

BASE DE DATOS DE LA BIOMASA DE LOS SITIOS DEL INVENTARIO NACIONAL FORESTAL Y DE SUELOS DEL CICLO 2004-2007

DATABASE OF THE BIOMASS OF THE SITES OF THE NATIONAL FOREST AND SOILS INVENTORY OF THE CYCLE 2004-2007

Ben de Jong^{1†}, Marcela Olguín¹, Fabiola Rojas¹, Vanessa Maldonado¹ y Fernando Paz²

¹Unidad Tabasco y Campeche, El Colegio de la Frontera Sur, Villahermosa, Tabasco y Campeche, Campeche, México.

²GRENASER, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México.

[†]Autor para correspondencia: bjong@ecosur.mx

RESUMEN

El contenido de carbono en la biomasa aérea y subterránea de los ecosistemas terrestres es un almacén importante que requiere ser cuantificado para el establecimiento de mecanismos para evitar su pérdida o degradación (*i.e.* REDD+). En México, a partir del 2004, se estableció un Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) por parte de la CONAFOR para mediciones permanentes por ciclos de muestreo de cinco años, con remediciones cada cinco años, también. En el primer ciclo (2004-2007) se establecieron alrededor de 22 000 conglomerados con cuatro sitios de muestreo de 400 m² en una malla sistemática con espaciamiento variable en función del tipo de ecosistema o grupo de vegetación (*sensu* INEGI). En este trabajo se documenta el uso de una base de ecuaciones alométricas específicas y generales, usada para la estimación de la materia seca (biomasa) aérea y subterránea, viva y muerta, en distintos tipos de vegetación *sensu* INEGI con información en el INFyS, ciclo 2004-2007. Se describe la base de datos generada y los procedimientos usados para las estimaciones.

Palabras clave: biomasa aérea y subterránea; biomasa viva y muerta; ecuaciones alométricas; tipos de vegetación; materia seca.

ABSTRACT

The carbon content in the above and belowground biomass of the terrestrial ecosystems is an important stock that needs to be quantified for the establishment of mechanisms to avoid its loss or degradation (*i.e.* REDD +). In Mexico, in 2004, a National Forest and Soil Inventory (INFyS) was established by CONAFOR for permanent measurements in five-year sampling cycles, with re-measurements every five years, as well. In the first cycle (2004-2007) about 22 000 conglomerates were established with four sampling sites of 400 m² in a systematic grid with variable spacing according to the type of ecosystem or vegetation group (*sensu* INEGI). In this work, we document a base of specific and general allometric equations used for the estimation of the above and belowground dry matter (biomass), alive and dead, in different types of vegetation *sensu* INEGI with information in the INFyS, cycle 2004 -2007. The database generated is described, as well as the procedures used in the estimations.

Key words: above and below ground biomass; living and dead biomass; allometric equations; vegetation types; dry matter.

INTRODUCCIÓN

Para realizar estimaciones de la biomasa de los ecosistemas terrestres, que permitan el entendimiento de los contenidos de carbono y su dinámica (Brown, 1997; Peterson *et al.*, 2012), es importante considerar los inventarios forestales y similares, para tener una representación espacial y temporal adecuada a la escala de país.

El carbono almacenado en la biomasa de los ecosistemas terrestres es importante desde la perspectiva de las contribuciones en la reducción de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) hacia la atmósfera. Las estimaciones de este almacén, biomasa viva y muerta, oscilan entre 456 Pg C (Carré *et al.*, 2010) a 500 Pg C (Ruesch y Gibbs, 2008). Las estimaciones recientes (FAO e ITPS, 2015) del carbono en los suelos y en la biomasa, plantean la necesidad de realizar esfuerzos conjuntos entre el sector forestal y agropecuario para la implementación de acciones de mitigación y adaptación al cambio climático, ya que el carbono en la clase no bosque (*i.e.* pastizales, matorrales, agricultura y otras clases) es de alrededor del 40% de todo el carbono en los ecosistemas terrestres.

Con relación a los mercados del carbono asociados al mecanismo REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación evitada más conservación, incremento de almacenes y manejo forestal sustentable), en el contexto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, la evaluación de la incertidumbre de los almacenes y flujos de carbono es un factor crítico, sin el cual su implementación es problemática (Nickless *et al.*, 2011; Pelletier *et al.*, 2010). Los errores de estimación de la biomasa o carbono en los inventarios forestales son, principalmente, función de errores de muestreo, de medición, de selección del modelo de estimación, de estimación de los parámetros del modelo y de representatividad espacial (Parresol, 1999; Chave *et al.*, 2004; Picard *et al.*, 2012 y 2015; Sileshi, 2014; Temesgen *et al.*, 2015). La incertidumbre asociada a la selección de un modelo matemático, para estimar la biomasa y carbono de las plantas, es la principal fuente de incertidumbre (Pelletier *et al.*, 2010; Molto *et al.*, 2013; Picard *et al.*, 2015).

