas especies presentaron el mayor y menor valor de R^2 .

El análisis de varianza mostró diferencias significativas ($P=0.05$) en los parámetros de la ordenada al origen y la pendiente de la línea de regresión en la estimación de biomasa para cada especie, excepto en la ordenada de *Brosimum alicastrum*, *Dendropanax arboreus*, *Harpalyce arborescensis*, *Mirandaceltis monoica*, *Nicotina glauca*, *Piscidia piscipula*, *Psidium guajava* y *Sargentia greggii*. Los modelos generados son aplicables sólo para la especie correspondiente que se encuentra en esta región.

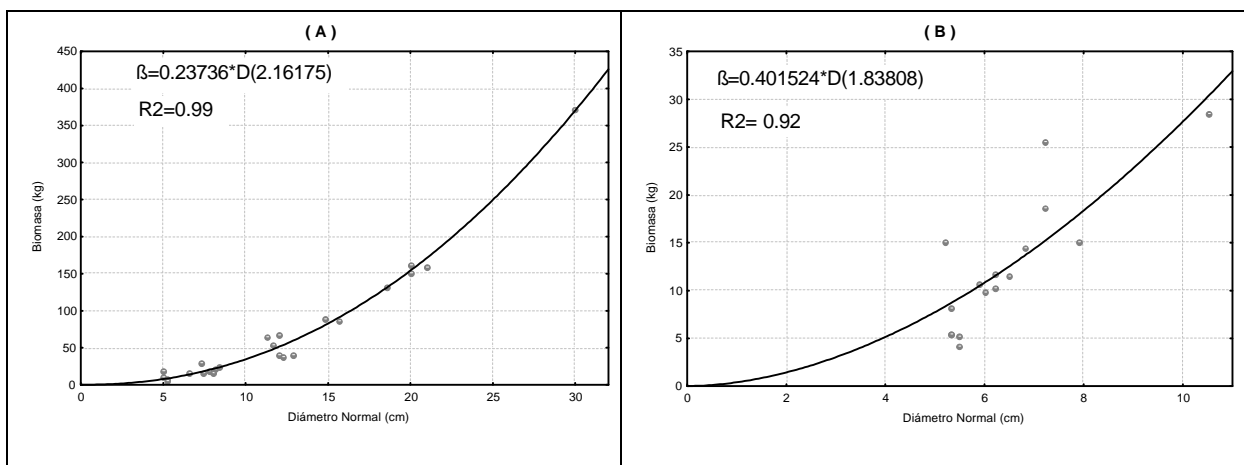


Figura 10. Curvas de ajuste para estimar biomasa en: (A) *Robinsonella discolor* y (B) *Harpalyce arborescensis* en el BTS.

En las ecuaciones de regresión generadas para cada especie, se encontró a *Psidium guajava*, *Robinsonella discolor*, *Tilia houghii* y *Trichilia havanensis* que

mostraron R^2 superiores 0.99. Otras especies como *B. alicastrum* y *H. arborescensis* mostraron valores de R^2 aceptables con mayores de 0.92 (Cuadro 2).

A pesar de que la tendencia de los valores de biomasa aérea con respecto al diámetro normal de los árboles fue similar para las especies, se encontró una variación en el valor estimado de la ordenada al origen (a_0) de 0.037241 hasta 0.479403 entre las especies, de igual manera la variación en el valor estimado de la pendiente de la línea de regresión (a_1) fue de 1.83808 hasta 2.99585 (Cuadro 2).

Hay limitada información para este ecosistema en lo que refiere al uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa, sin embargo, otros estudios como Rodríguez *et al.* (2006), empleando el mismo modelo obtuvo un R^2 de 0.95 para la mayoría de las especies arbóreas presentes en el bosque mesófilo de montaña. Acosta (2003) encontró un R^2 mayor de 0.97 para seis especies del bosque mesófilo de montaña en la Sierra Norte de Oaxaca. Los dos estudios anteriores tuvieron resultados satisfactorios al emplear el modelo potencial. Así mismo se considera que en este estudio el modelo potencial arrojó resultados satisfactorios con un R^2 mayor de 0.95 para la mayoría de las especies.

Con el modelo potencial se estimaron más de 136.9 toneladas por hectárea de biomasa almacenada en los fustes, ramas y hojas de los árboles del BTS. La especie *Brosimum alicastrum* contribuye con la mayor parte, acumulando más del 48.2%. El género *Quercus* guarda en sus fustes, ramas y hojas el 9.6%, mientras que *Guazuma ulmifolia* aporta el 8.2%. Estos tres géneros suman más del 66% de la biomasa total (90.4 t ha⁻¹) en este componente aéreo, el resto de la biomasa es aportada por más de 61 especies de plantas arbóreas y arbustivas que se encuentran en este ecosistema forestal.

Cuadro 2. Coeficiente de determinación (R^2), valor de F y coeficientes de regresión (a_0 , a_1) para estimar biomasa en árboles individuales por especie en el BTS.

Especie	n	R^2	f	Parámetros	
				a_0	a_1
<i>Bauhinia divaricata</i>	33	0.93	246.5	0.197575	2.34002
<i>Brosimum alicastrum</i>	56	0.92	339.5	0.479403	2.0884
<i>Bursera simaruba</i>	43	0.95	453.1	0.064808	2.46998
<i>Cestrum dumetorum</i>	17	0.98	513.5	0.181077	2.29418
<i>Dendropanax arboreus</i>	10	0.95	101.1	0.037241	2.99585
<i>Mimosa albida</i>	44	0.96	611.2	0.23855	1.92242
<i>Guazuma ulmifolia</i>	105	0.98	4280.6	0.232435	2.21906
<i>Harpalyce arborescens</i>	16	0.92	92.4	0.401524	1.83808
<i>Mirandaceltis monoica</i>	16	0.95	148.3	0.062394	2.71448
<i>Nicotina glauca</i>	24	0.95	263.0	0.182197	2.22818
<i>Phoebe tampicensis</i>	24	0.97	553.8	0.222776	2.33953
<i>Piscidia piscipula</i>	30	0.95	283.8	0.064066	2.62323
<i>Psidium guajava</i>	18	0.99	967.0	0.246689	2.24992
<i>Quercus spp.</i>	19	0.97	345.0	0.038424	2.82139
<i>Ceanothus caeruleus</i>	15	0.97	303.9	0.311733	2.04754
<i>Robinsonella discolor</i>	24	0.99	1407.3	0.23736	2.16175
<i>Sargentia gregii</i>	11	0.97	223.0	0.078545	2.58952
<i>Tilia houghii</i>	10	0.99	5104.8	0.048454	2.58164
<i>Trichilia havanensis</i>	20	0.99	1535.8	0.130169	2.34924

Rodríguez *et al.* (2006) realizó un estudio en el bosque mesófilo de montaña y encontró más de 107.2 t ha^{-1} de biomasa sólo en los fustes de los árboles. Es posible que el BTS mantenga mayor biomasa por la densidad de plantas por unidad de superficie, aunque las especies del segundo estrato tengan diámetros y alturas menores comparada con las especies presentes en el bosque mesófilo de montaña.

Los renuevos en el BTS de las especies arbóreas y arbustivas con diámetros menores de 5 cm mantienen en la parte aérea un total de 1.8 t ha^{-1} de biomasa, es probable que este valor se encuentre en alto dinamismo debido al potencial de crecimiento y desarrollo en que se encuentran los renuevos dentro del bosque. Cabe mencionar que en el estrato inferior no se tomó en cuenta las plantas herbáceas por mantener secuestrado el carbono poco tiempo ya que al desintegrarse se libera gran parte del mismo carbono hacia la atmósfera (Ordóñez, 1999).

El BTS tiene como característica distintiva, desde el punto de vista fisiológico, que más de la mitad y a veces tres cuartas partes de los individuos arbóreos altos pierden completamente las hojas en la temporada de sequía (Pennington y Sarukhán, 1998). El muestreo se realizó antes de este periodo (octubre a diciembre, 2004). Se obtuvieron más de 19.5 t ha^{-1} de biomasa en hojarasca, compuesta por hojas, ramas menores de 5 cm de diámetro, cantidad considerada únicamente de la materia orgánica que se encuentra sobre el suelo y que no tiene un proceso de descomposición avanzado. Este valor es similar al obtenido en el bosque de pino-encino dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo (19.8 t ha^{-1}), el hecho de encontrar cantidades similares en hojarasca en los dos ecosistemas forestales, es probable que se deba las condiciones climáticas del BTS, que permite la descomposición muy rápida de la hojarasca depositada en el suelo en la temporada de sequía, ya que el muestreo se realizó poco antes del proceso de defoliación estacional mientras que en el bosque de pino-encino la hojarasca permanece mayor tiempo sobre la superficie.

La materia muerta o necromasa son árboles caídos, ramas gruesas que se acumulan sobre el suelo y que al final se incorporan al suelo, en este ecosistema se encontró más de 1.4 t ha^{-1} de biomasa.

Existe poca literatura, en los que evalúan la necromasa y hojarasca en los ecosistemas forestales, aunque consideran que es corto el tiempo que se mantendrá secuestrado el carbono, mucho de éste se incorpora al suelo quedando almacenado por muchos años (Ordóñez y Masera, 2001; West *et al.*, 2004). La incorporación del carbono al suelo en ecosistemas naturales se da por dos vías principales: por el mantillo (capa superficial de materia vegetal) y por la biomasa radicular. La velocidad de descomposición de este material depende de las poblaciones microbianas del suelo y de las características del material vegetal (Oliva y García, 1998).

Sumando los cuatro componentes aéreos del BTS se obtuvieron más de 159.8 t ha⁻¹ de biomasa. La mayor parte de esta biomasa aérea se encuentra en el componente de fustes, ramas y hojas con 85.7%, le sigue el componente de la hojarasca con 12.2%, la biomasa contenida en los renuevos y la necromasa es de 1.2 y 0.9% respectivamente.

La biomasa radicular estimada para este ecosistema fue de 27.4 t ha⁻¹, que sumadas con la biomasa aérea da como resultado un total de 187.2 t ha⁻¹ de biomasa. A pesar de que continúan cortando árboles para consumo de leña (com. personal Hernández, 2005), es posible que el poco uso comercial que tiene la madera de las especies de este ecosistema, sea motivo para que siga manteniendo cantidades considerables de biomasa y proporcione servicios ambientales valiosos como es: la recarga de mantos acuíferos, amortiguamiento de altas y bajas temperaturas, abrigo a la fauna silvestre, ayuda a la mitigación del cambio climático con el secuestro de carbono, entre otros (Constanza *et al.*, 1997; SEMARNAT, 2001; Sánchez *et al.*, 2005).

2.3.3. Estimación de carbono

Considerando que la biomasa seca en general tiene 50% de carbono, en este estudio se obtuvo más de 94.6 tC ha⁻¹ en los componentes aéreos y radicular, valor

inferior al encontrado por Rodríguez *et al.* (2006), en un estudio realizado sólo para fustes del bosque mesófilo de montaña que limita este estudio dentro de la reserva de la biosfera el cielo, con 110 tC ha⁻¹. En otro estudio Acosta (2003) encontró en bosque mesófilo de montaña valores promedio de 54.4 tC ha⁻¹ en la región Mazateca, 38.5 tC ha⁻¹ en la región de Cuicateca y 33.8 tC ha⁻¹ en la región de Mixe que se encuentran en la Sierra Norte de Oaxaca, considerando únicamente los árboles, arbustos, hierbas y hojarasca, valores superiores se encontraron en este estudio, presentando los mismos componentes aéreos, excepto hierbas. Aun el valor promedio aquí obtenido fue superior con los componentes aéreos y el radicular al que menciona de forma general la SEMARNAT (2004), para bosques degradados, éstos almacenan menos de 80 tC ha⁻¹. Es posible que este resultado se deba a la inaccesibilidad y conservación del BTS dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, lo que mantiene una densidad alta de individuos por unidad de superficie, principalmente en el segundo estrato.

Considerando la superficie total de este tipo de vegetación, se estimó un total de 739 086.2 tC almacenado en los fustes, ramas, hojas, hojarasca, necromasa y raíces del BTS que se encuentra dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas. La distribución del carbono almacenado en los depósitos de este ecosistema, tiene el siguiente orden de importancia, en la parte aérea (fustes, ramas y hojas) guardan el mayor porcentaje de carbono (72.3%), seguido del sistema radicular y hojarasca con el 14.5 y 11.4 % respectivamente (Cuadro 3).

Los individuos que mantienen el carbono por largos periodos de residencia dan lugar al fenómeno llamado secuestro de carbono (Post *et al.*, 1990). Por ello, los especímenes arbóreos de los bosques y selvas deberán verse como apoyos de carbono que pueden ayudar a revertir el deterioro de la atmósfera. Por lo que los

árboles cosechados, deberán extraer la madera y convertirla en productos durables (madera aserrada, muebles, etc.) y así mantener secuestrado el carbono por décadas (Ralph, 2000; Gayoso y Schlegel, 2001).

Cuadro 3. Distribución del carbono secuestrado en los depósitos del BTS dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.

Depósito	C/ha (ton)	Porcentaje (%)	C total (ton)^a
Fustes, ramas y hojas	68.5	72.3	535 173.4
Raíces	13.7	14.5	107 034.7
Hojarasca	10.8	11.4	84 377.7
Renuevos	0.9	1.0	7 031.5
Necromasa	0.7	0.8	5 468.9
Total	94.6	100%	739 086.2

^a7,812.75 hectáreas de BTS dentro de la reserva de la biosfera El Cielo (Jiménez, 2003).

2.4. CONCLUSIONES

En el bosque tropical subcaducifolio se encontró almacenado en promedio más de 94.6 toneladas de carbono por hectárea en árboles, arbustos, renuevos, necromasa, hojarasca y raíces.

