

Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México

Estimation of carbon content in the Magdalena River basin, Mexico

José Mauricio Galeana-Pizaña¹,
José Antonio Benjamín Ordóñez-Díaz² y Nirani Corona-Romero¹

RESUMEN

En el presente estudio se estimó el contenido de carbono de la biomasa aérea de seis tipos de cobertura vegetal en la cuenca del río Magdalena, ubicada en el suelo de conservación del Distrito Federal. Para ello, se elaboró un mapa de las clases de cobertura vegetal y uso de suelo del área de estudio, mediante la fotointerpretación de fotografías aéreas. Se utilizó un diseño de muestreo jerárquico estratificado con distribución sistemática, los sitios resultantes se desplegaron en un enmallado con una equidistancia de 550 metros. La colecta de los datos en campo se basó en un diseño anidado; con una intensidad de muestreo de 0,64%. Se establecieron 52 sitios de muestreo de 3000 m² cada uno. La cobertura vegetal que presentó mayor cantidad de carbono almacenado corresponde a la clase de *Abies religiosa* cerrado, con 163 Mg C ha⁻¹ promedio; le sigue la clase de *Abies religiosa* - *Pinus hartwegii* cerrado con 107 Mg C ha⁻¹ y la clase de *Abies religiosa* abierto con 95 Mg C ha⁻¹. Las clases de *Pinus* sp. y *Pinus hartwegii* cerrado tuvieron 47 Mg C ha⁻¹; *Pinus hartwegii* - *Abies religiosa* cerrado, 39 Mg C ha⁻¹ y *Pinus hartwegii* abierto, 21 Mg C ha⁻¹.

PALABRAS CLAVE:

Abies religiosa, biomasa aérea, bosques, estructura diamétrica, *Pinus hartwegii*.

ABSTRACT

Carbon content of aboveground biomass of six types of vegetation cover in the Magdalena River basin, located in the conservation land in the Mexico City, was estimated. Hence, a map of cover vegetation and land use to the study area was made; a hierarchical stratified sampling design with distribution systematic with a mesh of sampling sites equidistant of 550 meters was used for field work. The method used for field data collection was based on a nested design, with an intensity of sample of 0,64%. There were generated 52 sites of 3000 m². The vegetation cover that showed the highest amount of carbon stored corresponds to the forest of the the *Abies religiosa* closed with 163 Mg C ha⁻¹ in average; followed by the *Abies religiosa* - *Pinus hartwegii* closed with 107 Mg C ha⁻¹, and *Abies religiosa* opened with 95 Mg C ha⁻¹; about the covers of *Pinus* sp., *Pinus hartwegii* closed with 47 Mg C ha⁻¹; *Pinus hartwegii* - *Abies religiosa* closed with 39 Mg C ha⁻¹ and *Pinus hartwegii* opened with 21 Mg C ha⁻¹.

KEY WORDS:

Abies religiosa, above ground biomass, forest, diametrical structure, *Pinus hartwegii*.

- 1 Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo". Contoy núm. 137. Colonia Lomas de Padierna, Tlalpan. 14740 D.F., México. C.e.: geomauricio23@gmail.com
- 2 Pronatura México, A.C. Aspergulas núm. 22. Colonia San Clemente, Alvaro Obregón. 01740 D.F., México.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático se define como las modificaciones termodinámicas que ocurren en la atmósfera a escala global, como consecuencia del incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), provocando el calentamiento del planeta (IPCC, 2007). Esto afecta directamente al hombre y a las actividades económicas que tienen una correlación con el estado del tiempo (e.g.: temperatura, presión atmosférica, precipitación, etc.) produciendo modificaciones en su medio (e.g. aumento del nivel de mar), lo que a largo plazo provocará una crisis social (Galeana, 2008).

En el año 1976, se reconoció a los bosques como uno de los principales sumideros de carbono, junto con los océanos, el suelo y los pastizales (Mena, 2004). Actualmente, los ecosistemas boscosos están siendo amenazados por el cambio de uso de suelo, la deforestación y la quema de combustibles fósiles, siendo éstas las principales causas a nivel mundial de la liberación de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera (Schneider, 1989; Goudie, 1990; Dixon *et al.*, 1994). Los cambios en el uso del suelo y cobertura vegetal asociados a la fragmentación de hábitats son los disturbios más severos de las actividades antrópicas, causando un aumento de las tasas de extinción de especies, sobre todo en las décadas recientes (Soulé y Orians, 2001). Lo anterior indica un severo problema que se está acentuando y que se relaciona directamente con el cambio en la cobertura vegetal, lo cual repercute en el deterioro del ambiente (Lambin, 1994; Ordóñez, 2008).

La deforestación genera, a nivel regional, pérdida de la cubierta vegetal, detrimento de los recursos forestales, deterioro físico y químico del suelo, alteración del balance hídrico y desestabilización de cuencas; a nivel global, afecta el

albedo y el balance de agua atmosférica, perturbando los patrones climáticos, contribuyendo así al calentamiento global (Houghton, 1991; Johns *et al.*, 1992; Lund, 2006). Otra consecuencia es la reducción y fragmentación del hábitat (Murcia, 1995) lo que se traduce en pérdida de la biodiversidad y eliminación de la variabilidad genética de poblaciones y especies (Johns *et al.*, 1992), sumado a una pérdida de los servicios ambientales y bioculturales (Otegui, 2007). Es por ello que estudios relacionados a los cambios en la cobertura vegetal están teniendo mayor atención (Brown y Lugo, 1994).

Históricamente, en una escala global, los cambios en la cobertura forestal han sido portadores de CO₂ a la atmósfera (Houghton, 1991; Brown, 2001), por esta razón en la actualidad se considera a los bosques como una opción para mitigar las emisiones de GEI, ya que secuestran y mantienen más CO₂ que otros ecosistemas terrestres, aparte de participar con 90% del flujo anual de carbono en el sistema atmósfera-tierra (Masera, 1995). El IPCC (2007) estima que combinando estrategias de conservación forestal con proyectos de reforestación en el mundo, los bosques podrían resultar en un sumidero neto de carbono durante los próximos 100 años, permitiendo reducir de 20% a 50% las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Las opciones de mitigación de los GEI pueden ser agrupadas en tres: La primera categoría incluye a las actividades que evitan la liberación del carbono secuestrado (e.g.: conservación y protección a los ecosistemas forestales); la segunda contiene actividades que capturan CO₂ (e.g.: aforestación, reforestación y agroforestería); y la tercera opción encierra actividades que sustituyan el uso de combustibles fósiles (Sathaye *et al.*, 2001). Los procesos de captura-emisión son parte de un sistema con cuatro tipos generales de reservorios de carbono (vegetación aérea y subterrá-

nea, materia en descomposición, suelos y productos forestales), con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes (Ordóñez, 1999).