La biomasa aérea y subterránea de la vegetación puede estimarse usando el concepto de alometría (Gayon, 2000), que establece relaciones potenciales y, de otro tipo, entre la variable a estimar y la que se usa en forma indirecta para la estimación, que generalmente es más fácil de medir en campo. En el caso de la biomasa

aérea, las variables más usadas para la estimación son el diámetro a la altura del pecho (DAP) o normal (DN) y la altura total (HT) de las plantas, estableciéndose relaciones funcionales para evaluar la biomasa aérea (B) (Brown *et al.*, 1989; Chave *et al.*, 2005; Vargas-Larreta *et al.*, 2017).

Las ecuaciones alométricas generalmente se desarrollan para especies y lugares específicos, por lo que su uso fuera de este contexto conlleva alta incertidumbre (Jenkins *et al.*, 2003; Temesgen *et al.*, 2015), ya que los parámetros de las ecuaciones dependen del tipo de vegetación, clima, estructura de la población, arquitectura de las plantas, condición del sitio, ontogenia, entre otras (Nuno *et al.*, 2007; Wutzler *et al.*, 2008; Genet *et al.*, 2011; Chave *et al.*, 2014; Paul *et al.*, 2016; Forrester *et al.*, 2017). Para poder realizar inventarios de biomasa y carbono a nivel regional o nacional, se han realizado compendios de ecuaciones alométricas (Jenkins *et al.*, 2004; Lambert *et al.*, 2005; Henry *et al.*, 2011; Návar *et al.*, 2013; Terk-Mikaelian y Korzukhin, 1997; Rojas-García *et al.*, 2015) susceptibles de usarse en inventarios forestales.

Una alternativa al uso de ecuaciones alométricas específicas, es el empleo de ecuaciones generalizadas (Brown *et al.*, 1989; Chave *et al.*, 2005 y 2014; Feldpausch *et al.*, 2012) a nivel global o pantropical, aun cuando han sido criticadas por no representar condiciones locales (van Breugel *et al.*, 2011; Ngomanda *et al.*, 2013; Paul *et al.*, 2016) y por generar errores mayores al uso de ecuaciones alométricas específicas locales; no obstante, algunos trabajos muestran que las ecuaciones generalizadas no dependen de condiciones locales (Chave *et al.*, 2014), por lo que pueden dar estimaciones razonables (Case y Hall, 2008).

Otra propuesta para generar ecuaciones alométricas generalizadas es a través del uso de los parámetros de los modelos de ajuste, con el modelo potencial $B=aDN^b$, de donde se extraen puntos (D, B) (uniformemente espaciados en relación con D, generalmente) para las especies a agrupar y así ajustar un modelo alométrico a los puntos generados (Pastor *et al.*, 1984). Este enfoque de construcción de ecuaciones alométricas generalizadas se ha usado en los Estados Unidos (Jenkins *et al.*, 2003) y Europa (Muukkonen, 2007).

En este trabajo se presenta la documentación de una base de datos de estimación de la biomasa, aérea y subterránea, en sus componentes viva y muerta, de los sitios de los conglomerados del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFS) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

MATERIALES Y MÉTODOS

Inventario nacional forestal y de suelos ciclo 2004-2009

En México los inventarios nacionales forestales son escasos y sus bases de datos son difíciles de encontrar o acceder. En la década de los noventa se realizó un inventario forestal (SARH, 1994) que se ha usado en inventarios nacionales de GEI (de Jong *et al.*, 2006 y 2010). A partir del 2004, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) implementó el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) que es de tipo permanente y con distribución espacial sistemática en la ubicación de los conglomerados de muestreo: distancia de muestreo de 5 x 5 km para bosques, selvas medianas y altas, manglares, palmares y vegetación de galería (incluidos bosques y selvas); distancia de 10 x 10 km para selvas bajas, comunidades semiáridas y vegetación subacuática (tular, popal y vegetación halófila hidrófila); distancia de 20 x 20 km para comunidades áridas. Los tipos o grupos de vegetación están definidos de acuerdo con la clasificación del INEGI (1997).