El mayor contenido de carbono se localizó en el componente aéreo de fustes, ramas y hojas con 68.4 tC ha⁻¹. El menor contenido fue para la necromasa con sólo 0.7 tC ha⁻¹ cantidades considerables de carbono secuestrado que obligan a proteger el área de la deforestación, incendios forestales y otros factores que amenacen la liberación de este carbono hacia la atmósfera, contribuyendo a la mitigación del cambio climático de la tierra.

2.5. LITERATURA CITADA

- Acosta Míreles M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 99 p.
- Barajas M. J. y C. León G. 1989. Anatomía de maderas de México: especies de una selva baja caducifolia. Instituto de Biología, Depto. de Botánica. UNAM. 163 p.
- Binkley C. S.; M. J. Apps; R. K. Dixon; P. E. Kauppi and L. O. Nilsson 1997. Sequestering carbon in natural forest. *In*: Economics of carbon sequestration in forestry. Edited by R. A. Sedjo, R. N. Sampson and J. Wisniewski. Lewis Publishers. Washington D. C. pp. 23-46.
- Cairns M.; Barker J.; Shea R. and P. Haggerty 1995. Carbon dynamics of Mexican tropical evergreen forest: influence of forestry mitigation options and refinement of carbon flux estimates. *Interciencia* 20(6): 401-408.
- Cairns M. A.; S. Brown; E. H. Helmer and G. A. Baumgardner 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111: 1-11.
- Constanza R.; R. Darge; R. Degroot; S. Farber; M. Grasso; B. Hannon; K. Limburg; S. Naeem; R. V. O'Neil; J. Paruelo; R. G. Raskin; P. Sutton and M. Vandenbelt 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Dennis S. O.; S. A. Aburime and R. E. Harrison 2001. Transport of Simazine in soil amended with pine bark wood fiber. *Proceedings of Southern Nursery Association (SNA) Research Conference*. 46: 602-605.
- Gayoso J. y B. Schlegel 2001. Guía para la formulación de proyectos forestales de carbono. En el proyecto de medición de la capacidad de captura de carbono en

bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 13 p.

González M. F. 2005. La vegetación *In: Historia natural de la reserva de la biosfera El Cielo*, Tamaulipas, México. Sánchez R. G.; Reyes C. P. y R. Dirzo (eds) Universidad Autónoma de Tamaulipas. pp. 88-105.

Hernández V. A. 2005. Comunicación personal. Técnico en el área de operación y manejo de áreas naturales protegidas. SOPDUE, Cd. Victoria, Tamaulipas.

Houghton R. A.; J. L. Hackler and K. T. Lawrence 1999. The U. S. carbon budget: contributions from land-use change. *Science*. 285: 574-577.

Husch B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques. *In: Simposio internacional, medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales*. Octubre, 2001. Valdivia, Chile. 9 p.

Jiménez P. J. 2003. Programa: fijación de carbono en la reserva de la biosfera El Cielo. Informe Final. Dirección de Recursos Naturales y Medio Ambiente. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. 64 p.

Leith H. and R. Whithacker 1975. Primary productivity of the biosphere. *Ecological Studies*. No. 14. New York.

Lozano G. M. S. 2004. Evidencia del cambio climático: cambios en el paisaje. *In: Cambio climático: una visión desde México*. Copiladores J. Martínez y A. Fernández. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología pp. 65-74.

Ludevid A. M. 1997. El cambio global en el medio ambiente. Ed. Marcombo Boixareu editores. Barcelona.

- MacDicken K. G. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, VA: Winrock International Institute for Agricultural Development. Forest Carbon Monitoring Program. 87 p.
- Martínez C. J. L. y C. E. Martínez P. 1996. Características de maquinado de 32 especies de madera. *Madera y Bosques* 2(1): 45-61.
- Masera O. 1995. 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.; M. J. Ordóñez and R. Dirzo 1997. Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35: 265-295.
- Memoria del Inventario Forestal del Estado de Hidalgo 1985. Manejo y aprovechamiento de los recursos forestales. 69 p.
- Montoya G.; L. Soto; B. de Jong; K. Nelson; P. Farias; Tic Pajal Yakac; J. Taylor y R. Tipper 1995. Desarrollo forestal sustentable: captura de carbono en las zonas Tzeltal y Tojolabal del estado de Chiapas. Instituto Nacional de Ecología. Cuadernos de Trabajo 4. México, D. F. 50 p.
- Nakama V.; A. Alfieri; R. Casas; A. Lupi; G. López y P. Pathauer 2003. Secuestro de carbono en plantaciones forestales de la región centro oeste de la provincia de Buenos Aires. 11 p.
- Olguín M. 2001. Incorporación de la captura de carbono como propuesta de manejo forestal integral: estudio de caso en una comunidad de la meseta Purépecha, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias-UNAM. México. 73 p.
- Oliva M. y F. García O. 1998. Un nuevo campo de acción en la química biológica: Parte I. Generalidades sobre el cambio global. Educ. Química. UNAM. México.

- Ordóñez D., J. A. B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP. Desarrollo gráfico editorial. México, D. F. 72 p.
- Ordóñez D., J. A. B. y O. Masera 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7 (1): 3-12.
- Pennington T. D. y J. Sarukhán 1998. Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. 2a. edición. Universidad Nacional Autónoma de México. Fondo de Cultura Económica. México D. F. 521 p.
- Post W. M.; T. H. Peng; W. R. Emmanuel; A. W. King; V. H. Dale and D. L. DeAngelis 1990. The global carbon cycle. *American Scientist*. 78: 310-326.
- Prodan M.; R. Peters; F. Cox y P. Real 1997. *Mensura Forestal*. Serie de investigación y educación en desarrollo sostenible. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura (IICA)/BMZ/GTZ. San José, Costa Rica. 561 p.
- Puig H. y R. Bracho. 1987. El Bosque mesófilo de montaña de Tamaulipas. Instituto de Ecología. México, D. F. 186 p.
- Raev I.; U. Asan y O. Grozev 1996. Acumulación de CO₂ en la parte aérea de la biomasa de los bosques de Turquía y Bulgaria en las últimas décadas. XII Congreso Mundial Forestal. Natalia, Turquía. pp. 123-130.
- Ralph R. 2000. *Asuntos forestales: los bosques tropicales y los cambios climáticos*. Dirección general de políticas. Agencia canadiense para el desarrollo internacional. Québec, Canada. 14 p.
- Reyes G.; S. Brown; J. Chapman and A. E. Lugo 1992. Wood densities of tropical tree species. U. S. Department of Agriculture. Forest Service. Southern Forest Experiment station. New Orleans, Luisiana. 15 p.

- Rodríguez L. R.; J. Jiménez P.; O. Aguirre C. y E. Treviño G. 2006. Estimación de carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. *Ciencia-UANL*. Monterrey, N. L. 9(2): 179-187.
- Salisbury F. R. C. 1994. *Fisiología vegetal*. Ed. Iberoamericana. 759 p.
- Sánchez R. G.; P. Reyes C. y R. Dirzo 2005. *Historia natural de la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México*. Universidad Autónoma de Tamaulipas. 732 p.
- Sarmiento J. L. and N. Gruber 2002. Sinks for anthropogenic carbon. *Physics Today*. 55(8): 30-36
- Schlegel B.; Gayoso J. y J. Guerra 2001. *Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales*. En el proyecto de medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 15 p.
- Schulze E. D.; Ch. Wirth and M. Heimann. 2000. Managing forest after Kyoto. *Science*. 289(5487): 2058-2059.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) 2001. *México II Comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático*. Comité intersecretarial sobre cambio climático. SEMARNAT-INE. México, D. F 374 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) 2004. *Introducción a los servicios ambientales*. *Hombre Naturaleza*. Primera reimpresión. Méx. 71 p.
- Smaglik P. 2000. United States backs soil strategy in fight against global warming. *Nature* 406: 549-550.
- Smith T. M.; W. P. Cramer; R. K. Dixon; R. Leemans; R. P. Neilson and A. M. Solomon 1993. The global terrestrial carbon cycle. *In: Wisniewski J. and R. N. Sampson*

- (Eds). Terrestrial biosphere carbon fluxes: quantification and sources of CO₂
Kluwer Academic Publishers, Netherlands. pp. 19-37.
- Snowdon P.; J. Raison; H. Keith; K. Montagu; K. Bi; P. Ritson; P. Grierson; M. Adams;
W. Burrows and D. Eamus 2001. Protocol for sampling tree and stand biomass.
National carbon accounting system technical report No. 31 Draft-March 2001.
Australian Greenhouse Office. 114 p.
- Ter-Mikaelian M. T. and M. D. Korzukhin. 1997. Biomass equation for sixty-five North
American tree species. *Forest Ecology and Management*. 97: 1-24.
- Tuset R. y F. Duran 1979. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de
utilización. Editorial Hemisferio Sur. Montevideo, Uruguay. 688 p.
- West T. O.; G. Marland; A. W. King and W. M. Post 2004. Carbon management
response curves: estimates of temporal soil carbon dynamics. *Environmental
Management* 33(4): 507-518.

CAPITULO 3

3. ESTIMACIÓN DEL CARBONO ALMACENADO EN EL BOSQUE MESÓFILO

RESUMEN

Con la finalidad de conocer la cantidad de carbono almacenado en el bosque mesófilo de montaña, se levantaron sitios de muestreo al azar (1000 m²), en lugares que no hubiera plantas indicadoras de perturbación y que presentaran diversidad de especies arbóreas con diferentes categorías diamétricas. Para determinar la biomasa se aplicó un modelo de la forma $\beta = a_0 * (DN)^{a_1}$ donde β es el peso seco de la biomasa (kg), DN es el diámetro normal en centímetros y a_0 , a_1 son los parámetros a estimar. Dicho modelo tuvo el mejor ajuste en las especies arbóreas del bosque mesófilo ($R^2=0.95$). Posteriormente se estimó el carbono almacenado en los fustes de los árboles obteniendo una cantidad de 567,116.6 toneladas de carbono presente en el bosque mesófilo dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.

ABSTRACT

With the purpose to know the quantity of the stored carbon in the cloud forest, random sampling sites were used (1000 m²) in places with no presence of disturbance plants indicators and arboreal species and diversity of diametrical categories. In order to determine the biomass the model fitted $\beta = a_0 * (DN)^{a_1}$ where β is the biomass (kg) dry

weight, DN is the normal diameter in centimeters and a_0 , a_1 are the parameters to consider. This model had the best adjustment in arboreal species of the cloud forest ($R^2=0.95$). Later estimate the stored carbon in the aerial part of the trees was 567,116.6 tC present in the cloud forest in Biosphere Reserve El Cielo, Tamaulipas.

3.1. INTRODUCCIÓN

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 (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), el ozono (O_3), el bióxido de azufre (SO_2) y los clorofluorocarbonos (CFC). Se estima que el CO_2 es el responsable del 71.5 % del efecto invernadero (Houghton y Woodwell, 1989; Schneider, 1989; Goudie, 1990; Lashof y Ahuja, 1990; Dixon *et al.*, 1994; Masera, 1995). Los otros gases con concentraciones menores producen el mismo efecto. El uso de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo son considerados a nivel mundial como las dos principales fuentes básicas de CO_2 en la atmósfera relacionadas con el cambio climático global (Mintzer, 1992).

Se han planteado distintas opciones para la mitigación del cambio climático, como innovaciones tecnológicas en los procesos productivos, el uso de energías alternativas al combustible fósil, la posibilidad de enterrar el CO_2 en las profundidades del océano o en cavernas, etc. No obstante, hoy se consideran también los proyectos forestales por la razón fundamental, mediante la cual la energía solar activa el proceso de fotosíntesis y las plantas capturan el CO_2 de la atmósfera y lo fijan en sus células como carbono, liberando oxígeno. Como resultado de este proceso, las plantas se desarrollan y

crecen; es así como aproximadamente el 50% de la biomasa es carbono (Koch, 1989; Husch, 2001).

Los bosques son los almacenes más importantes del mundo y son responsables por la mayor parte de los flujos de carbono entre la tierra y la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración (Binkley et al., 1997; Tipper, 1998). Aproximadamente el 90% de la biomasa acumulada en la tierra se encuentra en los bosques en forma de fustes, ramas, hojas, raíces y materia orgánica (Leith y Whithacker, 1975; Raev *et al.*, 1996; Birdsey y Heath, 2001).

El CO₂ atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. Este CO₂ participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol se desarrolle (follaje, ramas, raíces y tronco). Al crecer, incrementa su follaje, ramas, flores, frutos y yemas de crecimiento (que en 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 y a su vez, los troncos al ir aumentando su diámetro y altura alcanzarán un tamaño aprovechable en términos comerciales, pudiéndose extraer productos elaborados. Estos productos finales tienen un tiempo de vida determinado, después del cual se degradan aportando CO₂ al suelo y/o atmósfera. Durante el tiempo en que el CO₂ se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol —y hasta que es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera— se considera almacenado (Ordóñez, 1999; Jaramillo, 2004).

México en la última década ha mantenido una política de desarrollo nacional consistente con una decidida acción para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero; ha promovido diversas medidas para contribuir no sólo a mejorar la

eficiencia de su economía, sino también a impulsar un desarrollo sustentable (SEMARNAT, 2001). Así, en México, uno de los países con mayor biodiversidad ha incrementado la superficie del territorio nacional ocupada por las áreas naturales protegidas (ANP) y por unidades de manejo y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre (UMA). La superficie que constituye las ANP's pasó de 13.4 millones de hectáreas en el año de 1994 a 17 millones de hectáreas para el año 2000. Por su parte, la superficie ocupada por las UMA's pasó de 2.0 a 14.1 millones de hectáreas durante el período 1995-2000 (SEMARNAT, 2001).