Actualmente es creciente la atención global sobre el estimar con mayor certeza y precisión la dinámica del carbono secuestrado y emitido (balance emisión-captura) entre el bosque y la atmósfera. Reconocer el papel que juegan los bosques en el ciclo global del carbono, particularmente en la mitigación de los GEI, es una prioridad (Brown, 2001). La estimación de la captura de carbono es el punto de partida para hacer efectivas las opciones de mitigación de los GEI en el marco del Protocolo de Kyoto, además de permitir establecer un criterio de base de cálculo de la dinámica de este gas cuando no se ejecuta una medida de mitigación (Maser *et al.*, 2000); es decir, generar un caso de referencia con el cual se pueda comparar el cambio en las emisiones de los GEI y verificar los beneficios adicionales posteriores (IPCC, 2007).

La cuenca del río Magdalena brinda servicios ambientales a la ciudad de México, como son captura de carbono, recarga de mantos acuíferos, producción de oxígeno, fijación del sustrato y belleza escénica, principalmente; lo anterior sugiere acciones inmediatas dirigidas a la conservación y adecuado manejo de sus recursos. Sin embargo, la zona ha recibido fuertes presiones antropogénicas como asentamientos humanos, procesos de cambio de uso de suelo, instalaciones de infraestructura para diversos fines, extracción de recursos naturales (madera y fauna nativa, principalmente) y turismo no regulado, lo que ha ocasionado, entre otros problemas: deforestación y degradación forestal, establecimiento y auge de plagas forestales, incendios, contaminación del acuífero, inseguridad y erosión. Por ello, es primordial el desarrollo de una línea base confiable para iniciar proyectos

de captura de carbono en los bosques del río Magdalena, lo que permita entender el proceso del cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo y así poder ofrecer alternativas de mitigación del cambio climático (Fernández *et al.*, 2002; Galeana, 2008).

OBJETIVOS

Los objetivos de la presente investigación son ,estimar el contenido de carbono en la biomasa aérea de las coníferas de la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México; elaborar un mapa de cobertura vegetal y uso del suelo del área de estudio y, cuantificar el contenido de carbono por tipo de cobertura vegetal.

METODOLOGÍA

Área de estudio

La cuenca del río Magdalena se localiza dentro del suelo de conservación de las delegaciones Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa, en el Distrito Federal (zona centro de México) (Fig. 1).

El área de estudio se encuentra ubicada en el suroeste de la cuenca de México, sobre la Sierra de las Cruces, misma que pertenece a la región fisiográfica del Sistema Volcánico Transversal, dentro de las subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac (INEGI, 2005a,b,c,d). Sus coordenadas extremas son: al Norte 19°17'52'', al Sur 19°14'35'', al Oeste 99°20'30'' y al Este 99°15'06'' (GDF, 2000).

La cuenca tiene una superficie de 2981,3 ha de relieve accidentado (2480 msnm-3860 msnm) con bosques de *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii*, *Quercus* spp. y mixto; sus climas son templado subhúmedo y semifrío subhúmedo, ambos con lluvias en verano y suelos de tipo andosol húmico (GDF, 2000).

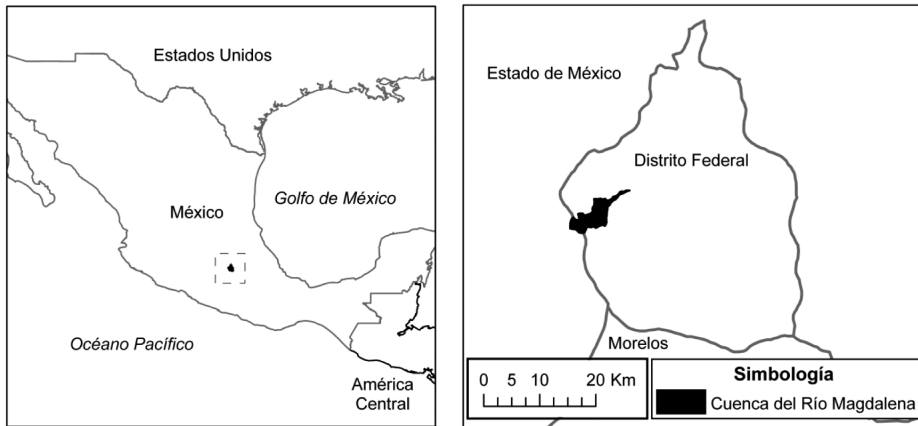


Figura 1. Localización de la cuenca del río Magdalena.

En la cuenca se forma el río Magdalena, que es uno de los cuerpos de agua más importantes de la Ciudad de México, con un volumen aproximado de agua permanente de $1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y que es empleado como fuente de abastecimiento de agua potable (CNA, 1997).

Elaboración del mapa de vegetación y uso de suelo

Para realizar la estimación de captura de carbono se determinaron las clases de cobertura vegetal y uso de suelo para la elaboración del mapa, las cuales se definieron con base en los criterios de Reporte Técnico del Inventario Nacional Forestal (INF) de la Subsecretaría Forestal y Fauna Silvestre (SFFS, 1994), identificando las mismas categorías de cobertura vegetal y uso de suelo. Para la elaboración del mapa se reagruparon las clases de cobertura vegetal en 26 (Tabla 1).

Una vez determinadas las clases de cobertura vegetal, se realizó la interpreta-

ción de fotografías aéreas de escala 1:10 000, tomadas en enero del año 2005 con dirección norte-sur, y proporcionadas por el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. La digitación del mapa se generó en pantalla usando el software Autocad Map 2002 y la base de datos en ArcView 3.2a.