Los conglomerados de muestreo fueron diseñados para levantar la información de campo en un área muestral de una hectárea, por lo que dentro de los conglomerados se establecieron unidades o sitios de muestreo de 400 m² (CONAFOR, 2004), con un enfoque anidado de muestreo: área de 1 m x 1 m para herbáceas, subsitio de 12.56 m² para repoblado y sitio de 400 m² para arboles/arbustos con DN ≥ 7.5

cm. Las unidades o sitios de muestreo para bosques, comunidades áridas y semiáridas, pastizales naturales y palmares fueron circulares (Figura 1) y para selvas altas, medianas y bajas, petén, manglar, popal, vegetación halófila hidrófila y vegetación de galería, fueron del tipo rectangular (Figura 2).

El INFyS se planteó por ciclos de medición cada cinco años, con el primero para el periodo 2004-2009 (CONAFOR, 2004), de tal manera que en el periodo del ciclo se establecieran todos los conglomerados planeados y después fueran remuestrados en los ciclos siguientes. Originalmente, el INFyS planteó establecer alrededor de 26 000 conglomerados, pero en la práctica solo se pudieron establecer alrededor de 22 000 conglomerados (Figura 3), algunos de ellos sin los cuatro sitios de muestreo. El ciclo de muestreo inicial-final fue del periodo 2004-2007, debido a problemas en el levantamiento del INFyS del 2008.

En el sitio de medición del repoblado (12.56 m²) la información recabada está relacionada solo con la frecuencia (y cobertura aérea) de especies o grupos de especies por clases de alturas, que varían de acuerdo con el tipo de vegetación (CONAFOR, 2004), por lo que las estimaciones tienen niveles altos de incertidumbre al usar ecuaciones alométricas. Dada la orientación del INFyS hacia bosques y selvas, en las comunidades áridas y semiáridas del país las estimaciones de biomasa generalmente solo reflejan la vegetación en el sitio de muestreo del repoblado, dada la escasez de individuos de árboles o arbustos con DN ≥ 7.5 m que se mide en el área de 400 m².

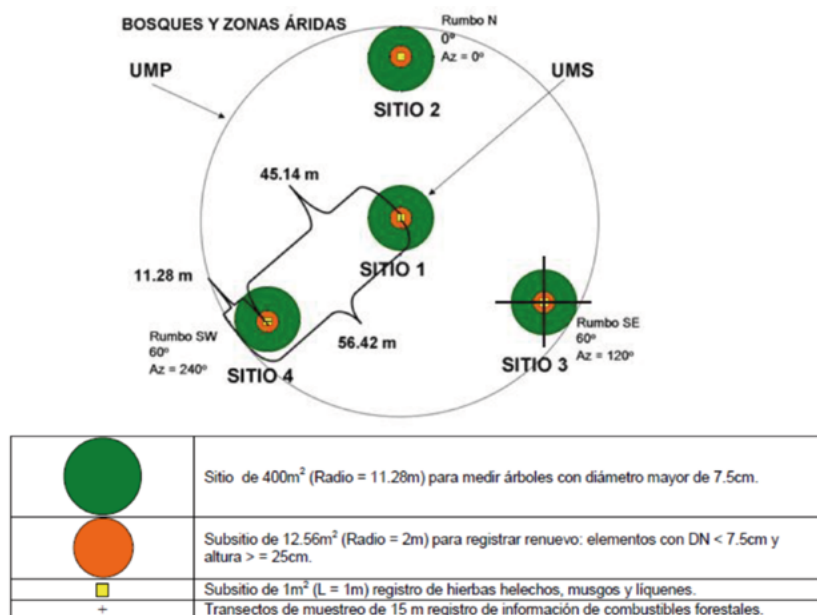


Figura 1. Distribución de los sitios de muestreo circulares en un conglomerado.