En los bosques de niebla en México por las condiciones fisiográficas y climáticas que prevalecen todo el año, no están bajo manejo, sustentando la vegetación por más tiempo, excepto cuando se presenta un disturbio natural (incendio forestal, caída de árboles por viento, huracanes, etc.) (Sánchez *et al.*, 2005). Adicionalmente este tipo de ecosistema presta servicios ambientales de excepcional magnitud, al ubicarse en laderas montañosas expuestas a las precipitaciones altas proveen un aporte de agua muy importante a la hidrología local y regional.

En el estado de Tamaulipas se encuentran 10 de los 11 sistemas ecológicos principales y 25 de los 39 tipos de vegetación reconocidos para el país (Flores y Gerez, 1994). Entre los principales tipos de vegetación se encuentran el bosque tropical perennifolio, bosque tropical subcaducifolio, bosque espinoso, matorral xerófilo, pastizal, bosque de encinos, bosque de coníferas, bosque mesófilo de montaña – también conocido como bosque de niebla– (Figura 11), vegetación acuática y subacuática, vegetación alpina y subalpina, palmar y vegetación halófila (Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2003).



Figura 11. Vegetación característica del bosque mesófilo de montaña en la Reserva de la Biosfera El Cielo Tamaulipas.

El bosque mesófilo de montaña cubre menos del 1% del territorio nacional (Flores *et al.*, 1971). Esta clase de formación vegetal se encuentra en una zona montañosa lo que hace un difícil acceso. Así mismo, el relieve montañoso y la coincidencia de varios climas y tipos de vegetación en una extensión relativamente pequeña, así como la historia geológica y localización geográfica de la región han producido un buen número de endemismos tanto de plantas vasculares y briofitas como de vertebrados e invertebrados. Se forma un bosque mixto con 4 subestratos arbóreos, denso, abundante en lianas, epífitas y plantas no vasculares que prosperan debido a la alta humedad relativa que prevalece todo el año (Puig y Bracho, 1987).

Por ello, se planteó el objetivo de generar un modelo alométrico para estimar la biomasa aérea individual a partir de la variable diámetro normal en las especies dominantes del bosque mesófilo y posteriormente hacer la estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea del bosque mesófilo.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en la Reserva de la Biosfera El Cielo, localizada al sur del estado de Tamaulipas y comprende ambas vertientes en una porción de la Sierra Madre Oriental, en lo que se denomina como Sierra de Cucharas o de Guatemala; tiene una superficie de 144,530 hectáreas y comprende los municipios de Gómez Farías, Jaumave, Llera y Ocampo (Figura 5 ver página 24). Está limitado por los paralelos 22° 55' 30" y 23° 25' 50" Norte y los meridianos 99° 05' 50" y 99° 26'30" Oeste (Suzán y Fragoso, 1989).

El bosque mesófilo forma una franja orientada de sur a norte, más ancha hacia la porción sur, cerca de la población Alta Cima, alcanza su límite norte en la región de Monte Carlo donde se presenta únicamente en el interior de cañadas, que lo protegen de la insolación. Sus límites altitudinales se localizan entre 800 a 1500 msnm y abarca un área de 10,000 hectáreas (Puig y Bracho, 1987; Arriaga, 2005). La vegetación de la región la han descrito varios autores (Hernández *et al.*, 1951; Sharp, 1953; Rzedowski, 1978; Lonard y Ross, 1979), como una mezcla de especies de afinidad tropical y templada, en donde las especies de afinidad templada que dominan el dosel superior son *Liquidambar styraciflua* L, los encinos *Quercus sartorii* Liebm. y *Q. germana* Cham. et Schlecht., *Clethra pringlei* S. Wats., *Magnolia schiedeana* Schlecht., *Podocarpus reichei* Buch et Gray, y *Acer skutchii* Rehder.

3.2.1. Selección de los sitios en campo

El muestreo se realizó en los meses de octubre y noviembre del año 2003, cuando la mayoría de la vegetación presentaba su follaje. En campo se utilizó el diseño de muestreo estratificado tomando en cuenta las siguientes características: a) sitio conservado, que no tuviera vegetación indicadora de perturbación; b) diversidad, con

más de tres especies presentes; c) diferenciación diamétrica, con individuos de diferente diámetro, de preferencia uno adulto de diámetro mayor e individuos de diferente diámetro; d) especies características del tipo de vegetación. El sitio debe ser representativo del tipo de vegetación y de preferencia sin pendiente pronunciada (Schlegel *et al.*, 2000; Jiménez, 2003).

En campo se eligieron siete sitios de 1000 m² cada uno (20x50 m), tomando las siguientes mediciones en la vegetación para cada sitio: numeración ascendente de los individuos, identificación por especie de los individuos, medición del diámetro a 1.3 m, medición de altura de los individuos. El sitio de muestreo se dividió en cuatro cuadrantes (10x25 m), midiendo en el cuadrante I todos los individuos presentes, los individuos menores de 5 cm de diámetro se consideraron como regeneración (Schlegel *et al.*, 2000). En el resto de los cuadrantes se midió únicamente los individuos mayores a 5 cm de diámetro.

3.2.2. Funciones volumétricas y de biomasa

Con los datos obtenidos en campo se realizó la determinación volumétrica y de biomasa de las diversas especies encontradas, utilizando modelos matemáticos de Maser (2001) y Torres y Guevara (2002). Para las especies de latifoliadas y coníferas que presentan una mejor estimación. Se procedió a separar los individuos de acuerdo a sus dimensiones por especie, obteniendo una mejor ubicación del volumen dentro del bosque mesófilo de montaña. Los modelos matemáticos que presentaron el mejor ajuste de acuerdo a los criterios de bondad estadísticos (R² y valor de F), son los siguientes:

a) Para determinación volumétrica en especies de latifoliadas

$$V = a_0 * (d)^{a1}$$

Donde:

V = volumen

d = diámetro a 1.3 m.

a_0, a_1 = coeficientes de la regresión

b) Para determinación volumétrica en especies de coníferas

$$V = a_0 + a_1 * d^2 + a_2 * h + a_3 * d^2 * h$$

Donde:

V = volumen

d = diámetro a 1.3 m.

h = altura

a_0, a_1, a_2, a_3 = coeficientes de la regresión

En la mayoría de las especies presentes en el bosque mesófilo de montaña no se encontraron valores de densidad de la madera. Con el propósito de ser conservador en el valor de la densidad específica de la madera, se decidió utilizar un valor de densidad bajo (0.46 g/cm^3), logrando que el volumen en metros cúbicos se transformará a valor de biomasa en kilogramos (Carmona *et al.*, 1998; Jovanouski *et al.*, 1998).

Después de obtener los valores de biomasa en todas las especies, se procedió a determinar los valores de carbono a nivel especie, conforme a su estatus de latifoliada o conífera, en las especies arbóreas de latifoliadas se utilizó una constante de 0.531 y en las coníferas de 0.521 como factor de conversión de carbono (Koch, 1989).

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1. Categorías diamétricas

Con la información colectada en campo se inició el proceso matemático de la misma, mostrando los individuos por categoría diamétrica, una tendencia a la heterogeneidad (Figura 12). Tal definición en las categorías diamétricas los ubica dentro de los bosques de selección, donde la mayoría de los árboles se presentan en las primeras categorías y sólo algunos individuos ocurren de manera aislada en las categorías diamétricas mayores. Estas condiciones ubican al ecosistema (bosque mesófilo de montaña) en una fase de alto dinamismo. Lo anterior coincide con la información proporcionada por otros autores (Corral *et al.*, 2001) en los que menciona que hace más de veinte años hubo un aprovechamiento forestal dentro del bosque mesófilo de montaña. Sin embargo, este ecosistema tiende a recuperarse al mostrar una alta diversidad que se debe principalmente a la combinación de la elevada humedad y las bajas temperaturas, que prevalecen en la mayor parte del año.

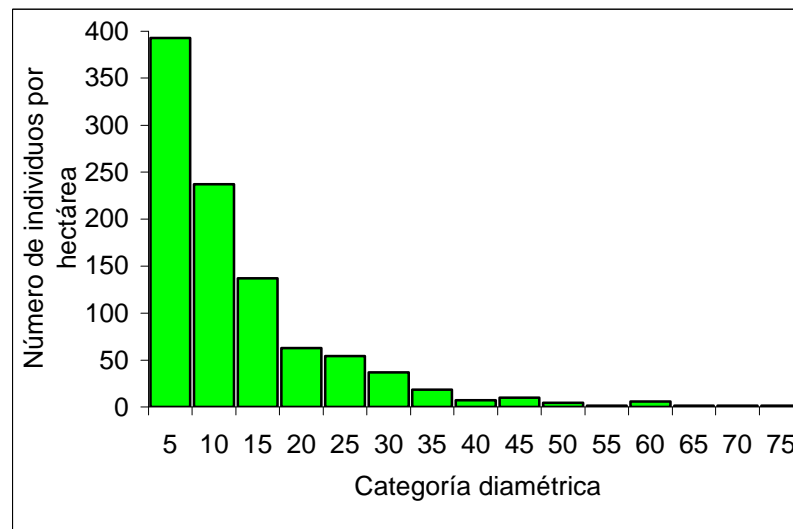


Figura 12. Número de individuos por categoría diamétrica por hectárea en el bosque mesófilo.

Las especies arbóreas con mayor frecuencia en el bosque mesófilo de montaña son *Podocarpus reichei* con 147 individuos por hectárea, *Carpinus caroliniana*, *Liquidambar styraciflua* y *Quercus xalapensis* con 107 ind ha⁻¹ cada una; y las especies con menor frecuencia son *Acer skutchii*, *Ceiba pentandra*, *Illicium floridanum*, *Magnolia tamaulipana*, *Melia azedarach* y *Senna guatemalensis* con 1.4 ind ha⁻¹. Es posible que algunas especies pudieron no estar presentes en los sitios de muestreo, de acuerdo a la lista de especies que se reporta para el bosque mesófilo en la Reserva de la Biosfera El Cielo (Arriaga, 2005). En este ecosistema las especies con alto potencial de crecimiento y desarrollo son *Carpinus caroliniana*, *Ternstroemia sylvatica* y *Ficus spp.* debido al mayor número de individuos por hectárea en la categoría diamétrica de 5 cm con 64, 63 y 59 respectivamente. Sin embargo, se localizaron árboles superiores a los 40 cm de diámetro normal en las especies *Liquidambar styraciflua*, *Quercus xalapensis* y *Pinus montezumae* con 15, 8 y 7 individuos por hectárea. Lo que representa una mayor cantidad de carbono fijado en los fustes, ramas, hojas y raíces; en cambio, los árboles con una tasa de mayor crecimiento se encuentran en el proceso de mayor fijación de carbono en sus componentes (Valenzuela, 2001).

El resultado del modelo de regresión no lineal probado para estimar volumen en individuos de latifoliadas (Potencial), resultó ser el mejor en razón a los criterios de bondad de ajuste (R^2 y valor de F). En la figura 13 se muestra la curva de ajuste para *Carpinus caroliniana* con un coeficiente de determinación de 0.99 significando la confiabilidad con la que un modelo de regresión puede generar resultados adecuados. En esta investigación se aplicó el modelo potencial para cada una de las especies presentes en el bosque mesófilo, obteniendo un coeficiente de determinación por arriba de 0.95, excepto en *Podocarpus reichei* con un $R^2=0.93$ (Cuadro 4). Dentro del bosque

mesófilo se encontraron especies no significativas debido a su diámetro y número de individuos por lo que se agruparon como una sola especie dentro del grupo de las latifoliadas.

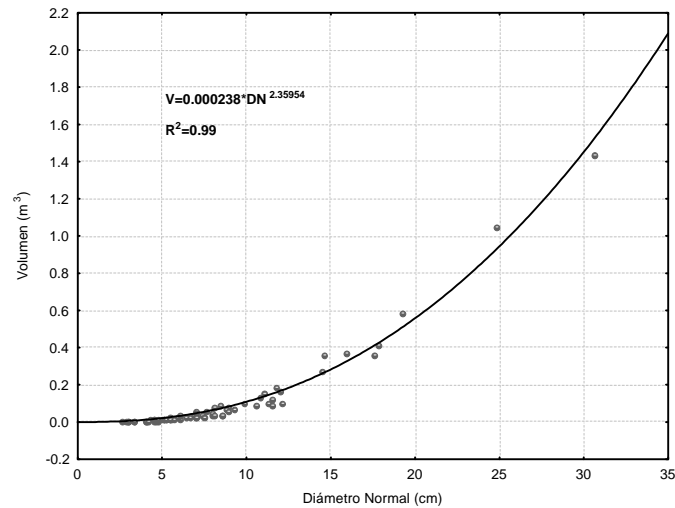


Figura 13. Determinación de volumen para *Carpinus caroliniana* en el bosque mesófilo.

Los resultados del modelo de regresión muestran que la especie de *Liquidambar styraciflua* aportó el mayor volumen con $62 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, mientras que las cuatro especies del género *Quercus* aportaron $54 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ lo que suman más del 49.8% del volumen total entre estos dos géneros. En los estados de Hidalgo (com. personal Razo, 2006) y Veracruz (com. personal Reynoso, 2006) los bosques de niebla poseen menos de $195 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en los fustes del estrato arbóreo; volumen inferior al encontrado en este estudio.

Después de la determinación del volumen, se procedió a calcular la biomasa correspondiente para cada especie, aplicando el modelo no lineal, obteniendo un coeficiente de determinación por especie, superior al 0.95 excepto para *Ficus spp* y *Podocarpus reichei* con 0.92 y 0.93 respectivamente. En la figura 14 se muestra la

Cuadro 4. Coeficiente de determinación (R^2) y valor de F para estimar volumen en especies del bosque mesófilo.