Diseño de muestreo

Se establecieron ocho clases de vegetación a muestrear para los fines de este estudio (Tabla 2).

Para estimar el contenido de carbono se utilizó un diseño de muestreo sistemático simple. Esto se hizo sobreponiendo una red cuadrangular de puntos equidistantes a 550 m (Fig. 2) a la capa de vegetación y uso de suelo, con el programa Arc GIS 9.2. El tamaño de muestra se determinó con 1% de intensidad de muestreo. Los puntos estuvieron definidos por coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), representando el centro de las unidades a muestrear.

Tabla 1. Relación de las clases de cobertura vegetal con las establecidas por el INF, 1994.

<i>Clases en este estudio</i>	<i>Claves</i>	<i>Clases del INF</i>
Agricultura	AGR	Agricultura de riego Agricultura de temporal
Asentamientos humanos	AS	Zona urbana
Bosque de <i>Abies religiosa</i> abierto	BA ₁	Bosque de oyamel abierto
Bosque de <i>Abies religiosa</i> cerrado	BA ₂	Bosque de oyamel cerrado
Bosque de <i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i> abierto	BA-Ph ₁	Bosques de otras coníferas abierto
Bosque de <i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i> cerrado	BA-Ph ₂	Bosques de otras coníferas cerrado
Bosque de <i>Abies religiosa-Pinus</i> sp. abierto	BA-Psp ₁	Bosques de otras coníferas abierto
Bosque de <i>Abies religiosa-Pinus</i> sp. cerrado	BA-Psp ₁	Bosques de otras coníferas cerrado
Bosque de <i>Abies religiosa-Quercus</i> sp. abierto	BA-Q ₁	Bosques de otras coníferas abierto
Bosque de <i>Abies religiosa-Quercus</i> sp. cerrado	BA-Q ₂	Bosques de otras coníferas cerrado
Bosque de <i>Quercus</i> sp. abierto	BQ ₁	Bosque de encino abierto
Bosque de <i>Quercus</i> sp. cerrado	BQ ₂	Bosque de encino cerrado
Bosque de <i>Quercus</i> sp.- <i>Abies religiosa</i> abierto	BQ-A ₁	Bosques de otras coníferas abierto
Bosque de <i>Quercus</i> sp.- <i>Abies religiosa</i> cerrado	BQ-A ₂	Bosques de otras coníferas cerrado
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> abierto	BPh ₁	Bosque de pino abierto
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> cerrado	BPh ₂	Bosque de pino cerrado
Bosque de <i>Pinus</i> sp. abierto	BPsp ₁	Bosque de pino abierto
Bosque de <i>Pinus</i> sp. cerrado	BPsp ₂	Bosque de pino cerrado
Bosque de <i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i> abierto	BPh-A ₁	Bosques de otras coníferas abierto
Bosque de <i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i> cerrado	BPh-A ₂	Bosques de otras coníferas cerrado
Bosque de <i>Pinus</i> sp.- <i>Abies religiosa</i> abierto	BPsp-A ₁	Bosques de otras coníferas abierto
Bosques de otras coníferas abierto		
Bosque de <i>Pinus</i> sp.- <i>Abies religiosa</i> cerrado	BPsp-A ₂	Bosques de otras coníferas cerrado
Bosque mixto	BM	No considerado
Cuerpos de agua	H ₂ O	Cuerpos de agua
Pastizal	PAS	Pastizal inducido
Plantación forestal	REF	Plantación forestal

Tabla 2. Clases de cobertura vegetal utilizadas para la estimación de carbono.

<i>Clases a muestrear</i>	<i>Claves</i>	<i>Clases del INF</i>
Bosque de <i>Abies religiosa</i> abierto	BA ₁	Bosque de oyamel abierto
Bosque de <i>Abies religiosa</i> cerrado	BA ₂	Bosque de oyamel cerrado
Bosque de <i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i> cerrado	BA-Ph ₂	Bosques de otras coníferas cerrado
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> abierto	BPh ₁	Bosque de pino abierto
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> cerrado	BPh ₂	Bosque de pino cerrado
Bosque de <i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i> cerrado	BPh-A ₂	No considerado

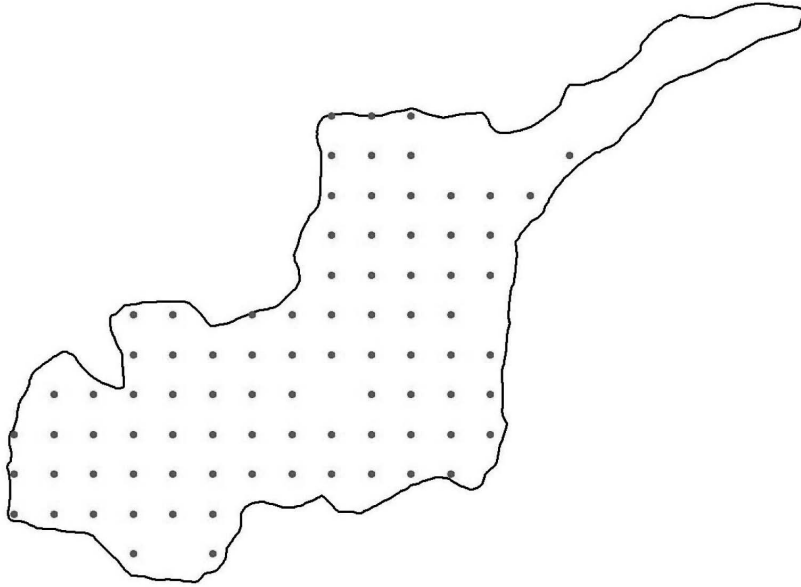


Figura 2. Red cuadrangular de puntos, obtenida del muestreo sistemático simple para la zona.

Unidad de muestreo

La metodología empleada en campo para la colecta de los datos de biomasa aérea se basó en un diseño anidado (Ordóñez, 2008; Fig. 3), que permitió la colecta de muestras y sus réplicas. De acuerdo con una intensidad de muestreo de 0,64%, se generaron 52 sitios de 3000 m², los cuales estuvieron conformados por tres parcelas circulares de 1000 m² con un radio de 17,84 m.

Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea

Para estimar la biomasa aérea (BA) de los árboles se establecieron parcelas circulares de 1000 m². En cada parcela se evaluó la vegetación arbórea. A cada individuo ($h > 1,30\text{m}$) se le midió el diámetro normalizado (DN) y la altura total. Los individuos con una altura total inferior a los 1,30 m se

contabilizaron e identificaron por género. Todos los datos fueron registrados por género y por clase diamétrica, con intervalos de 5 centímetros.

Con los datos recolectados sobre la especie *Abies religiosa* se elaboró la siguiente ecuación alométrica para las alturas:

$$y = -0.004(DN^2) + 0,8427(DN)$$

$$r^2: 0,8427$$

Para las alturas de la especie *Pinus hartwegii* se utilizó la ecuación alométrica propuesta por Espinoza (2005):

$$y = 0,0015(DN^2) + 0.3956(DN)$$

$$r^2: 0,8883$$

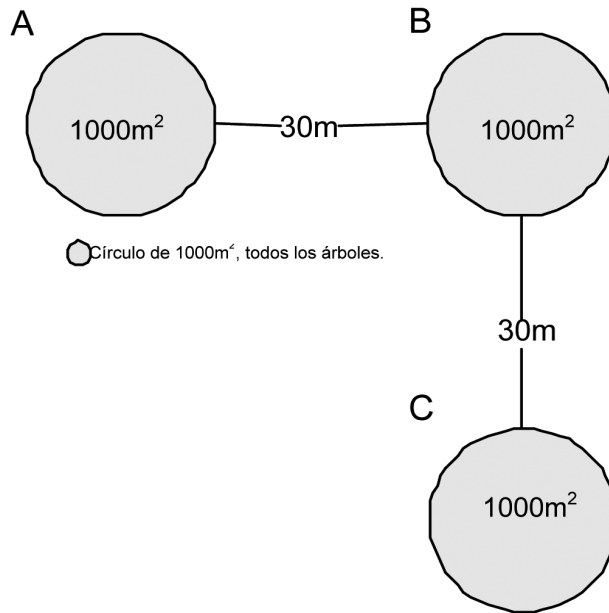


Figura 3. Diseño anidado.

En la estimación de la biomasa aérea para ambas especies se utilizó la siguiente ecuación (Brown y Lugo, 1994):

BA: volumen x densidad de la madera

donde:

Volumen: Área basal x altura
(Grijpma, 2001)

Área basal: $\pi / 4 (DN^2)$
(Mostacedo y Fredericksen, 2000)

Para fines de este estudio se tomó el dato de densidad de la madera (t/m^3) promedio de las monografías expedidas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Musálem y Ramírez, 2003; Musálem y Solís, 2000).

Todos los valores de biomasa se pasaron a carbono mediante un factor de 0,5 MgDM / MGC (IPCC, 1995).

RESULTADOS

Mapa de vegetación

Las superficies cubiertas por cada una de las clases de cobertura vegetal y uso de suelo se muestran en el tabla 3.

El mapa de las diferentes clases de cobertura vegetal y uso de suelo (cvus) se muestra en la figura 4. Para validar cada una de las diferentes cvus se tomaron 266 puntos de verificación bis a bis (usando tres sistemas de posicionamiento global).

Figura 4. Mapa de vegetación y uso de suelo de la cuenca del río Magdalena.