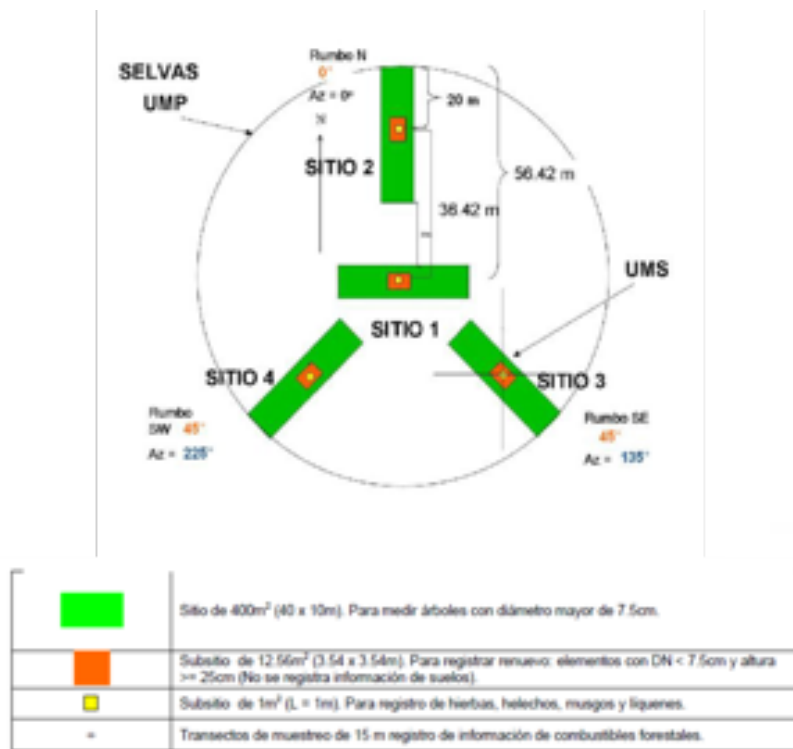


Figura 2. Distribución de los sitios de muestreo rectangular en un conglomerado.

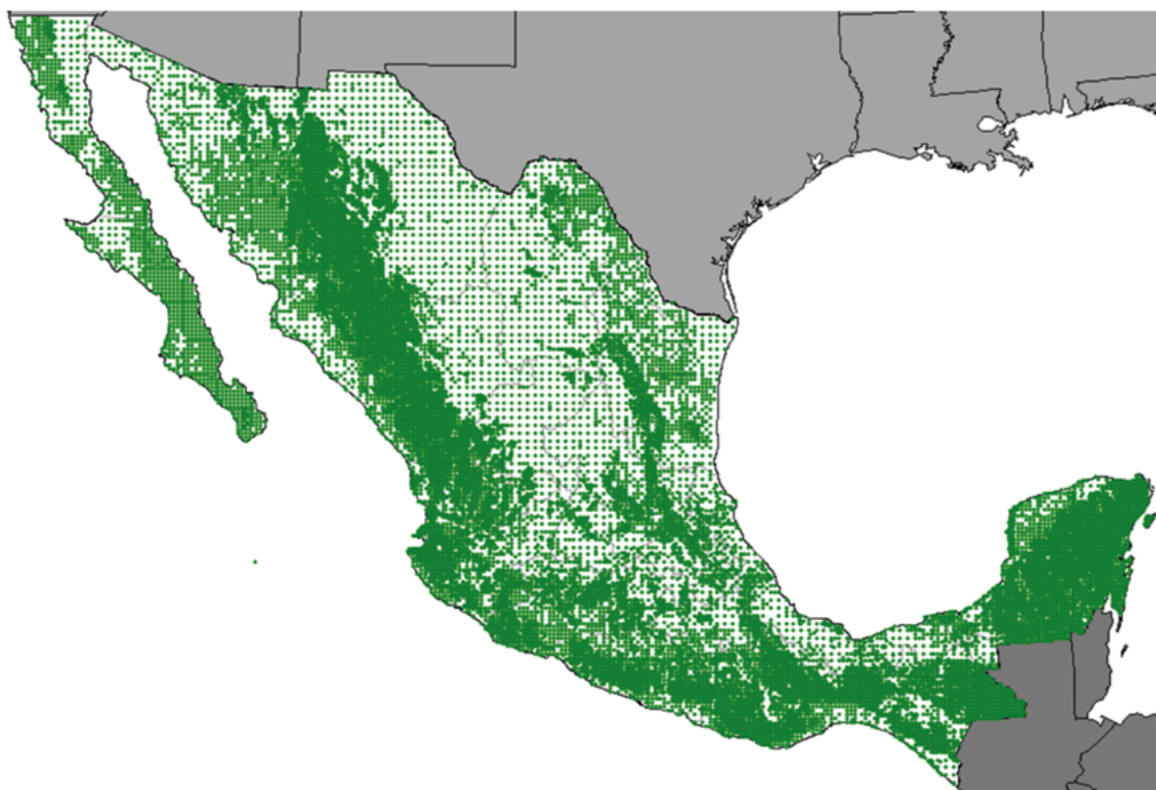


Figura 3. Conglomerados establecidos del INFyS del ciclo 2004-2007.