Espece	n	R^2	f
<i>Carpinus caroliniana</i>	75	0.99	2426.6
<i>Carya ovata</i>	20	0.98	401.2
<i>Clethra pringleii</i>	12	0.97	139.6
<i>Liquidambar styraciflua</i>	74	0.96	836.2
<i>Nectandra sanguinea</i>	20	0.95	175.3
<i>Quercus sartorii</i>	11	0.96	87.7
<i>Quercus xalapensis</i>	77	0.98	1740.0
<i>Podocarpus reichei</i>	103	0.93	700.5
Otras sp.	143	0.95	1416.6

curva de ajuste de *Carpinus caroliniana* para estimar biomasa con un R^2 de 0.98 significando la confiabilidad con la que un modelo de regresión puede generar resultados adecuados. El modelo estimó más de 28.5 t ha⁻¹ de biomasa en los árboles de *Liquidambar styraciflua*, seguidos de los árboles de *Pinus montezumae* y *Quercus xalapensis* con más de 18.4 t ha⁻¹ de biomasa. Además, se encontró que la vegetación del bosque mesófilo de montaña contiene un gran número de árboles en las categorías diamétricas de 5 y 10 cm. como son el *Podocarpus reichei*, *Carpinus caroliniana* y *Ternstroemia sylvatica* (Cuadro 5), la biomasa de estas tres especies suman casi 13.5 t ha⁻¹.

Otros bosques maduros contienen mayor cantidad de biomasa aérea por hectárea, como es el caso del bosque de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Distrito Federal

(Valenzuela, 2001). Sin embargo es importante resaltar que en los fustes del arbolado del bosque mesófilo de montaña en Tamaulipas se almacenan más de 1'071,490.1 t de biomasa.

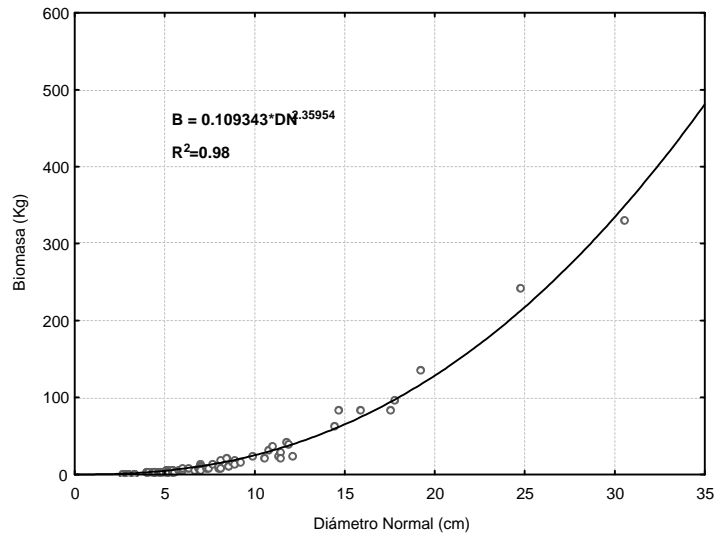


Figura 14. Determinación de biomasa en *Carpinus caroliniana* en el bosque mesófilo.

El modelo potencial aplicado a las especies del bosque mesófilo arrojó los parámetros de la ordenada al origen y la pendiente de la línea de regresión diferentes estadísticamente ($P=0.01$) para la estimación de biomasa por especie, encontrando una diferencia entre los extremos de la ordenada al origen de 0.304413 y en la pendiente de la línea de regresión de 1.32925; desde un punto de vista estadístico el modelo desarrollado en este trabajo es aplicable estrictamente a las especies consideradas, no incluyendo la biomasa de los otros componentes aéreos (ramas, follaje etc.). Una ventaja de este tipo de ecuaciones alométricas es que teniendo el diámetro de los árboles se puede sustituir en el modelo de la forma $\beta = a_0 \cdot (DN)^{a_1}$ para estimar la biomasa de manera confiable y rápida (Cuadro 6). Donde β es la biomasa en kg., DN es el diámetro en cm y a_0 , a_1 son los parámetros estimados por el modelo (Acosta, 2003).

Cuadro 5. Número de individuos, volumen y biomasa por hectárea en categorías diamétricas por especie dentro del bosque mesófilo.

Especie		Categoría diamétrica					
		5	10	15	20	25	30
<i>Carpinus caroliniana</i>	Ind ^a	64.3	31.4	4.3	4.3	1.4	1.4
	Vol ^b	0.7	1.7	0.6	1.2	0.7	1.0
	Bio ^c	0.3	0.8	0.3	0.6	0.3	0.5
<i>Nectandra sanguinea</i>	Ind ^a	7.1	7.1	5.7	2.9	2.9	-
	Vol ^b	0.1	0.4	0.8	0.8	1.4	-
	Bio ^c	0.1	0.2	0.4	0.4	0.6	-
<i>Podocarpus reichei</i>	Ind ^a	38.6	45.7	35.7	14.3	8.6	4.3
	Vol ^b	0.4	2.5	5.1	4.0	4.1	3.1
	Bio ^c	0.2	1.2	2.3	1.8	1.9	1.4
<i>Quercus rysophylla</i>	Ind ^a	11.4	1.4	2.9	1.4	-	1.4
	Vol ^b	0.1	0.1	0.4	0.4	-	1.0
	Bio ^c	0.1	0.1	0.2	0.2	-	0.5
<i>Clethra pringleii</i>	Ind ^a	2.9	7.1	4.3	2.9	-	-
	Vol ^b	0.0	0.4	0.6	0.8	-	-
	Bio ^c	0.0	0.2	0.3	0.4	-	-
<i>Carya ovata</i>	Ind ^a	14.5	10.0	1.4	-	2.9	-
	Vol ^b	0.2	0.5	0.2	-	1.4	-
	Bio ^c	0.07	0.3	0.09	-	0.6	-
<i>Liquidambar styraciflua</i>	Ind ^a	12.9	18.6	17.1	14.3	17.1	7.1
	Vol ^b	0.1	1.0	2.4	4.0	8.1	5.2
	Bio ^c	0.06	0.5	1.1	1.8	3.7	2.4
<i>Quercus sartorii</i>	Ind ^a	4.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
	Vol ^b	0.05	0.08	0.2	0.4	0.7	1.0
	Bio ^c	0.02	0.04	0.09	0.2	0.3	0.5
<i>Quercus xalapensis</i>	Ind ^a	35.7	22.9	14.3	8.6	1.4	11.4
	Vol ^b	0.4	1.2	2.0	2.4	0.7	8.3
	Bio ^c	0.2	0.6	0.9	1.1	0.3	3.8
<i>Ternstroemia sylvatica</i>	Ind ^a	62.7	27.1	7.1	-	-	1.4
	Vol ^b	0.7	1.5	1.0	-	-	1.0
	Bio ^c	0.3	0.7	0.5	-	-	0.5
Otras sp.	Ind ^a	77.1	58.6	38.6	8.6	14.3	4.3
	Vol ^b	0.8	3.2	5.5	2.4	6.8	3.1
	Bio ^c	0.4	1.5	2.5	1.1	3.1	1.4

^aIndividuos por hectárea; ^bVolumen (m³ ha⁻¹); ^cBiomasa (t ha⁻¹)

Nota: se muestran resultados de 11 de las 21 especies

Hoover *et al.* (2000) utilizó el mismo método para estimar biomasa, al usar el volumen de la madera en diferentes tipos de bosque en EE. UU., incluyendo poblaciones naturales y reforestaciones. Brown y Lugo (1984) se basaron en el volumen del fuste para estimar la biomasa en bosques tropicales, ambas metodologías

no incluyeron la biomasa de otros componentes aéreos, además, también utilizaron un factor asociado a la densidad de la madera para convertir el volumen en biomasa.

Cuadro 6. Coeficientes de la regresión (a_0 , a_1) para estimar biomasa en especies del bosque mesófilo.

Especie	Parámetros	
	A_0	a_1
<i>Carpinus caroliniana</i>	0.109343	2.35954
<i>Carya ovata</i>	0.061554	2.53157
<i>Clethra pringleii</i>	0.067833	2.50972
<i>Ficus sp</i>	0.027059	2.86357
<i>Liquidambar styraciflua</i>	0.180272	2.27177
<i>Nectandra sanguinea</i>	0.004038	3.35693
<i>Podocarpus reichei</i>	0.132107	2.2217
<i>Quercus rysophylla</i>	0.266424	2.02768
<i>Quercus sartorii</i>	0.221123	2.20188
<i>Quercus xalapensis</i>	0.308451	2.1323
<i>Ternstroemia Sylvatica</i>	0.035689	2.70679
<i>Otras sp.</i>	0.060778	2.56487

Acosta (2003), en el bosque mesófilo de montaña de la Sierra Norte de Oaxaca, generó ecuaciones alométricas, considerando todos los componentes aéreos de las especies para estimar biomasa. Estas ecuaciones difieren en el parámetro estimado de la ordenada al origen, en cambio son casi similares los valores de la pendiente de la línea de regresión comparadas con las obtenidas en este trabajo. Sin embargo en otro estudio (Geron y Ruark, 1988) con cinco especies tropicales utilizaron la misma ecuación de regresión obteniendo una R^2 mayor del 0.97.

3.3.2. Inventario de carbono

Una vez determinados los valores de biomasa por categoría diamétrica en todas las especies se procedió a determinar los valores de carbono a nivel especie (Cuadro 7), conforme a su estatus de latifoliada o conífera.

La cantidad de carbono presente en el componente aéreo en el bosque mesófilo de montaña, esta dado por árboles, arbustos, hierbas y hojarasca. En este caso se estimó sólo el carbono almacenado en los fustes de los árboles, obteniendo 56.7 tC ha^{-1} . En otro estudio se reporta para el componente arbóreo valores de 93.2 tC ha^{-1} para la región de Mazateca y 30.5 tC ha^{-1} para la región Cuicateca, las dos dentro del bosque mesófilo de montaña en la Sierra Norte de Oaxaca (Acosta, 2003). Sin embargo es substancial el aporte que hace el bosque mesófilo de montaña en Tamaulipas al mantener secuestrado en los fustes de los árboles $567,116.6 \text{ t C}$. Adicionalmente las condiciones geográficas donde se localiza el bosque mesófilo, su orografía y cercanía con el golfo de México, conforma una barrera natural para los vientos húmedos del este y suroeste; de esta manera se descargan aquí grandes cantidades de humedad, en forma de lluvia o de niebla, con temperaturas bajas, permitiendo que los árboles, ramas, hojas, etc. caídos al suelo permanezcan sin descomponerse conservando el carbono secuestrado por largo periodos (Arriaga, 2005).

Cuadro 7. Valores de carbono total por especie encontrado en el bosque mesófilo.

Especie	Carbono ha⁻¹ (kg)	Biomasa TOTAL (t)	Carbono TOTAL (t)
<i>Acer skutchii</i>	2 371.2	44 654.8	23 711.7
<i>Carpinus caroliniana</i>	1 444.8	27 209.2	14 448.1
<i>Carya ovata</i>	549.8	10 354.1	5 498.0
<i>Ceiba pentandra</i>	49.5	931.7	494.7
<i>Cercis canadensis</i>	615.5	11 591.5	6 155.1
<i>Clethra pringleii</i>	445.9	8 397.8	4 459.2
<i>Ficus sp</i>	189.8	3 575.2	1 898.4
<i>Illicium floridanum</i>	22.7	427.7	227.1
<i>Liquidambar styraciflua</i>	15 149.9	285 308.9	151 499.0
<i>Magnolia tamaulipana</i>	97.5	1 836.8	975.4
<i>Melia azedarach</i>	19.0	357.9	190.1
<i>Nectandra sanguinea</i>	1 202.0	22 637.3	12 020.4
<i>Pinus montezumae</i>	9 610.6	184 464.9	96 106.2
<i>Podocarpus reichei</i>	4 672.8	88 000.0	46 728.0
<i>Quercus germana</i>	1 038.2	19 551.8	10 382.0
<i>Quercus rysophylla</i>	499.0	9 397.5	4 990.1
<i>Quercus sartorii</i>	1 692.0	31 864.0	16 919.8
<i>Quercus xalapensis</i>	9 968.6	187 732.8	99 686.1
<i>Senna guatemalensis</i>	3.7	69.7	37.0
<i>Ternstroemia sylvatica</i>	1 025.3	19 308.9	10 253.0
<i>Otras sp</i>	6 043.7	113 817.5	60 437.1
Total	56 711.7	1 071 490	567 116.6

3.4. CONCLUSIONES

El modelo alométrico propuesto para estimar biomasa en los fustes del bosque mesófilo de montaña en Tamaulipas, se ajustó con valores altos del coeficiente de determinación ($R^2 > 0.95$). Este valor indica la confianza con la que se puede estimar la

biomasa para cada especie arbórea dentro del bosque mesófilo de montaña, utilizando sólo la variable diámetro normal. A su vez, se estimó para el bosque mesófilo la cantidad de 567,116.6 toneladas de carbono almacenado sólo en los fustes de los árboles, adicionalmente este ecosistema se convierte en un almacenamiento de carbono durable al incrementar la masa maderable por medio del crecimiento de los árboles hasta llegar a su madurez.