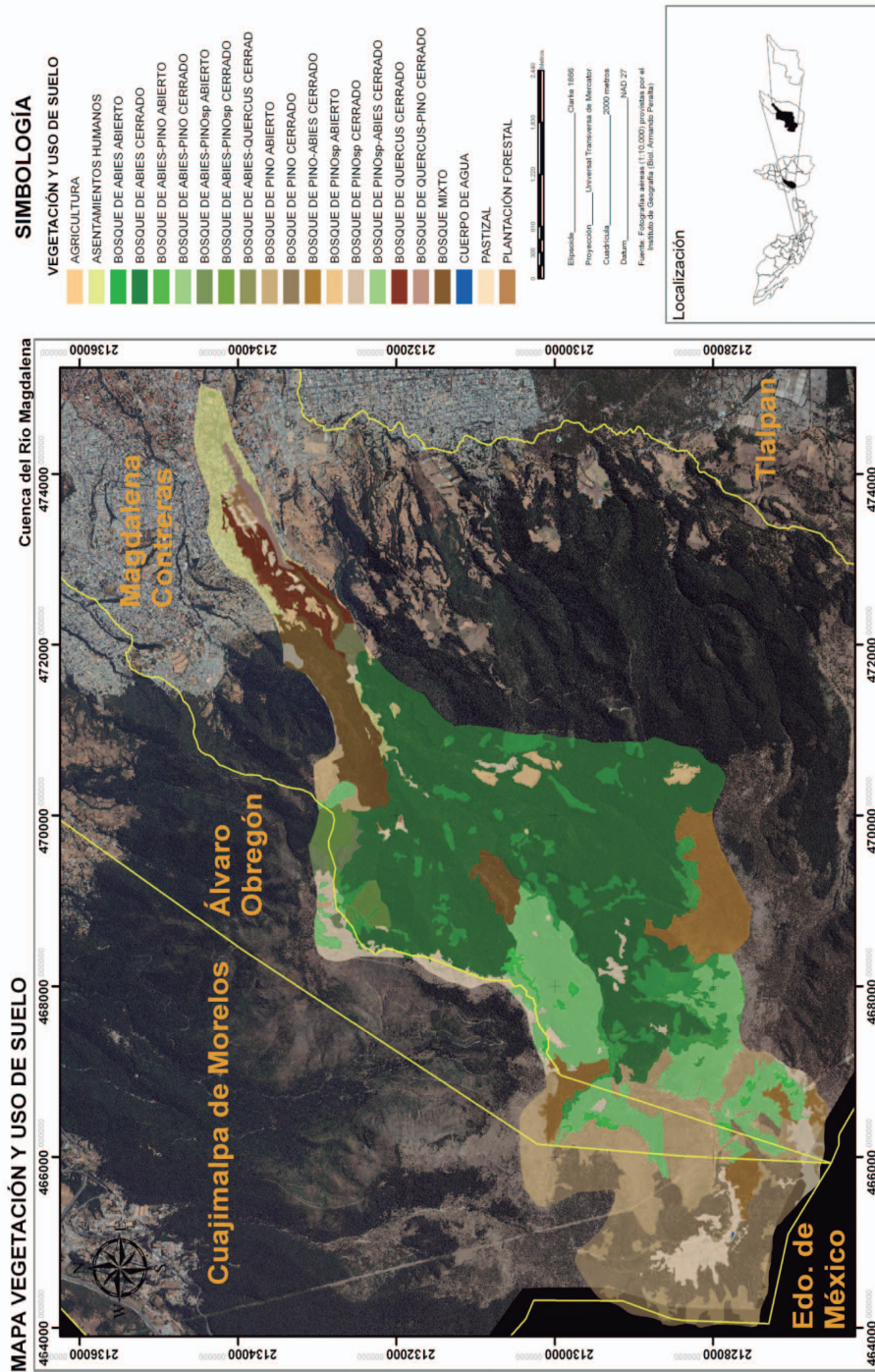


Tabla 3. Superficie que ocupan las diferentes clases de cobertura vegetal y uso de suelo en la CRM.

Clases	Área (ha)	%
Agricultura	31,98	1,07
Asentamientos humanos	99,60	3,34
Bosque de <i>Abies religiosa</i> abierto	183,08	6,14
Bosque de <i>Abies religiosa</i> cerrado	1012,09	33,95
Bosque de <i>Abies religiosa</i> - <i>Pinus hartwegii</i> abierto	19,69	0,66
Bosque de <i>Abies religiosa</i> - <i>Pinus hartwegii</i> cerrado	386,21	12,95
Bosque de <i>Abies religiosa</i> - <i>Pinus</i> sp. abierto	16,49	0,55
Bosque de <i>Abies religiosa</i> - <i>Quercus</i> sp. cerrado	11,38	0,38
Bosque de <i>Quercus</i> sp. cerrado	59,73	2,00
Bosque de <i>Quercus</i> sp.- <i>Pinus</i> sp. cerrado	17,27	0,58
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> abierto	322,14	10,80
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> cerrado	288,56	9,68
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> - <i>Abies religiosa</i> cerrado	192,19	6,45
Bosque de <i>Pinus</i> sp. abierto	20,57	0,69
Bosque de <i>Pinus</i> sp. cerrado	6,47	0,22
Bosque de <i>Pinus</i> sp.- <i>Abies religiosa</i> cerrado	12,21	0,41
Bosque mixto	143,24	4,80
Cuerpos de agua	0,17	0,01
Pastizal	164,15	5,51
Plantación forestal	6,51	0,22
Total	2981,53	100

Estructura diamétrica del bosque

Se definieron 11 clases diamétricas para cada uno de los seis tipos de coberturas vegetales muestreadas, a fin de describir la estructura horizontal de los bosques de la cuenca del río Magdalena

Para describir la estructura del bosque, fueron medidos los diámetros de 13,863 árboles y las alturas de 300 de ellos, de los cuales, 61% fueron *Pinus* sp., 28% *Abies religiosa*, 7% hojosas, 3% *Cupressus* sp. y 1% *Quercus* sp. (Fig. 5).

En la figura 5 se observa que la clase diamétrica con más individuos es < 5 cm (50%), teniendo una mayor abundancia de renuevos de *Pinus* sp. (72%), seguido

de *Abies religiosa* (22%) y en menor medida las hojosas (3%), *Cupressus* sp. (2%) y *Quercus* sp. (1%). La clase diamétrica con menor número de individuos es 42,6 cm -47,5 cm (1,8%) y está compuesta principalmente por *Abies religiosa* (71%) y *Pinus* sp. (23%) y en menor medida por *Cupressus* sp. (4,5%), hojosas (0,5%) y *Quercus* sp. (0,5%).

Treinta y cinco por ciento de los individuos se encuentra en las clases diamétricas de 5 cm a 22,5 cm (Fig. 5), donde se presenta una mayor abundancia de *Pinus* sp. (60%), seguida de la especie *Abies religiosa* (21%), hojosas (14%) y en menor medida *Cupressus* sp. (4%) y *Quercus* sp. (1%).

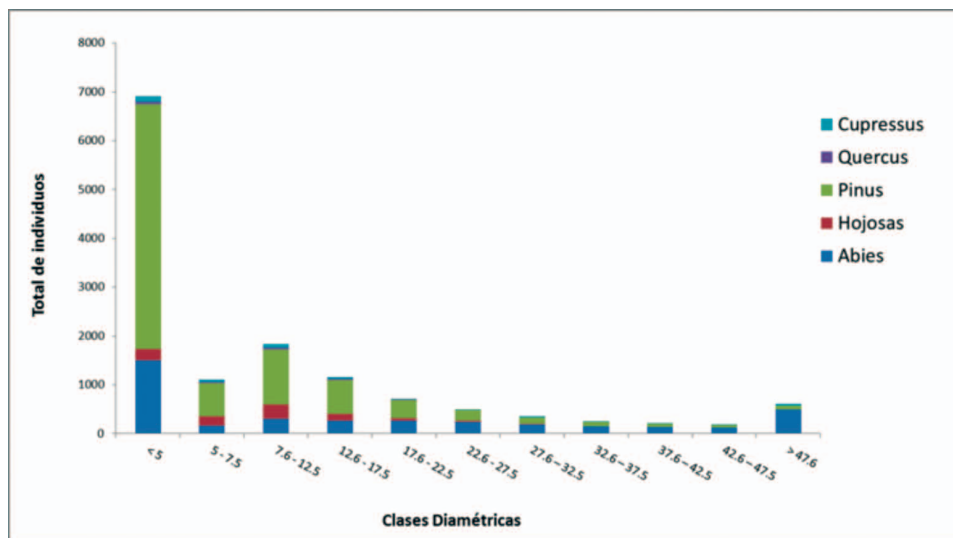


Figura 5. Número de individuos totales, por clase diamétrica, de los bosques de la cuenca del río Magdalena, derivado de 52 sitios de muestreo.