Selección de ecuaciones alométricas de biomasa

Se realizó la revisión de 290 trabajos nacionales y extranjeros para recopilar las ecuaciones alométricas de biomasa desarrolladas para especies o géneros con distribución en México (de Jong *et al.*, 2009a). Se elaboró una base de datos con las ecuaciones alométricas, registrando la especie o el género, la ubicación, el tipo de vegetación y las características del sitio de estudio: edad del arbolado, temperatura (°C), precipitación (mm), clima, tipo de suelo y tipo de manejo (en caso de que lo presentara), en donde se desarrolló.

También se encontraron ecuaciones alométricas generales que agrupan a varias especies de una misma región. Para ellas se registraron los mismos datos que en las ecuaciones por especie. Una vez que se tuvieron todas las ecuaciones, se clasificaron de acuerdo con su formato (Cuadro 1).

Se compilaron un total de 228 ecuaciones, 180 a nivel de especie, 29 a nivel de género y 19 generales (Figura 4). Cada ecuación tiene restricciones para utilizarse. Inicialmente se consideró la limitante espacial referente al estado donde se obtuvo la ecuación (Figura 5).

Cuadro 1. Formatos lineales de las ecuaciones alométricas y su frecuencia.

Formato	Ecuación	Número
1	$\text{Exp}(a_0)DN^{a1}$	23
2	$a_0DN^{a1}/1000$	61
3	$10^{a0}DN^{a1}/1000$	16
4	$(a_0\text{Exp}(a_1/DN)+a_2)/1000$	3
5	$(a_0\text{Ln}(DN^{a1})+a_2)/1000$	1
6	$(a_0(DN^{a1}HT)^{a2})/1000$	16
7	$\text{Exp}(a_0)(a_2DN^{a1}HT)^{a3}(a_4/1000)$	15
8	$a_0DN^{a1}HT/1000$	11
9	$a_0+(a_1DN^{a2}HT)/1000$	1
10	$\text{Exp}(a_0)(DN^{a1}HT)^{a2}(a_3/1000000)$	1
11	$\text{Exp}(a_0)(DN^{a1}HT+a^2)^{a3}/1000$	1
12	$(a_0+a_1DN^{a2}HT+a_3\text{ln}(DN)HT+a_4DN+a_5\text{ln}(DN^{a6}HT))/1000$	1
13	$(a_0((DN^{a1}HT)^{a2})+a_3(DN^{a4}HT)^{a5})/1000$	1
14	$a_0+a_1DN+a_2DN^{a3}+(a_4DN^{a5}HT)/1000$	1
15	$(a_0+a_1DN+a_2\text{ln}(HT)+a_3\text{ln}(DN)+a_4DN^{a5}HT)/1000$	1
16	$10^{a0}AB^{a1}/1000$	1
17	$10^{a0}(a_1(AB)(HT))^{a3}/1000$	17
18	$(a_0C^{a1}+a_2AB^{a3})/1000000$	1
19	$(a_0C^{a1})/1000000$	4
20	$a_0(a_1*C^{a2})^{a3}/1000000$	1
21	$(a_0C^{a1}+a_2C^{a3})/1000000$	1
22	$\text{Exp}(a_0)\text{Exp}(a_1C)/1000$	1
23	$a_0V^{a1}/1000$	10

DN= diámetro normal (cm), HT= altura total (m), AB=área basal (m²), C=cobertura de la copa (m²), V= volumen (m³), a_n=coeficientes.

También se consideraron los diámetros mínimo y máximo que presentaron los individuos que se usaron para la obtención de la ecuación, dado que la incertidumbre se reduce cuando se involucran individuos de clases menores a 10 cm de DAP (Brown, 1997).

Posteriormente, se ajustaron todos los formatos para obtener una ecuación general de biomasa, en la cual se emplearon los datos de DN y HT y, cuatro coeficientes distintos para cada especie.

La forma general de la ecuación es:

$$B = \frac{a_0 DN^{a_1} HT^{a_2}}{1000} + a_3$$

donde: B= Biomasa (Mg), DN= diámetro normal (cm), HT= altura total (m), a_n =coeficientes.