3.5. LITERATURA CITADA

- Acosta M. M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 99 p.
- Arriaga L. 2005. Disturbio y regeneración naturales del bosque mesófilo *In*: Historia natural de la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Sánchez R. G., P. Reyes C. y R. Dirzo (eds.). Universidad Autónoma de Tamaulipas. pp. 130-146.
- Birdsey R. A. y L. S. Heath 2001. Forest inventory data, models and assumptions for monitoring carbon flux. *In*: Soil carbon sequestration and the greenhouse effect. USDA Forest Service, Pennsylvania. Special publication number 57. pp. 125-135
- Brown S. and A. E. Lugo 1984. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science* 223(4642):1290-1293.
- Carmona C. R. J.; F. Espinoza y S. C. Bull 1998. Influencia de la densidad de la madera en la encolabilidad de *Pinus radiata* D. DON. *Revista Ciencias Forestales*. Universidad de Chile. Chile. Vol. 12-13 No.1-2.

- Corral R. J.; O. A. Aguirre C.; J. Jiménez P. y J. J. Návar Ch. 2001. Muestreo de diversidad y observaciones ecológicas del estado arbóreo del bosque mesófilo de montaña El Cielo, Tamaulipas.
- Dixon R. K.; S. Brown; R. A. Houghton; A. M. Solomon; M. C. Trexler and J. Wisniewski 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*. 263(5144): 185-190.
- Flores M. G.; L. Jiménez J.; S. Madrigal X.; R. Moncayo F. y F. Takaki 1971. Memoria del mapa de tipos de vegetación de la República Mexicana. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México. D. F.
- Flores V. O. y A. Gerez P. 1994. Biodiversidad y conservación en México. Vertebrados y vegetación y uso de suelo. CONABIO y UNAM. México. 439 p.
- Geron C. D. and G. A. Ruark 1988. Comparison of constant and variable allometric ratios for predicting foliar biomass of various tree genera. *Canadian Journal of Forest Research* 18(10):1298-1304.
- Gobierno del Estado de Tamaulipas 2003. Diagnostico Ecológico del Estado de Tamaulipas. SEDUE. En www.tamaulipas.gob.mx/sedue/des_sustentable/recur_naturales/diagnostico/informaciongeneral.htm
- Goudie A. 1990. The human impact on the natural environment. Basil Blackwell Ltd. 3ra ed. Oxford. U.K. 388 p.
- Hernández E.; C. Howard; W. B. Fox y A. J. Sharp 1951. A unique vegetational area in Tamaulipas. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*. 78: 458-463.
- Hoover C. M.; R. A. Birdsey; L. S. Heath and S. L. Stout 2000. How to estimate carbon sequestration on small forest tracts. *J. Forestry*. 98 (9): 13-19.

- Houghton R. A. and C. M. Woodwell 1989. Global climate change. *Scientific American*. 260(4): 36-40.
- Husch B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques *In: Simposio Internacional, Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Octubre, 2001. Valdivia, Chile.
- Jaramillo V. J. 2004. El ciclo global del carbono. *In: Cambio climático: una visión desde México*. Copiladores J. Martínez y A. Fernández. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. México. pp. 77-86.
- Jiménez P. J. 2003. Programa: fijación de carbono en la reserva de la biosfera El Cielo. Informe Final. Dirección de Recursos Naturales y Medio Ambiente. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. 64 p.
- Jovanovski A.; H. Poblete; M. Torres y A. Fernández 1998. Caracterización preliminar tecnológica de *Pinus ponderosa* (Dougl) creciendo en Chile. *Bosque* 19(2):71-76.
- Koch P. 1989. Estimates by Species Group and Region in the USA of: I Below-Ground Root Weight as a Percentage of Oven dry Complete-Tree Weight; and II Carbon Content of Tree Portions. Unpublished Consulting Report. 23 p.
- Lashof D. A. and D. R. Ahuja 1990. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature*. 344(5): 529-531.
- Leith H. and R. Whithacker 1975. Primary productivity of the biosphere. *Ecological Studies*. No. 14. New York.
- Lonard R. I. and R. G. Ross 1979. A vegetational analysis of a tropical cloud forest in Tamaulipas, México. *Texas Journal of Science*. 41: 143-150.
- Masera O. 1995. Carbon mitigation scenarios for Mexican forest: Methodological considerations and results. *Interciencia*. 20(6): 388-395.

- Masera O. 2001. Carbon sequestration dynamics in forestry projects: The CO₂FIX V.2 Model approach. *In*: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. 13 p.
- Mintzer I. M. 1992. Confronting climate change. Risk implications and responses. University Press, Cambridge.
- Ordóñez A. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Desarrollo Gráfico Editorial. México. D.F. 72 p.
- Puig H. y R. Bracho 1987. El Bosque mesófilo de montaña de Tamaulipas. Instituto de Ecología. México, D. F. 186 p.
- Raev, I.; U. Asan y O. Grozev 1996. Acumulación de CO₂ en la parte aérea de la biomasa de los bosques de Turquía y Bulgaria en las últimas décadas. XII Congreso Mundial Forestal, Natalia, Turquía. Pp. 123-130.
- Razo Z. R. 2006. Comunicación personal. Prestador de Servicios Técnicos en la zona de Zacualtipan, Hidalgo.
- Reynoso P. A. 2006. Comunicación personal. Prestador de Servicios Técnicos en la zona de Huayacocotla, Ver.
- Rzedowski J. 1978. Vegetación de México. Ed. Limusa. México D. F. 432 p.
- Sánchez-Ramos G., P. Reyes-Castillo y R. Dirzo (eds.) 2005. Historia natural de la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Impreso en Hong Kong. 732 p.
- Schlegel B.; J. Gayoso y J. Guerra 2000. Manual de procedimientos para muestreos de biomasa forestal. Universidad Austral de Chile. 24 p.
- Schneider S. H. 1989. The greenhouse effect: Science and Policy. Science. 243(10): 271-281.

- SEMARNAT 2001. México 2ª comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático. Comité intersecretarial sobre cambio climático. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT), Instituto nacional de ecología (INE). México D. F. 374 p.
- Sharp J. A. 1953. Notes on the flora of México world distribution of the woody dicotyledonous families and the origin of the modern vegetation. *Journal of Ecology*. 41: 374-380.
- Suzán H. y C. Frago 1989. Investigación y conservación en la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. *BIOTAM*, Vol. 1 N° 3. pp. 48-53.
- Tipper R. 1998. Update on carbon offsets. *Tropical Forest Update*. 8(1): 2-5.
- Torres, J. y A. Guevara 2002: El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de C y desempeño hidráulico. *Gaceta ecológica*. 40-58 pp.
- Valenzuela H. T. 2001. Estimación de secuestro de carbono en bosques naturales de Oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Distrito Federal. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales. UACH. Texcoco, Edo. de México. 127 p.

CAPITULO 4

4. ESTIMACIÓN DE CARBONO ALMACENADO EN EL BOSQUE DE PINO-ENCINO

RESUMEN

Diversas actividades humanas producen un exceso de gases de efecto invernadero que están potencialmente modificando el clima de la tierra. En tanto que los ecosistemas forestales están almacenando el carbono de la atmósfera en la biomasa y el suelo. En este sentido, el presente estudio tuvo como objetivo estimar y conocer la distribución del carbono almacenado en un bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Se midieron en los árboles los siguientes parámetros dasométricos; altura total, diámetro a 1.3 m, altura al inicio de copa para calcular el valor volumétrico, se estimó la biomasa con el modelo de regresión $\beta = a_0 * D^{a1}$. Dicho valor se multiplicó por el porcentaje de carbono de la especie (Solids TOC Analyzer) estimando una cantidad de biomasa de 219.3 t ha⁻¹. Se estimó un valor total de carbono de 110 t ha⁻¹, almacenadas en el fuste, ramas y hojas (75.3%), en raíces (15%), hojarasca (9%) y en renuevos y necromasa (0.4 y 0.3%) respectivamente.

ABSTRACT

The human activities are producing an excess of greenhouse gases that are warming potentially the climate of the earth. While the forest ecosystems are storing the

C in the biomass and the soil. In this respect, the present studies had as adjective estimate and know the distribution of the C stored in a forest of pine-oak that is protected within the reserve of the biosphere El Cielo, Tamaulipas, Mexico. For it, the total height, normal diameter, height to the beginning of crown were measured on the trees, and with this information the volume was calculated, the biomass was estimated by the model of the form $\beta=a_0*D^{a1}$ this value was multiplied by the percentage of C obtained with the equipment Solids TOC Analyzer for each species obtained the quantity of C stored by tree, the fallen leaves and rotten wood. With the model was obtained for each species a coefficient of determination (R^2) upper to 0.95. Nevertheless, 219.3 t ha⁻¹ were estimated of biomass. Also, a total of 110 tC ha⁻¹ was estimated and there are stored of the following form: in stems, branches and leaves are the 75.3%, in roots 15%, in the fallen leaves 9% and in the renew and rotten wood are the 0.4 and 0.3% respectively. This way the forest of pine-oak of the reserve of the biosphere El Cielo contributes to mitigate the global warming.

4.1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales contienen grandes cantidades de carbono almacenado en biomasa viva, muerta y en el suelo (Post *et al.*, 1982; Ordóñez y Masera, 2001). Sin embargo, en regiones tropicales y templadas hay un proceso acelerado de conversión de ecosistemas forestales con alta cantidad de biomasa a ecosistemas con bajos niveles, como vegetación secundaria, áreas cultivadas y pastizales (FAO, 1993). Las estimaciones del total del bióxido de carbono (CO₂) emitido a partir de estas

reducciones en biomasa y procesos de deforestación varían entre 8 y 44% del total de emisiones antropogénicas de CO₂ (Cook *et al.*, 1990; Schimel, 1995). Es claro que el problema del cambio climático global ya no es una posibilidad sino una realidad, como lo demuestran los resultados de las mediciones de la concentración atmosférica de CO₂, CH₄ (metano) y N₂O (óxido nitroso) que se han incrementado de manera paulatina desde mediados del siglo XVIII y de forma acelerada en los últimos 50 años del siglo XX, casi en forma paralela al aumento de las demandas energéticas de la población, lo que ha traído como consecuencia que la temperatura a nivel mundial también se haya incrementado (IPCC, 2001; Grace, 2004, IPCC, 2005).

Ante las posibles repercusiones del cambio atmosférico y climático, una gran atención se le ha prestado a la vegetación, y muy especialmente a las masas forestales, como potencial de sumidero del exceso de CO₂ emitido por la actividad humana a la atmósfera (Montoya *et al.*, 1995; Ordóñez, 1999). Estudios científicos señalan que hay mayor producción de biomasa al incrementar la concentración de CO₂ (Norby *et al.*, 1999; Ward y Strain, 1999; Sabaté *et al.*, 2002; Wullschleger *et al.*, 2002). Sin embargo el cambio climático es provocado por los llamados gases de efecto invernadero (GEI), y principalmente por bióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF₆), los cuales provocan el calentamiento gradual de la tierra al interceptar las radiaciones infrarrojas que se generan cuando la energía solar choca con la superficie de la tierra y la refleja hacia la atmósfera. Si la concentración de los GEI continua aumentando en la atmósfera al valor de las tasas actuales, se prevén alteraciones en variables de ecosistemas que terminarían por causar grandes cambios en factores climáticos en la

tierra en un futuro no lejano (Bouwman y Leemans, 1995; IPCC, 1997; Thomas *et al.*, 1997; Soroos, 1998; Couzin, 1999, IPCC, 2005).

En México el manejo de las áreas naturales protegidas y los bosques naturales son una de las mejores opciones para la captación de carbono, ofreciendo simultáneamente una alternativa para incrementar la producción, tanto maderable como no maderable. Así mismo, se identifican 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 las plantaciones energéticas (producción de leña) y los sistemas agroforestales (Masera, 1995).

Para proponer estrategias viables dirigidas a la mitigación del cambio climático es imprescindible conocer la dinámica del carbono en los ecosistemas forestales y las modificaciones a los flujos de carbono derivadas de los patrones de cambio de uso de suelo. Para lograr la mitigación del cambio climático es indispensable contar con la información básica sobre los contenidos de carbono en los diferentes almacenes del ecosistema (Ordóñez, 1998). Los principales almacenes de carbono en los ecosistemas forestales se encuentran fraccionados en cuatro componentes: biomasa sobre el suelo (vegetación), hojarasca, sistema radicular y carbono orgánico del suelo (Snowdon *et al.*, 2001). La vegetación incorpora el carbono atmosférico al ciclo biológico mediante la

fotosíntesis (Brown *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994; SEMARNAT, 2001; Sarmiento y Gruber, 2002).

La determinación adecuada de la biomasa de un bosque, es un elemento de gran importancia debido a que ésta permite determinar los montos de carbono por unidad de superficie y tipo de bosques, además de otros elementos químicos existentes en cada uno de sus componentes (Snowdon *et al.*, 2001). Esta información es de especial importancia en la actualidad, debido a la necesidad de conocer los montos de carbono capturado por los bosques naturales y plantaciones, como un medio para mitigar los cambios climáticos generados por el consumo de combustibles fósiles, que liberan una gran cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera.

La capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar carbono en forma de biomasa aérea varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal (Schulze *et al.*, 2000). La determinación de esta capacidad constituye un reto cuando se trata de evaluar el potencial de sistemas forestales, naturales, alterados o inducidos por el hombre. Si bien en México existen investigaciones con respecto al secuestro de carbono en diferentes ecosistemas (Olguín, 2001), en los ecosistemas del estado de Tamaulipas no se cuenta con información relativa a este tópico; por lo tanto, es necesario iniciar trabajos tendientes a establecer las bases metodológicas para la medición de biomasa y evaluar el carbono almacenado; con el fin de generar nuevas alternativas aptas para el desarrollo de las comunidades locales.

En base a lo expuesto anteriormente los objetivos del presente trabajo son:

1).- Estimar el carbono almacenado en el bosque de pino-encino dentro de la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México.