Las clases diamétricas restantes agrupan a 15% de los individuos. *Abies religiosa* es la de mayor abundancia con 63%, seguida de *Pinus* sp. (30%), *Cupressus* sp. (4%), hojasas (2,5%) y *Quercus* sp. (0,5%).

Contenido de carbono

Se determinó el carbono almacenado en cada una de las coberturas vegetales muestreadas (Tabla 4).

Tabla 4. Contenido de carbono por cobertura vegetal.

Cobertura vegetal	Superficie (ha)	n	Media y EE (tC/ha)	Intervalo (tC/ha)
Bosque de <i>Abies religiosa</i> abierto	183,08	4	95,49 ± 24,51	40,71 – 155,82
Bosque de <i>Abies religiosa</i> cerrado	1012,09	22	162,91 ± 16,69	72,37 – 362,20
Bosque de <i>Abies</i> – <i>Pinus</i> sp. cerrado	341,7	7	106,92 ± 25	40,30 – 205,39
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> abierto	322,14	5	21,21 ± 5,62	6,25 – 32,29
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> cerrado	288,56	10	47,37 ± 5,64	18,37 – 67,84
Bosque de <i>Pinus</i> sp. – <i>Abies religiosa</i> cerrado	179,98	4	39,39 ± 14,88	27,27 – 108,73

Superficie = área en hectáreas que ocupa la clase vegetal.

n = número de sitios (cada sitio consta de 3 levantamientos de 0,1 ha).

Media = Contenido de carbono promedio por cobertura vegetal.

EE = Error estándar.

Intervalo = Valores mínimos y máximos de contenido de carbono por cobertura vegetal.

DISCUSIÓN

Estructura diamétrica del bosque

Los bosques de la Magdalena Contreras son irregulares en cuanto a la edad (en la clasificación forestal corresponde al término multietáneo y homogéneo; Grijpma, 2001), concentrándose la mayor cantidad de individuos en las etapas de regeneración inicial y avanzada (< 10 cm de DN; Fig. 5).

Se observa que, derivado de las campañas de reforestación, se ha favorecido a diferentes especies del género *Pinus*, cuya distribución natural no corresponde a la vegetación primaria de los bosques de la Magdalena Contreras. Los *Pinus hartwegii* son dominantes en la estructura diamétrica < 5 cm a 22,5 cm de DN, esto indica que se está desarrollando un proceso de sucesión dirigida y de competencia inducida que afecta a los rodales puros, tanto de *Abies religiosa* como a los de *Pinus hartwegii*.

Según Pascual (2003), el *Abies religiosa* es una especie cuyo crecimiento está en función de la sombra, el suelo y la competencia con otros *Abies* sp. y especies del sotobosque. Dicha competencia puede provocar la mortandad de las plántulas de *Abies religiosa*, pues sus raíces son menos capaces que las de las angiospermas (sotobosque) de aprovechar el abastecimiento de agua y nutrientes en el suelo, en sus etapas iniciales.

Las hojosas representan 7% del total de la población de las plantas registradas, con dominancia de arbustos en el sotobosque, que parecen ser exógenos y que compiten con las plántulas del estrato arbóreo y que según Nieto (*op. cit.*), también pueden favorecer el crecimiento de las plántulas de *Abies religiosa*, al generar un microclima, además,

como son estacionales, les provee nutrientes para su crecimiento. Las plantaciones de *Cupressus* sp. ocupan 3% del total de la población inmersa en las clases que fueron muestreadas y los *Quercus* sp. apenas registran 1%. También se observa la presencia de ruderales que indican perturbación (*Acaena elongata*).

De acuerdo con los datos registrados, se cree que en un futuro los bosques de la cuenca del río Magdalena cambiarán su dominancia de *Abies religiosa* a *Pinus* sp. Posiblemente las condiciones del cambio de clima favorezcan esta transición, ya que de haber un incremento en la temperatura, el género *Pinus* tendrá mayores probabilidades de sobrevivir, ya que presenta mejor adaptación al ambiente.

Contenido de carbono

La diferencia de valores de contenido de carbono almacenado, por tipo de cobertura vegetal, presenta variaciones derivadas de:

La edad del arbolado, es decir, los bosques son multietáneos. El crecimiento diferencial derivado de la calidad de sitio refleja diferentes densidades de biomasa arbórea y por ende almacenes de carbono e incrementos disímiles en la misma cobertura vegetal.

El estado de conservación de la masa forestal, la densidad del arbolado y las condiciones actuales de la estructura y composición de cada cobertura vegetal.

La infraestructura de los caminos y las pendientes (accesibilidad).

Otros procesos que afectan a la cuenca y por tanto al contenido de carbono almacenado son:

Contaminación atmosférica. La ubicación espacial de la cuenca del Río Magdalena es el suroeste de la cuenca de México, dirección a la cual viajan los vientos dominantes, arrastrando la contaminación generada en la ciudad, dando como consecuencia: clorosis, exposición a concentraciones de ozono, afectación de la fitomasa, alteración entre los ciclos reproductivos de diferentes especies, lluvia ácida, retirada de polinizadores y dispersadores, entre otros problemas; esta contaminación también genera condiciones microclimáticas que favorecen el desarrollo y distribución vertical de plagas forestales.

Plagas. La veda forestal en el suelo de conservación del D.F., impide la remoción de individuos que ya están enfermos o que son susceptibles de ser invadidos por organismos patógenos, propiciando el desarrollo de plagas, dando lugar a una disminución en la captura potencial de carbono, la purificación del aire, la generación de oxígeno y un incremento en la distribución de plagas (e.g.: muérdago y descortezador).

Incendios naturales e inducidos. De 1995 a 2004 se han registrado 157 incendios (Flores, 2006) asociados a las sequías y a las actividades humanas; en 1998 se registró uno de los incendios más severos, afectando la copa de los bosques de *Abies religiosa*, principalmente. Debido a la falta de comunicación de autoridades y de la comunidad Magdalena Atlitic, no se han abierto los canales para darle un saneamiento adecuado a las zonas afectadas; esto también merma de forma directa el potencial de captura de carbono y sus almacenes, así como los continuos de bosque que permiten el desplazamiento de las especies.