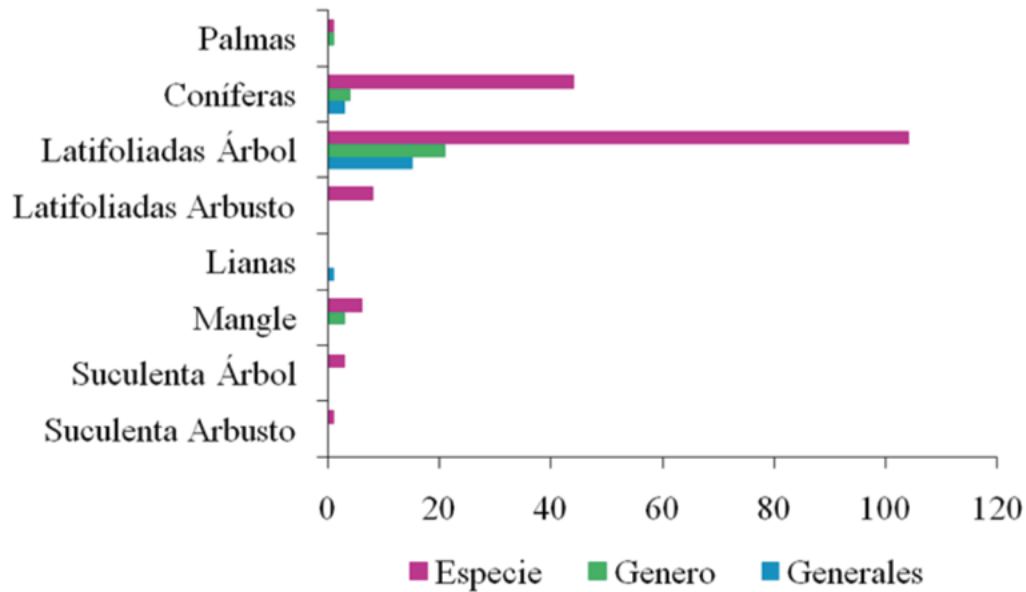


Figura 4. Frecuencia de las ecuaciones de acuerdo con el nivel y grupos.

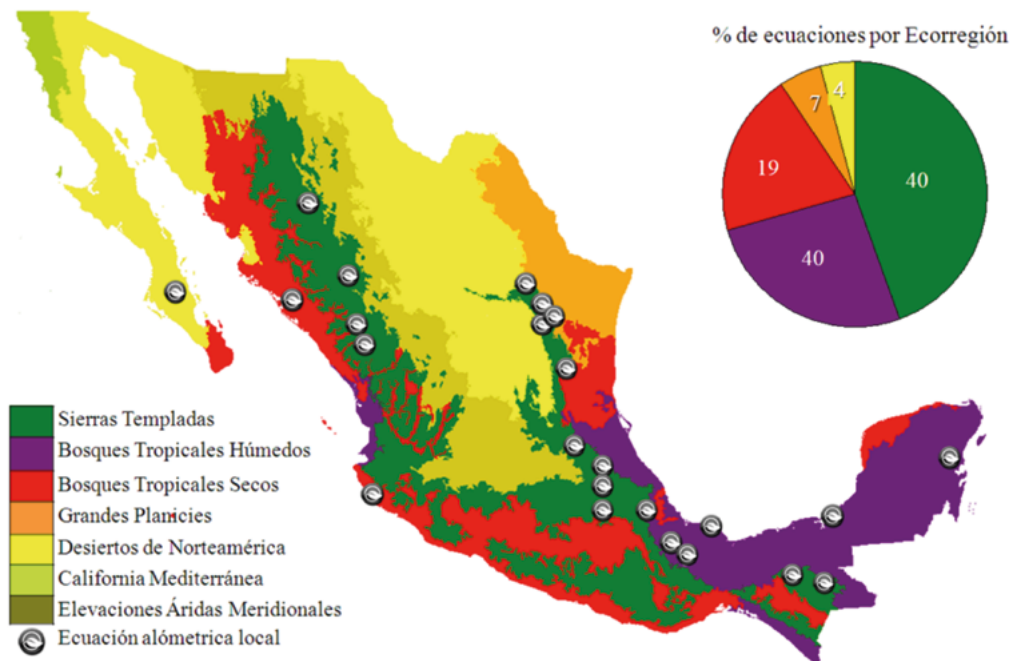


Figura 5. Ubicación de los estudios que han desarrollado ecuaciones alométricas.