2).- Determinar la distribución de los almacenes aéreos de carbono en el bosque de pino-encino dentro de la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Se ubica dentro de los paralelos 22° 55' 30" y 23° 25' 50" Norte y los meridianos 99° 05' 50" y 99° 26' 30" Oeste (Figura 5, ver página 24). El bosque de pino-encino se encuentra principalmente en las comunidades 20 de Abril, municipio de Jaumave; El Encino, La Libertad y una propiedad del gobierno del estado de Tamaulipas, localizadas en el municipio de Llera; las localidades de Manantiales y Coahuila, se encuentran en el municipio de Ocampo; Joya de Manantiales y Alta Cima están en el municipio de Gómez Farias, pertenecientes al estado de Tamaulipas. Las comunidades antes citadas suman una superficie de 13,272.65 hectáreas de bosque de pino-encino (Jiménez, 2003).

El bosque de pino-encino también es conocido como bosque templado y se desarrolla desde 1400 hasta los 1800 msnm, aunque sus límites altitudinales varían mucho, encontrándose siempre a una altitud superior a la del bosque mesófilo de montaña, ocupando ambos una gran extensión en la Reserva de la Biosfera El Cielo (Martín, 1958). La precipitación anual oscila entre 500 y 800 mm (Sánchez *et al.*, 2005). Las especies arbóreas típicas son *Pinus montezumae*, *P. teocote*, *P. pseudostrobus*, *Quercus germana*, *Q. xalapensis*, *Q. rysophylla* y *Juniperus flaccida* (Figura 15), así como otras de menor porte como *Ternstroemia sylvatica*, *Prunus serotina*, *Wimmerica concolor*.



Figura 15. Vegetación característica del bosque de pino-encino en Tamaulipas.

4.2.1. Diseño de muestreo

Por tratarse de un área natural protegida, se utilizó un diseño de muestreo dirigido, la unidad de muestreo utilizada fue de un sitio de 1000 m² (20 x 50 m), dividido en cuatro cuadrantes. En el cuadrante I se miden árboles, arbustos y la regeneración de árboles y arbustos. En los cuadrantes II, III y IV se evaluaron únicamente los individuos mayores de 5 cm de diámetro normal.

Las variables individuales que se evaluaron son altura total, diámetro normal, diámetro de copa (norte-sur, este-oeste) y altura de inicio de copa viva. En la misma fecha se pesó la hojarasca y la necromasa. Para la hojarasca se utilizaron tres parcelas de 1 m² dentro de los cuadrantes II, III, IV. Se pesó toda la biomasa de hojas, ramillas, estróbilos y ramas de hasta cinco centímetros de diámetro. En la medición de la materia muerta o necromasa se utilizó una parcela de 25 m² ubicada en el cuadrante I, pesándose todo el material muerto sobre el suelo con un diámetro mayor de 5 cm. Se tomó una muestra de cada parcela de hojarasca y necromasa.

4.2.2. Selección del sitio de muestreo

Los reglamentos dentro de una área natural protegida son restrictivos y más cuando implica derribar un árbol dentro de dicha área, al seleccionar el sitio de muestreo en campo se consideró que el sitio fuera representativo del lugar además de las características siguientes: a) sitio conservado sin vegetación indicadora de perturbación, b) con diversidad de especies, c) con individuos de diferente diámetro, d) especies características del tipo de vegetación y, e) con condiciones para realizar la medición.

4.2.3. Selección de árboles en la medición de carbono

Con el propósito de hacer el menor daño a la vegetación de este ecosistema y respetando las restricciones del reglamento para una área natural protegida, se tomaron cinco individuos al azar por especie, que estuvieran dentro del sitio de muestreo, se tomó una pequeña muestra de madera en el fuste; en especies latifoliadas la muestra de madera fue tomada a la altura de 30 centímetros de la base, en especies de coníferas se tomaron las muestras a 1.3 metros de altura con el taladro de pressler. A las muestras de madera, hojarasca y necromasa, se les tomó el peso húmedo en campo y después se llevaron al laboratorio de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL. A estas muestras de madera se les determinó el volumen mediante el método del xilómetro, posteriormente todas las muestras se secaron en una estufa de flujo de aire a una temperatura de 105 °C hasta alcanzar el peso constante (peso seco). Este peso seco de la muestra de madera se dividió por su volumen húmedo obteniendo la densidad básica (volumen en cm^3 y densidad en g cm^{-3}). Con la densidad básica se calculó el peso seco del fuste y ramas. Así mismo, se obtuvo la relación peso seco/peso

húmedo para las muestras de hojarasca y necromasa, esta relación se multiplicó por el peso total de cada parcela, obteniendo el peso seco de hojarasca y necromasa.

Dado que no fue posible derribar el árbol para ser pesado en cada uno de sus componentes, se procedió a calcular el volumen por árbol por especie, utilizando el coeficiente de forma que se reporta en la Memoria del Inventario Forestal del estado de Hidalgo (1985) para especies de bosque templado, además, se consideró agregar el 30% del volumen fustal obtenido, que representa los brazuelos y ramas que conforman la copa del árbol, el tocón, hojas y ramas menores de 5 cm de diámetro que se considera como desperdicio, agregando por ello el 5% del volumen fustal obtenido (Memoria del Inventario Forestal del estado de Hidalgo, 1985). El volumen individual por especie se multiplicó por la densidad básica respectiva de cada especie obteniendo la biomasa. Cabe mencionar que se utilizó la densidad básica reportada por Tuset y Durán (1979) para algunas especies presentes en el área de estudio.

Con los datos obtenidos de biomasa individual por especie, se procedió a desarrollar funciones de regresión de biomasa, utilizando el paquete estadístico (Statistica versión 6.0). Se probaron ocho modelos matemáticos (Cuadro 8), que han sido utilizados frecuentemente (Romahn *et al.*, 1994; Prodan *et al.*, 1997; Ter-Mikaelian y Korzukhin, 1997; Acosta, 2003), de los cuales se seleccionó el modelo que presentara el mejor ajuste en los criterios de bondad (R^2 y valor de F). En este caso el modelo que mejor resultados mostró fue el modelo no lineal de la forma $\beta = a_0 * D^{a_1}$ (Potencial), donde β es la biomasa aérea del árbol en kilogramos, D = diámetro a 1.3 m, a_0 y a_1 son los coeficientes de la regresión.

Cuadro 8. Ecuaciones lineales y no lineales para estimar biomasa en especies de un bosque de pino-encino.

Modelo	Ecuación
Coeficiente mórfico constante	$\beta = a_0 * D^2 h$
Variable combinada	$\beta = a_0 + a_1 D^2 h$
Variable combinada generalizada	$\beta = a_0 + a_1 D^2 + a_2 h + a_3 D^2 h$
Australiana	$\beta = a_0 + a_1 D + a_2 h + a_3 D^2 h$
Naslund	$\beta = a_0 + a_1 D^2 h + a_2 h + a_3 Dh^2$
Takata	$\beta = D^2 * h / (a_0 + a_1 D)$
Meyer modificada	$\beta = a_0 + a_1 D + a_2 Dh + a_3 D^2 h$
Potencial	$\beta = a_0 * D^{a_1}$

β biomasa (kg); D diámetro a 1.3 m. (cm); h altura de árbol (m); a_0, a_1, a_2, a_3 coeficientes de regresión.

Posteriormente las muestras de madera, hojarasca y necromasa se molieron con el “Pulverisette 2” (no hay contaminación de carbono en las muestras por la fricción, el recipiente esta compuesto de hard porcelain 97.7% Al_2O_3 ; agate 99.9% SiO_2 ; zirconium oxide 94.8% ZrO_2) hasta alcanzar un tamaño en las partículas menor de 10 micras. Después de cada muestra se limpió el tazón del “Pulverisette 2” para evitar contaminación entre cada muestra molida.

Antes de ser analizadas las muestras molidas se colocaron en una estufa de secado de 15 a 20 minutos a una temperatura entre 70 y 75 °C para quitar la humedad en las muestras molidas que pudiera haber absorbido del ambiente. Posteriormente se procedió a ser analizadas con el equipo de Solids TOC Analyzer. Este equipo mide únicamente el carbono total y el carbono orgánico contenido en muestras líquidas,

sólidas, fibras de madera, etc., el carbono inorgánico se determina indirectamente, al restar el carbono orgánico del carbono total.

El funcionamiento de este equipo para medir la concentración de carbono total consiste en pesar una muestra de 30 miligramos de madera, hojarasca y necromasa molida dentro de una copa de cuarzo que se asienta en el pedestal de cuarzo, éste sube al horno de combustión que tiene temperaturas mayores de 900 °C, con una atmósfera de oxígeno al 99.9% de pureza, el carbono presente en las muestras es convertido a CO₂. Los gases liberados pasan a una cámara con rayos infrarrojos que al cruzar por ella son detectadas y contabilizadas únicamente las partículas de CO₂, con un tiempo de detección de las partículas de CO₂ de 6 minutos, utilizando la tecnología NDIR detector. La información se envía al software WinTOC, mostrando los resultados en tres distintas unidades: a) área, contabiliza y suma el número de partículas de CO₂ que contiene la muestra, b) masa, muestra el peso en miligramos de carbono que contiene la muestra y c) concentración, muestra el porcentaje de carbono que contiene la muestra. Se trabajó con la concentración de carbono que contiene cada individuo, obteniendo un promedio en porcentaje de los cinco árboles- muestra por especie. Para la hojarasca y necromasa se obtuvo un promedio en porcentaje de concentración de carbono para el bosque de pino-encino. Los resultados del equipo son confiables al obtener una calibración de $R^2 = 0.9990$. Dichos resultados son recomendados por Dennis *et al.* (2001), quienes son los responsables de la metodología y calibración del equipo Solids TOC Analyzer en la empresa O I Analytical.

En este trabajo para estimar con mayor certeza la cantidad de carbono almacenado se utilizó el valor promedio de concentración de carbono que contiene cada individuo por especie, así como las muestras de hojarasca y necromasa. Los valores se

multiplicaron por la biomasa seca de cada componente aéreo, se agregó el carbono estimado en el sistema radicular, con la suma de los cuatro depósitos se obtuvo la cantidad total de carbono almacenado ($tC\ ha^{-1}$) en la parte aérea y radicular del bosque de pino-encino dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.

El determinar la biomasa bajo el suelo, o biomasa radicular, es un proceso muy costoso, sin embargo, para tener mejores estimaciones de carbono total por hectárea, se recurrió a la literatura para estimar la biomasa radicular en este ecosistema. MacDicken (1997) obtuvo un 15% de biomasa radicular con respecto a la biomasa aérea en bosques de Chile. Valores superiores obtuvo Cairns *et al.* (1997) teniendo una razón de raíz/tallo entre 0.20 y 0.30, es decir 20 a 30% de biomasa radicular con respecto a la biomasa aérea (fustes, ramas y hojas). Se consideró entonces el valor de 20% de biomasa radicular con respecto a la biomasa aérea obtenida.

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1. Características dasométricas

El estado natural del bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera El Cielo, muestra un bosque de selección donde la mayoría de los individuos se presentan en las primeras categorías diamétricas y disminuyen cuando alcanzan categorías comerciales (Figura 16). Esta característica define al bosque como un ecosistema en fase de alto dinamismo, al tener una cantidad promedio de 420 individuos por hectárea ($ind\ ha^{-1}$) en la categoría diamétrica de cinco y más de 1600 renuevos por hectárea con diámetros menores de 2.5 cm en la base del tallo de las especies arbóreas y arbustivas; a pesar de que el bosque no tiene una cobertura densa en sus copas, este número de renuevos es considerable para que se mantenga el ecosistema. Para un bosque de pino-encino

que esta bajo manejo forestal, se considera que deberá tener un mínimo 3000 plantas por hectárea debidamente distribuidas para considerarse como una regeneración natural adecuada (Memoria del inventario forestal del estado de Hidalgo, 1985).

Las especies con mayor frecuencia en el bosque de pino-encino se encuentra el *Juniperus flaccida*, *Pinus teocote* y *P. pseudostrobus* con 284, 232 y 231 ind ha⁻¹, respectivamente. Se encontró que para *J. flaccida* más del 46% de los individuos están en la categoría diamétrica menor. Bajo el supuesto, que los bosques con alta tasa de crecimiento y desarrollo hacen más efectivo el proceso de la fotosíntesis al capturar el CO₂ de la atmósfera y fijándolo en sus componentes (fuste, ramas, hojas, corteza,

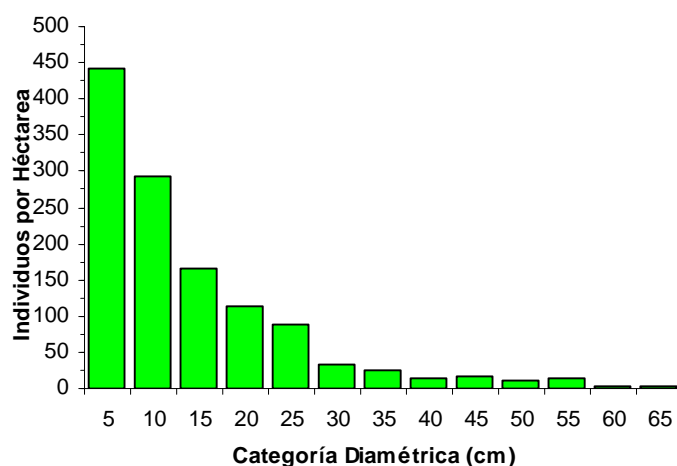


Figura 16. Número de individuos por hectárea por categoría diamétrica en un bosque de pino-encino dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.

raíces) como carbono, además liberando oxígeno hacia la atmósfera (Tipper, 1998; Ordóñez, 1999; Husch, 2001; Valenzuela, 2001). En este caso, el bosque tiene más del 90% de los ind ha⁻¹ en las categorías de 5 hasta 25 cm, la cifra se reduce considerablemente en las categorías diamétricas de 30 en adelante con menos del 10% de ind ha⁻¹. La anterior reducción se debe a que hace aproximadamente 35 años se dio

una tala indiscriminada de árboles en la región, también se presentó un incendio forestal que exterminó casi la totalidad de la vegetación en esta zona (Lof, 2005). Sin embargo existen especies que se han recuperado y tienen un alto potencial de crecimiento y desarrollo como *J. flaccida*, *P. teocote* y *P. pseudostrobus* con más de 131, 72 y 66 ind ha⁻¹, respectivamente.