Comparación con otros estudios de caso del área de la cuenca del río Magdalena

Con el fin de conocer los resultados de los estudios relacionados con la estimación del contenido de carbono en el área de la Magdalena Contreras, se realizó un cuadro comparativo (Tabla 5), analizando la superficie de la unidad de muestreo, la superficie total muestreada y el carbono estimado:

Se registraron tres estudios en el caso de *Abies religiosa*, en los que los autores indican valores que van de las 58 tC/ha a las 207 tC/ha. Este estudio presenta resultados basados en la densidad del arbolado con valores que van de 95 tC/ha a 162 tC/ha, lo que permite apreciar diferencias significativas respecto a las sobreestimaciones y subestimaciones en los almacenes de carbono en esta cobertura vegetal, aunado a la intensidad y tipo de muestreo.

Para el bosque de *Pinus hartwegii*, se comparan los resultados con dos estudios de caso, encontrando valores de carbono almacenado que van de 44 tC/ha a 57,6 tC/ha, en ambos casos no se clasifica esta cobertura vegetal tomando como base la densidad del arbolado y la superficie que ocupa (CORENA, 2001 y Espinoza, 2005).

Este estudio, separa esta clase con base en la densidad del arbolado, observando una diferencia de casi el doble de carbono almacenado entre ambas; es por ello que se sugiere que las interpolaciones y extrapolaciones del carbono almacenado por clase de cobertura vegetal y uso de suelo, se deben hacer con conocimiento de causa.

Tabla 5. Comparación de los estudios de estimación de contenido de carbono en el suelo de conservación del sur del Distrito Federal y en la cuenca del río Magdalena.

<i>Cobertura vegetal</i>	<i>Unidad de muestreo (ha)</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>Carbono (tC/ha)</i>	<i>Fuente</i>
Bosque de <i>Abies religiosa</i>	0,1	7,4	144,07	CORENA (2001)
	0,06	11,64	207,98	Valenzuela (2001)
	0,0625	1,75	58	Nava (2006)
Densidad cerrada	0,3	6,6	162,91	Este estudio
Densidad abierta	0,3	1,2	95,49	Este estudio
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>	0,1	7,4	57,61	CORENA (2001)
	0,0625	1,44	44	Espinoza (2005)
	0,3	3	47,37	Este estudio
Densidad abierta	0,3	1,5	21,21	Este estudio

CONCLUSIONES

En la cuenca del río Magdalena, la cobertura vegetal que registró la mayor cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea fue *Abies religiosa*, en su densidad cerrada, lo que hace trascendental el diseño de políticas públicas, sobre todo en zonas cercanas a estos tipos de cobertura, dada su relevancia por los servicios ambientales que estos brindan a la Ciudad de México. Además son necesarias campañas de reforestación adecuadas a las condiciones de composición actuales, ya que de seguir las tendencias de dichos programas en la cuenca, se originará una transición en la composición y estructura, principalmente, en los bosques de *Abies religiosa*, puesto que se registró que la especie más plantada en todas la coberturas vegetales son del genero *Pinus*, posiblemente derivado de la falta de información técnica-científica, o a su producción en los viveros cercanos.

La variación en las densidades de carbono registradas por tipo de cobertura

vegetal, obedecen a múltiples factores (e.g.: calidad de sitio, accesibilidad, cercanía a áreas urbanas, presión de los recursos, presencia de actividades no aptas para este tipo de vocación), pero el principal factor de afectación y permanencia son las actividades antrópicas. Es necesario hacer comparaciones con estudios de caso *in situ* y *ex situ*, a fin de enriquecer la posible toma de decisiones sobre el recurso, determinar las técnicas que expliquen mejor el fenómeno, los alcances, las limitaciones y la precisión de los resultados.

El detalle fino del presente estudio permitió disminuir incertidumbres respecto a la distribución de la cobertura vegetal en la cuenca. La escala de análisis del presente estudio permite comparaciones con los mapas temáticos generados por otras instituciones oficiales (e.g.: INEGI, CORENA, Conabio, entre otros), ya que se puede realizar una generalización de las coberturas vegetales para hacerlas compatibles.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Proyecto UNAM:20993-1498-5-XI-07; INE: INE/A1-055/2007, "Comportamiento y distribución de la plagas de importancia económica en el sector forestal ante un cambio climático en México; financiamiento en parte por Macroproyecto: Manejo de Ecosistemas y Desarrollo Humano, Universidad Nacional Autónoma de México y fondos propios.

REFERENCIAS

- Brown, S. 2001. Measuring carbon in forest: current status and future challenges. *Environmental Pollution* 116:363-372.
- Brown, S. y A. Lugo. 1994. Rehabilitation of tropical lands: A key to sustaining development. *Restoration Ecology* 2:97-111.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 1997. Estudio de saneamiento del río Magdalena, Delegación La Magdalena Contreras, Distrito Federal. Gerencia Regional de Aguas del Valle de México. Subgerencia de Calidad del Agua e Impacto Ambiental. Informe final. México. 217 p.
- CORENA (Comisión de Recursos Naturales del Distrito Federal). 2001. Estimación del contenido de carbono en la biomasa en el área del suelo de conservación del Distrito Federal. Octubre. Informe Técnico CORENA. 32 p.
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler y J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263:185-190.
- Espinoza, M. 2005. Estimación del contenido y captura de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* de la cuenca alta del río Magdalena, Magdalena Contreras, D.F. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 72p.
- Fernández, E.A., F. Uribe, I. Ramírez, B. Apolinar y A. Vázquez. 2002. Evaluación del avance de la mancha urbana sobre el área natural protegida de la Cañada de los Dínamos. Instituto Nacional Ecología. México. *Gaceta Ecológica* 62:56-67.
- Flores, A. 2006. Frecuencia de incendios forestales, su relación con la precipitación y la riqueza de especies vegetales en la cuenca del río Magdalena, D.F., México. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. México. 53 p.
- Galeana, J., 2008, Estimación del contenido y captura potencial de carbono, su valor económico; en la cuenca del río Magdalena, D.F. México. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras. 95 p.
- Grijpma P. 2001. Producción Forestal. 2a. ed. Trillas. México. 134 p.
- GDF (Gobierno del Distrito Federal). 2000. Programa general del ordenamiento ecológico 2000-2003. Secretaría de Medio Ambiente. Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural. Dirección Ejecutiva de Ordenamiento Ecológico. México. 133 p.
- Goudie, A., 1990. The Human Impact on the Natural Environment. 3a. ed. Basil Blackwell Ltd. Oxford, Reino Unido. 388 p.