RESULTADOS

Estimación de la densidad de biomasa por clase de vegetación

Estimación de la densidad de biomasa arbórea en selvas y bosques

A partir de la base de datos generada con ecuaciones alométricas para biomasa, se calculó el contenido de materia seca o M.S. (Mg) correspondiente a cada registro de la base de datos del INFyS del ciclo 2004-2007. En cerca del 40% de los casos fue posible asignar una ecuación alométrica de biomasa a nivel de especie o de género. Sin embargo, para el 60% restante fue necesario desarrollar ecuaciones alométricas genéricas con base en el método de Pastor *et al.* (1984) y Jenkins *et al.* (2003), usando la información de biomasa calculada a nivel de especie o género y estratificándola conforme a: 1) grupo de especie (*i.e.* conífera, latifoliada, mangle); 2) clase de precipitación media anual (*i.e.* menor a 800 mm, entre 800-1 500 mm, mayor a 1 500 mm) y, 3) estado de la República.

Cuando el número de individuos no fue suficiente para construir la ecuación en alguna categoría, se agregaron los individuos presentes en el estado

de la República más cercano, cuya condición de precipitación y grupo de especie fuera la misma. En total se desarrollaron cerca de 80 ecuaciones alométricas nuevas.

Estimación de la densidad de biomasa en arbustos en zonas áridas y semiáridas

En las comunidades vegetales áridas y semiáridas del país predominan los arbustos. Durante el levantamiento del INFyS ciclo 2004-2007 en estas zonas, se consideraron todos los elementos arbustivos nativos e invasores definidos como plantas leñosas, por lo general de menos de 3 m de alto, cuyo tallo se ramifica desde la base. Asimismo, se incluyeron las plantas con crecimiento arrossetado y las cactáceas distintivas de estas zonas.

Los individuos se registraron en los subsitios de 12.26 m² de cada conglomerado. Cada registro podía tener uno o más individuos y se asoció a una especie y a una categoría de altura. Los intervalos de altura comprendidos fueron: 26-50 cm, 51-75 cm, 76-100 cm, 101-125 cm y 126-150 cm.

La revisión de literatura permitió ubicar ocho ecuaciones alométricas para arbustos de estas comunidades vegetales (Cuadro 2).

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas para arbustos de zonas áridas y semiáridas.

Especie	Ecuación alométrica	Autor
<i>Ipomoea wolcottiana</i>	$10^{-0.8092} * (0.57(AB)HT)^{0.8247} / 1000$	Martínez-Yrizar <i>et al.</i> , 1992
<i>Opuntia excelsa</i>	$10^{-0.8092} * (0.30(AB)HT)^{0.8247} / 1000$	Martínez-Yrizar <i>et al.</i> , 1992
<i>Ephedra torreyana</i>	$430.4C^2 / 1\ 000\ 000$	Ludwig <i>et al.</i> , 1975
<i>Ephedra trifurca</i>	$2086C^2 / 1\ 000\ 000$	Ludwig <i>et al.</i> , 1975
<i>Flourensia cernua</i>	$1872C^2 / 1\ 000\ 000$	Ludwig <i>et al.</i> , 1975
<i>Zinnia acerosa</i>	$283C^2 / 1\ 000\ 000$	Ludwig <i>et al.</i> , 1975
<i>Acacia farnesiana</i>	$3008.3V^{1.0646} / 1000$	Návar, <i>et al.</i> , 2001
<i>Pithecellobium pallens</i>	$1361.3V^{1.0023} / 1000$	Návar, <i>et al.</i> , 2001

HT= altura total (m), AB=área basal (m²), C=cobertura de la copa (m²), V= volumen (m³), a_n=coeficientes.

Para calcular la biomasa aérea de los conglomerados se obtuvo un promedio de los valores estimados con las ocho ecuaciones.

De la base original de arbustos de zonas áridas y semiáridas (50 124 registros) no se tomaron en cuenta 7 667 registros debido a que sólo reportaban diámetro.

Estimación de la densidad de biomasa aérea del renuevo

Comunidades vegetales áridas y semiáridas

En el caso del renuevo de las comunidades áridas y semiáridas, en el INFyS ciclo 2004-2007 únicamente se registraron los individuos en el intervalo de altura de 0.01 – 0.25 m. Lo anterior fue necesario para distinguir a renuevos de arbustos, dado que el levantamiento de los dos datos se realizó en el subsitio de 12.26 m² de cada conglomerado.

El cálculo de biomasa aérea se basó en los promedios de los estimados obtenidos con las ocho ecuaciones que aparecen en el Cuadro 2.