4.3.2. Biomasa en especies arbóreas

Después de la determinación del volumen se inició el proceso matemático para calcular la biomasa correspondiente a cada individuo por especie. De los modelos matemáticos evaluados, se seleccionó el modelo no lineal de la forma $\beta = a_0 * D^{a1}$ al presentar los mejores resultados en los criterios de bondad de ajuste (R^2 y valor de F). Se aplicó el modelo potencial para cada una de las especies en el bosque de pino-encino, obteniendo coeficientes de determinación superiores al 0.95, lo que indica una alta confiabilidad del modelo.

El modelo matemático no lineal aplicado a las especies obtuvo dentro de los parámetros de la ordenada al origen y la pendiente de la línea de regresión diferencias significativas ($P < 0.05$) excepto en la ordenada al origen de *Quercus germana*, tuvo un error estándar alto (0.728). Sin embargo los modelos generados son aplicables estrictamente a las especies consideradas en este estudio. Además de contemplar que el volumen fue estimado, se tiene la ventaja de estimar la biomasa de manera confiable y rápida, al sustituir el diámetro a 1.3 m de los árboles en el modelo generado para cada especie.

En las ecuaciones de regresión generadas para cada especie se encontró que el género *Pinus* presentó los coeficientes de determinación (R^2) mayores (0.99), excepto

P. patula con 0.98. Asimismo, el R^2 para el resto de las especies fue superior al 0.95 (Cuadro 9). Aunque la tendencia de los valores de biomasa aérea con respecto al diámetro a 1.3 m de los árboles fue similar para las especies, se encontró una variación en el valor estimado de la ordenada al origen (a_0) que oscila entre 0.010702 y 1.316914. Mientras que el valor estimado de la pendiente de la regresión (a_1) varió de 1.710782 hasta 3.050818 (Cuadro 9).

Cuadro 9. Coeficiente de determinación (R^2), valor de F y parámetros de los coeficientes de la regresión (a_0 , a_1) en la determinación de biomasa por especie.

Especie	N	R^2	F	Parámetros	
				a_0	A_1
<i>Clethra pringleii</i>	8	0.99	1342.5	1.169348	1.698004
<i>Juniperus flaccida</i>	256	0.97	4753.6	0.209142	2.123976
<i>Pinus montezumae</i>	19	0.99	731.5	1.304540	1.730990
<i>Pinus patula</i>	111	0.98	2669.7	0.407073	2.026167
<i>Pinus pseudostrobus</i>	208	0.99	8534.3	0.128495	2.364444
<i>Pinus teocote</i>	209	0.99	10781.6	0.032495	2.766579
<i>Quercus germana</i>	28	0.95	237.2	0.892617	1.846973
<i>Quercus rysophylla</i>	25	0.96	273.9	0.970526	1.837327
<i>Quercus xalapensis</i>	33	0.98	632.6	0.766406	1.938435
<i>Ternstroemia sylvatica</i>	15	0.99	1108.8	0.132193	2.495677
<i>Wimmeria concolor</i>	24	0.97	385.7	0.346847	1.990595
<i>Quercus sp</i>	57	0.97	1089.2	0.010702	3.050818
<i>Otras sp</i>	91	0.96	1140.7	1.316914	1.710782

Otros estudios han utilizado la misma ecuación, obteniendo resultados satisfactorios como: Acosta *et al.* (2002), presentó una R^2 mayor de 0.97 para las especies forestales

nativas del bosque mesófilo de montaña en la Sierra Norte de Oaxaca. Rodríguez *et al.* (2006), empleando el mismo modelo encontró una R^2 de 0.95 para la mayoría de las especies presentes en el bosque mesófilo de montaña de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas. En otro estudio los resultados fueron menos satisfactorios, Geron y Ruark (1988) estimaron una R^2 de sólo 0.62 al utilizar el diámetro a 1.3 m como variable dependiente de la biomasa foliar en *Pinus radiata*. En ese mismo estudio la R^2 aumentó a 0.94 al emplear el diámetro del tronco medido a la base de la copa.

Con el modelo potencial se estimaron para el bosque de pino-encino más de 165 toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$) de biomasa almacenada en los fustes, ramas y hojas de los árboles. El género *Pinus* contribuye con la mayor parte de esta biomasa, acumulando más del 64% de la biomasa total en las cuatro especies (*P. montezumae*, *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote*). Mientras que el género *Quercus* guarda en sus fustes, ramas y hojas el 29% de la biomasa total. La suma de estos dos géneros almacena casi el total de la biomasa presente en los fustes, ramas y hojas de los árboles (93%) del bosque de pino-encino dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo.

Otros estudios demuestran tener mayor cantidad de biomasa aérea por hectárea, como es el caso de Valenzuela (2001) sostiene que en bosques naturales maduros de *Abies religiosas* en el sur del Distrito Federal se almacenan más de $415.9\ t\ ha^{-1}$ de biomasa. Sin embargo, Rodríguez *et al.* (2006) encontraron más de $107.2\ t\ ha^{-1}$ de biomasa únicamente en los fustes de los árboles del bosque mesófilo de montaña.

En la figura 17 se muestra la curva de ajuste con un coeficiente de determinación de 0.99 para *P. teocote* y un R^2 para *Q. germana* de 0.95. Estas especies tuvieron el mayor y menor valor de F respectivamente. Del género *Pinus*, *P. teocote* acumula en los fustes, ramas y hojas más de $41.5\ t\ ha^{-1}$ de biomasa. Mientras que en el género

Quercus la especie que más biomasa aporta es el *Q. germana* con más de 17.3 t ha^{-1} que corresponden al 10.5% del total de la biomasa presente en los fustes, ramas y hojas en los árboles del bosque de pino-encino.

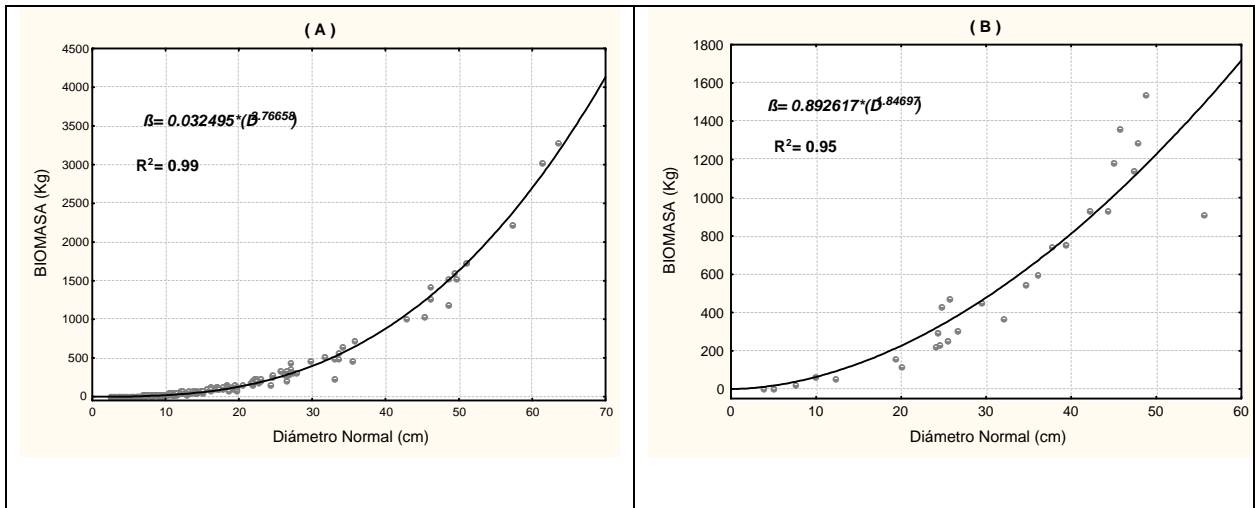


Figura 17. Curvas de ajuste para estimar biomasa en *Pinus teocote* (A) y *Quercus germana* (B) en el bosque de pino-encino.

Los renuevos de las especies arbóreas y arbustivas con diámetros menores de 2.5 cm mantienen 0.77 t ha^{-1} de biomasa, este valor al igual que los anteriores se encuentran en alto dinamismo debido al alto potencial de crecimiento y desarrollo en que se encuentran dentro del bosque. Cabe mencionar que en el estrato inferior no se consideraron las plantas herbáceas por mantener secuestrado el carbono poco tiempo ya que al desintegrarse se libera gran parte del carbono hacia la atmósfera (Ordóñez, 1999).

En la superficie del suelo del bosque de pino-encino se encuentran más de 19.8 t ha^{-1} de biomasa en hojarasca, compuesta por hojas, ramas menores de 5 cm de diámetro, estróbilos, cantidad considerada únicamente de la materia orgánica que se encuentra sobre el suelo y que no tiene proceso de descomposición avanzado.

La materia muerta o necromasa son árboles caídos, ramas gruesas que se acumulan y que al final se incorporan al suelo, sin embargo, solo se encontró 0.61 t ha^{-1} en biomasa de necromasa.

Existe poca literatura, en los que evalúan la necromasa y hojarasca en los ecosistemas forestales, aunque consideran que es corto el tiempo que se mantendrá secuestrado el carbono, mucho de éste se incorpora al suelo quedando almacenado por largo tiempo (Ordóñez y Maser, 2001; West *et al.*, 2004). La incorporación del carbono al suelo en ecosistemas naturales se da por dos vías principales: por el mantillo (capa superficial de materia vegetal) y por la biomasa radicular. La velocidad de descomposición de este material depende de las poblaciones microbianas del suelo y de las características del material vegetal (Oliva y García, 1998).

Considerando la biomasa de cada componente aéreo en el bosque de pino-encino se tiene una cantidad mayor de 186.3 t ha^{-1} de biomasa seca. La mayor parte de esta biomasa aérea se localiza en el componente de fustes, ramas y hojas con 88.6%, le sigue el componente de la hojarasca con 10.7%, la biomasa contenida en los renuevos y la necromasa es de 0.4 y 0.3% respectivamente, del total de la biomasa aérea.

En el bosque de pino-encino se obtuvo un total de 33.0 t ha^{-1} de biomasa radicular, que agregadas a la biomasa aérea, da como resultado un total de 219.3 t ha^{-1} de biomasa. Aunque el bosque fue perturbado hace más de 35 años, aún continúan con cortas de saneamiento y consumo de leña (com. Personal Hernández, 2005), sin embargo el bosque ha mantenido cantidades considerables de biomasa y continua proporcionando servicios ambientales valiosos como es: la recarga de mantos acuíferos, amortiguar las altas y bajas temperaturas, abrigo a la fauna silvestre, ayuda a

la mitigación del cambio climático con el secuestro de carbono, entre otros (Constanza *et al.*, 1997; SEMARNAT, 2001; Sánchez *et al.*, 2005).

4.3.3. Estimación de carbono

Con los valores de biomasa obtenidos se procedió a determinar las cantidades de carbono almacenado en cada árbol por especie, tomando el factor de conversión de carbono obtenido con el equipo Solids TOC Analyzer que tiene cada especie, se obtuvo una cantidad de 110 tC ha⁻¹ valor superior al encontrado por Navia y Velarde (2002) en un estudio realizado para el bosque templado de Uruapan, Michoacán con 79 tC ha⁻¹. Sin embargo, en este estudio se estimó un total de 1'460,124.3 tC almacenado en los fustes, ramas, hojas, renuevos, hojarasca, necromasa y raíces en el bosque de pino-encino que se encuentra dentro de una superficie de 13,272.65 hectáreas en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.

Autores como Smith *et al.* (1993); Montoya *et al.* (1995); MacDicken (1997) y Husch (2001) afirman que en promedio la materia vegetal seca contiene 50% de carbono. Mientras que Koch (1989) menciona que las latifoliadas y las coníferas contienen un factor de conversión de carbono de 0.531 y 0.521 respectivamente. Schlegel *et al.* (2001) ocupó valores de 0.42 y 0.45 como factores de conversión de carbono en el proyecto de medición de la capacidad de captura de carbono en los bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. La FAO (2000) menciona que la vegetación de los bosques contiene entre 42 y 48% de carbono en la biomasa seca. Mientras que Acosta (2003) utilizó un factor de conversión de carbono de 0.465 para maleza y 0.455 para raíces en terrenos de ladera con vegetación forestal y con manejo agrícola en la sierra norte de Oaxaca. Fragoso (2003) y Zamora (2003), utilizaron un factor de conversión de carbono de 0.45 en estudios realizados en bosques templados en el estado de

Michoacán. Es posible que estos autores varíen en el valor del factor de conversión para carbono en la materia vegetal seca debido a que los estudios se han realizado en distintos lugares.

La distribución del carbono en los depósitos del bosque de pino-encino se ubica principalmente en la parte aérea de los árboles con el mayor porcentaje (75.3%), seguido del sistema radicular (15%) y la hojarasca aporta el mínimo del total del carbono (9%) almacenado en este ecosistema (Cuadro 10). Los árboles que mantienen el carbono por largos periodos de residencia dan lugar al fenómeno llamado secuestro de carbono (Post *et al.*, 1990). Por ello, los árboles y los bosques deberán de verse como almacenes de carbono que ayudan a revertir el deterioro de la atmósfera (Ralph, 2000; Gayoso y Schlegel, 2001).