- Houghton, R.A. 1991. Tropical deforestation and atmospheric carbon dioxide. *Climatic Change* 19:99-118.
- INEGI (Instituto Nacional Estadística, Geografía e Informática). 2005a. Distrito Federal, Cuaderno estadístico delegacional: Álvaro Obregón. Referencias generales. Aspectos geográficos. México. 16 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2005b. Distrito Federal, Cuaderno estadístico delegacional: Cuajimalpa de Morelos. Referencias generales. Aspectos geográficos. México. 16 p.
- INEGI (Instituto Nacional Estadística, Geografía e Informática). 2005c. Distrito Federal, Cuaderno estadístico delegacional: Magdalena Contreras. Referencias generales. Aspectos geográficos. México. 16 p.
- INEGI (Instituto Nacional Estadística, Geografía e Informática). 2005d. Distrito Federal, Cuaderno estadístico delegacional: Tlalpan. Referencias generales. Aspectos geográficos. México. 16 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1995. *Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Johns, A. D., W.V. Reid, D. Simberloff, V.H. Heywood, S.N. Stuart, K.S. Brown Jr. G.G. Brown y R.J. Johns. 1992. Deforestation and species extinction in Tropical Forest. *In*: Whitmore, T. y J. Sayer (eds.). *Tropical deforestation and species extinction*. IUCN. Chapman and Hall. Londres, Inglaterra. p:1-14.
- Lambin, E.F., 1994. Modelling deforestation processes: a review tropical ecosystem environment observations by satellites, TREES Series B, Research report num. 1. Office of the European Commission, Directorate-General XIII. Luxemburgo. 113 p.
- Lund, H. 2006. National forest inventories and global resource assessments. *In*: Forest and Forest Plants, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), EOLSS Publishers, Oxford, Reino Unido. p:29-65.
- Masera, O., R.D. Martínez, T. Hernández, A. Guzmán y A. Ordóñez. 2000. Inventario nacional de gases de efecto invernadero 1994-1996. Parte 6: Cambio en el uso del suelo y bosques. Laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ecología de los Recursos Naturales del Instituto de Ecología de la UNAM, Campus Morelia-INE, Semarnat, México, D.F, 44 p.
- Masera, O. 1995. Carbon mitigation scenarios for mexican forests: methodological considerations and results. *Interciencia* 20(6):388-395.
- Vargas-Mena A., A. y A. Yáñez S. 2004. La captura de carbono en bosques: ¿una herramienta para la gestión ambiental? *Gaceta Ecológica* 70:5-18.
- Mostacedo, B y T. Fredericksen. 2000. Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR) Santa Cruz, Bolivia. 87 p.
- Murcia, C. 1995. Edge effects in fragmented forest: implications for conservation. *Trends in Ecology and Evolution* 10(2):58-62.

- Musálem, M.A. y M.A. Solís. 2000. Monografía de *Pinus hartwegii*. INIFAP, Centro de Investigación Regional del Centro. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 74 p.
- Musálem, M.A. y A. Ramírez. 2003. Monografía de *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* Shaw. INIFAP, Centro de Investigación Regional del Centro. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Comisión Nacional Para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 364 p.
- Nava, M. 2005. Carbono almacenado como servicio ecosistémico y criterios de restauración en el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena, D.F., México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. 70 p.
- Ordóñez, J.A.B., B.H.J. de Jong, F. García-Oliva, F.L. Aviña, J.V. Pérez, G. Guerrero, R. Martínez y O. Masera. 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology And Management* 255(7):2074-2084.
- Ordóñez, J.A.B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. p:7-9.
- Otegui-Acha, M. 2007. Developing and testing a methodology and tools for the inventorying of sacred natural sites of indigenous and traditional people in Mexico. ALCOA, UICN, Pronatura México A.C., Fundación Rigoberta Menchu Tum. 109 p.
- IPCC (Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático). 2007. Cambio Climático 2007. Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas. Una evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. 114 p.
- Pascual, C.N., M.A. Musálem y J. C. Boyás. 2003. Efecto de la vegetación asociada al sotobosque sobre el crecimiento y desarrollo inicial de *Abies religiosa* (HBK) Schltdl. et Cham. *Ciencia Forestal* 94(28):7-22.
- Rojas-García, F. 2004. Contenido y captura potencial de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional la Malinche: Tlaxcala-Puebla. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. 68 p.
- Sathaye, J.A., W.R. Makundi, K. Andrasko, R. Boer, N.H. Ravindranath, P. Sudha, S. Rao, R. Lasco, F. Pulhin, O. Masera, A. Cerón, J.A.B. Ordóñez, X. Deying, X. Zhang y S. Zuomin. 2001. Carbon mitigation potential and costs of forestry options in Brazil, China, India, Indonesia, México, Philippines and Tanzania. *Mitigation and adaptation Strategies for Global Change* 6:185-211.
- Schneider, S.H. 1989. The greenhouse effect: science and policy. *Science*. 243(10):271-281.
- Soulé, M. y G. Orians. 2001. Conservation biology: research priorities for the next decade. Island Press. EUA. 127 p.
- SFFS. (Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre). 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico 1992-1994. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). México. 81 p.

Valenzuela, H.T. 2001. Estimación de secuestro de carbono en bosques naturales de oyamel en el sur del Distrito Federal. Tesis Profesional. Chapingo, Edo. de México. p:9-60.

Manuscrito recibido el 21 de marzo de 2010.

Aceptado el 23 de enero de 2013.

Este documento se debe citar como:

Galeana-Pizaña, J.M., N. Corona-Romero y J.A.B. Ordóñez-Díaz. 2013. Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. *Madera y Bosques* 19(1):53-69.