Cuadro 10. Distribución del carbono presente en los depósitos del bosque de pino-encino dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas.

Depósito	C/ha (ton)	Porcentaje (%)	C total (ton)
Fustes, ramas y hojas	82.91	75.3	1 100 435.4
Renuevos	0.40	0.4	5 309.1
Hojarasca	9.88	9.0	131 133.8
Necromasa	0.31	0.3	4 114.5
Raíces	16.51	15.0	219 131.5
Total	110.01	100.0	1 460 124.3

4.4. CONCLUSIONES

En el bosque de pino-encino se aplicó el modelo de la forma $B = a_0 * D^{a1}$ con los parámetros obtenidos en cada especie y sustituyendo el diámetro a 1.3 m en la ecuación se estimó la biomasa aérea de manera confiable ($R^2=0.95$) en las especies.

En este sistema forestal se obtuvo que el componente aéreo (fuste, ramas, hojas) cuenta con la mayor cantidad de carbono almacenado (82.9 tC ha^{-1}), el sistema radical se ubica con 16.5 tC ha^{-1} y en la hojarasca se almacenan 9.8 tC ha^{-1} , cifras que dan la certeza de la importancia que tiene el bosque de pino-encino de la Reserva de la Biosfera El Cielo y los beneficios ambientales que otorga a las comunidades locales y regionales.

4.5. LITERATURA CITADA

- Acosta M. M.; J. Vargas H.; A. Velázquez M. y J. D. Etchevers 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- Acosta M. M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 99 p.
- Bouwman A. F. and R. Leemans 1995. The role of forest soil in the global carbon cycle. *In: McFree W. W. and M. Kelly (Eds). Carbon forms and functions in forest soils. SSSA. USA. pp 503-525.*
- Brown S.; Ch. Hall; W. Knabe; J. Raich; M. Trexler and P. Woomer 1993. Tropical forest: their past, present and potential future role in the terrestrial carbon budget. *Water, Air and Soil Pollution*. 70: 71-94.
- Cairns M.; S. Brown; E. Helmer and G. Baumgardner 1997. Root biomass allocation in the world's upland forest. *Oecologia* 111: 1-11.
- Constanza R.; R. Darge; R. Degroot; S. Farber; M. Grasso; B. Hannon; K. Limburg; S. Naeem; R. V. O'Neil; J. Paruelo; R. G. Raskin; P. Sutton and M. Vandenbelt 1997.

- The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Cook A. G.; A. C. Janetos and W. T. Hinds 1990. Global effects of tropical deforestation: towards an integrated perspective. *Environmental Conservation* 17: 201-212.
- Couzin J. 1999. Landscape changes make regional climate run hot and cold. *Science* 283(5400): 317-319.
- Dennis S. O.; S. A. Aburime and R. E. Harrison 2001. Transport of Simazine in soil amended with pine bark wood fiber. *Proceedings of Southern Nursery Association (SNA) Research Conference*. 46: 602-605.
- Dixon R. K.; S. Brown; R. A. Houghton; A. M. Solomon; M. C. Trexler and J. Wisniewski 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263 (5144): 185-190.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 1993. Forest resources assessment 1990 tropical countries. *FAO Forestry Paper* 112. FAO, Rome. pp.59.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. *In: Informe sobre recursos mundiales de suelos* No. 88. Roma. 98 p.
- Fragoso L. P. I. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio "Cerro Grande" municipio de Tancítaro, Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez" U.M.S.N.H. Uruapan, Michoacán. 65 p.
- Gayoso J. y B. Schlegel 2001. Guía para la formulación de proyectos forestales de carbono. En el proyecto de medición de la capacidad de captura de carbono en

- bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 13 p.
- Geron C. D. and G. A. Ruark 1988. Comparison of constant and variable allometric ratios for predicting foliar biomass of various tree genera. *Canadian Journal of Forest Research* 18(10): 1298-1304.
- Grace J. 2004. Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology*. 92: 189-202.
- Hernández V. A. 2005. Comentario personal. Técnico en el área de operación y manejo de áreas naturales protegidas. SOPDUE, Cd. Victoria, Tamaulipas.
- Husch B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques. *In: Simposio internacional, medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales*. Octubre, 2001. Valdivia, Chile. 9 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 1997. Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad. Informe especial del grupo de trabajo II del IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2001. Summary for policymakers. A report of working group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (<http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01.pdf>. Julio 31, 2001).
- Jiménez P. J. 2003. Programa: fijación de carbono en la reserva de la biosfera El Cielo. Informe Final. Dirección de Recursos Naturales y Medio Ambiente. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. 64 p.
- Koch P. 1989. Estimates by species group and region in the USA of: I) below-ground root weight as a percentage of oven dry complete-tree weight; and II) carbon content of tree portions. Unpublished Consulting Report. 23 p.

- Lof L. V. 2005. Síntesis histórica de “El Cielo” *In*: Historia natural de la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Sánchez R.G.; Reyes C.P y R.Dirzo editores. Universidad Autónoma de Tamaulipas. pp. 2-23.
- MacDicken K. G. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, VA: Winrock International Institute for Agricultural Development.
- Martin P. S. 1958. A biogeography of reptiles and amphibians in the Gómez Farías region, Tamaulipas, México. Misc. Publ. Museum of Zoology, University of Michigan No. 101: 1-102.
- Masera O. 1995. 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.
- Memoria del Inventario Forestal del Estado de Hidalgo 1985. Manejo y aprovechamiento de los recursos forestales. 69 p.
- Montoya G.; L. Soto; B. de Jong; K. Nelson; P. Farias; Tic Pajal Yakac; J. Taylor y R. Tipper 1995. Desarrollo forestal sustentable: captura de carbono en las zonas Tzeltal y Tojolabal del estado de Chiapas. Instituto Nacional de Ecología. Cuadernos de Trabajo 4. México D. F. 50 p.
- Navia J. y J. Velarde 2002. Prefactibilidad de captura de carbono para el conjunto predial La Majada-Cerro Grande, Uruapan, Michoacán, México.
- Norby R. J.; S. D. Wullschleger; C. A. Gunderson; D. W. Johnson and R. Ceulemans 1999. Tree responses to rising CO₂ in field experiments: implications for the future forest. *Plant Cell Environ.* 22: 683-741.

- Olguín M. 2001. Incorporación de la captura de carbono como propuesta de manejo forestal integral: estudio de caso en una comunidad de la meseta Purépecha, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias-UNAM. México. 73 p.
- Oliva M. y F. García O. 1998. Un nuevo campo de acción en la química biológica: Parte I. Generalidades sobre el cambio global. Educ. Química. UNAM. México.
- Ordóñez D. J. A. B. 1998. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM. Ciudad de México. 72 p.
- Ordóñez D. J. A. B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP. Desarrollo gráfico editorial. México, D. F. 72 p.
- Ordóñez D. J. A. B. y O. Masera 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7 (1): 3-12.
- Post W. M.; W. R. Emmanuel; P. S. Zinke and A. G. Stangenberger 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298: 156-159.
- Post W. M.; T. H. Peng; W. R. Emmanuel; A. W. King; V. H. Dale and D. L. DeAngelis 1990. The global carbon cycle. *American Scientist*. 78: 310-326.
- Prodan M.; R. Peters; F. Cox y P. Real 1997. *Mensura Forestal. Serie de investigación y educación en desarrollo sostenible. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura (IICA)/BMZ/GTZ. San José, Costa Rica. 561 p.*
- Ralph R. 2000. *Asuntos forestales: los bosques tropicales y los cambios climáticos. Dirección general de políticas. Agencia canadiense para el desarrollo internacional. Québec, Canadá.*

- Rodríguez L. R.; J. Jiménez P.; O. Aguirre C. y E. Treviño 2006. Estimación de carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. Ciencia-UANL. Monterrey, N. L. 9(2): 179-187
- Romahn de la Vega C. F; H. Ramírez M. y J. L. Treviño G. 1994. Dendrometría. Universidad Autónoma Chapingo. Serie de apoyo académico No. 26. 387 p.
- Sabaté S.; A. Gracia C. and A. Sánchez 2002. Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. Forest Ecology and Management. 162: 23-37.
- Sánchez R. G.; P. Reyes C. y R. Dirzo 2005. Historia natural de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Universidad Autónoma de Tamaulipas. 732 p.
- Sarmiento J. L. and N. Gruber 2002. Sinks for anthropogenic carbon. Physics Today. 55(8): 30-36
- Schimel D. S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. Global Change Biology. 1: 77-91.
- Schlegel B.; J. Gayoso y J. Guerra 2001. Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. En el proyecto de medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 15 p.
- Schulze E. D.; Ch. Wirth and M. Heimann 2000. Managing forest after Kyoto. Science. 289(5487): 2058-2059.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) 2001. México II Comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre

- cambio climático. Comité intersecretarial sobre cambio climático. SEMARNAT-INE. México, D. F 374 p.
- Smith T. M.; W. P. Cramer; R. K. Dixon; R. Leemans; R. P. Neilson and A. M. Solomon 1993. The global terrestrial carbon cycle. *In: Wisniewski J. and R. N. Sampson (Eds). Terrestrial biosphere carbon fluxes: quantification and sources of CO₂* Klumer Academic Publishers, Netherlands. pp. 19-37.
- Snowdon P.; J. Raison; H. Keith; K. Montagu; K. Bi; P. Ritson; P. Grierson; M. Adams; W. Burrows and D. Eamus 2001. Protocol for sampling tree and stand biomass. National carbon accounting system technical report No. 31 Draft-March 2001. Australian Greenhouse Office. 114 p.
- Soroos M. S. 1998. Preserving the atmosphere as a global commons. *Environment*. 40(2): 7-13, 32-35.
- Ter-Mikaelian M. T. and M. D. Korzukhin 1997. Biomass equation for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*. 97: 1-24.
- Thomas R. K.; N. Nicholls and G. Jonathan 1997. The coming climate. *Scientific American*. 276(5): 54-59.
- Tipper R. 1998. Update on carbon offsets. *Tropical Forest Update*. 8(1): 2-5
- Tuset R. y F. Duran 1979. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Editorial Hemisferio Sur. Montevideo, Uruguay. 688 p.
- Valenzuela H. T. 2001. Estimación de secuestro de carbono en bosques naturales de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Distrito Federal. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, edo. de México. 127 p.

- Ward J. K. and B. R. Strain. 1999. Elevated CO₂ studies: past, present and future. *Tree Physiology*. 19(4/5): 211-220.
- West T. O.; G. Marland; A. W. King and W. M. Post 2004. Carbon management response curves: estimates of temporal soil carbon dynamics. *Environmental Management* 33(4): 507-518.
- Wullschlegel S. D.; C. A. Gunderson; P. J. Hanson; K. B. Wilson and R. J. Norby 2002. Sensitivity of stomatal and canopy conductance to elevated CO₂ concentration-interacting variables and perspectives of scale. *New Phytol.* **153**: 485-496.
- Zamora C. J. C. 2003. Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino del ejido "La Majada" municipio de Periban de Ramos, Michoacán. Tesis de Licenciatura. Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez" U.M.S.N.H. Uruapan, Michoacán. 48 p.

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES GENERALES

En la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, se almacena carbono en cada ecosistema, en este caso se estimó en promedio 94.6 tC ha^{-1} para el bosque tropical subcaducifolio, que se encuentran en fustes, ramas, hojas, renuevos, necromasa, hojarasca y raíces; para el bosque mesófilo de montaña se estimaron en promedio 56.7 tC ha^{-1} sólo en fustes de árboles y arbustos mayores de cinco centímetros de diámetro a 1.3 m; para el bosque de pino-encino se obtuvieron 110 tC ha^{-1} que se encuentran secuestrados en fustes, ramas, hojas, renuevos, necromasa, hojarasca y raíces. Es notoria la diferencia que hay entre estos ecosistemas en la capacidad de almacenamiento de carbono en sus componentes aéreos y en el sistema radicular.

No obstante, sumando la superficie de estos tres ecosistemas se tiene un total de 31,085.4 hectáreas que representan el 21.5% de la superficie total de la Reserva. En dicha superficie el carbono secuestrado suma más de 2'766,327.1 tC. La mayor concentración de carbono se ubica en los fustes, ramas y hojas con 79.6%, en la raíces se guarda el 11.8%, en la hojarasca se encuentra el 7.8% mientras que en la necromasa y renuevos se almacena solo el 0.4 y 0.5% respectivamente. Esta cantidad de carbono almacenado se debe considerar para el beneficio del

planeta. Aquí es donde el secuestro de carbono adquiere una importancia crucial, esta cantidad de carbono secuestrado puede contribuir a remediar el calentamiento de la Tierra al evitar la acumulación del CO₂ en la atmósfera. Entonces no se debe perder de vista, que su efecto benéfico dependerá del tiempo que el carbono se mantenga almacenado en plantas, árboles o productos de madera, pues cuando éstos se desintegren, el carbono regresará a la atmósfera en forma de emisiones de CO₂.

Aunado a lo antes señalado, se debe considerar que los bosques y selvas conservadas brindan beneficios ambientales como recarga de mantos acuíferos, amortiguamiento en los cambios bruscos de temperatura, refugio y protección a fauna silvestre, regalamiento en los escurrimientos pluviales que ofrecen a las comunidades locales y regionales.

AGRADECIMIENTOS

El autor y los integrantes del comité de tesis agradecemos el apoyo financiado por Fondos Mixtos del Estado de Tamaulipas (Proyecto: Capacidad de captura de carbono en ecosistemas mixtos en el Estado de Tamaulipas. FOMES TAMPS-2002-C01-3336) proyecto realizado en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México.