Bosques

Durante el levantamiento del INFyS ciclo 2004-2007 la regeneración natural de los bosques se registró en los subsitios de 12.26 m² de cada conglomerado, de tal forma que cada registro se relaciona con un número de individuos y su especie, así como con una de las siguientes categorías de altura: 0-25-1.50 m, 1.51-2.75 m y 2.76- 3.00 m.

Para el cálculo de la biomasa aérea de los conglomerados se utilizaron dos ecuaciones generales (Cuadro 3), para lo cual se clasificaron los registros de acuerdo con su forma biológica.

Cuadro 3. Ecuaciones generales utilizadas para estimar la biomasa de la regeneración natural en bosques y selvas.

Grupo	Ecuación alométrica	Autor
Coníferas	$0.058(DN^2*HT)^{0.919}/1000$	Ayala-López, 1998
Latifoliadas	$0.283(DN^2*HT)^{0.807}/1000$	Ayala-López, 1998

Selvas

El método para estimar la biomasa aérea de la regeneración natural en los conglomerados de la selva fue casi idéntico al que se siguió en los conglomerados de bosque. La única diferencia fue que los individuos se categorizaron conforme a las siguientes clases de alturas: 0.25-0.75 m, 0.76-1.25 m, 1.26-1.75 m, 1.76-2.25 m, 2.26-2.75 m y 2.76-3.00 m.

sumó la biomasa aérea estimada para árboles, arbustos y renuevo de la base de datos del INFyS ciclo 2004-2007 y se utilizó la ecuación alométrica de Cairns *et al.* (2003) para estimar la biomasa subterránea.

El Cuadro 4 muestra la estructura de la base de datos de las estimaciones de la biomasa a nivel de los sitios de los conglomerados del INFyS, ciclo 2004-2007.

RESULTADOS

Estimación del contenido de biomasa total por tipo de vegetación

Para el cálculo del valor de biomasa total asociado a las principales clases de vegetación del país, primero se

Cuadro 4. Estructura de la base de datos de los sitios de los conglomerados del INFyS.

Campo	Descripción del Campo	Atributos	Unidades
ID_Conglomerado	Identificador del conglomerado por la CONAFOR	Numérico	Adimensional
ID_Sitio	Identificador del sitio por la CONAFOR	Numérico	Adimensional
No_Sitio	Número de sitio dentro del conglomerado	Numérico	Adimensional
Fecha_Levantamiento	Fecha en la que se levantó la información en campo	Fecha	día/mes/año
Longitud	Ubicación con relación a los paralelos	Numérico	Grados
Latitud	Ubicación con relación a los meridianos	Numérico	Grados
No_Estado	Número del estado de acuerdo con el INEGI	Numérico	Adimensional
No_Municipio	Número del municipio de acuerdo con el INEGI	Numérico	Adimensional
Tipo_Tenencia	Tenencia del terreno	Categorico: 1=Ejidal, 2=Comunal, 3=Propiedad particular, 4=Propiedad federal	No aplica
Altitud	Elevación del terreno sobre el nivel medio del mar	Numérico	m
Pendiente	Pendiente del terreno	Numérico	%
Tipo_Fisiografico	Elemento de la fisiografía del terreno	Categorico: 1=Valle, 2=Terraza, 3=Planicie, 4=Barranca, 5=Meseta, 6=Ladera, 7=Lomerío, 8=Bajo	No aplica

Campo	Descripción del Campo	Atributos	Unidades
Tipo_Veg_Campo	Tipo de vegetación levantada en campo de acuerdo con el INEGI	Categorico	No aplica
Tipo_Veg_Asignada	Tipo de vegetación definida en gabinete de acuerdo con el INEGI	Categorico	No aplica
Clase Prec	Clases de precipitación	Categorico: 1=0-200, 2=201-400, 3=401-600, 4=601-800, 5=801-1 000, 6=1 001-1 200, 7=1 201-1 400, 8=1 401-1 600, 9=1 601-1 800, 10=1 801-2 000, 11=2 001-2 200, 12=2 201-2 400, 13=2 401-2 600, 14=2 601-2 800, 15=2 801-3 000, 16=>3 000	No aplica
B_Aerea	Biomasa aérea (viva y muerta) del sitio	Numérico	Mg M.S. ha ⁻¹
Porciento_Arboreo	Porcentaje de B_Aerea que corresponde a vegetación arbórea	Numérico	%
Porciento_Arbustivo	Porcentaje de B_Aerea que corresponde a vegetación arbustiva	Numérico	%
Porciento_Replado	Porcentaje de B_Aerea que corresponde a vegetación del replado	Numérico	%
B_Subterranea	Biomasa subterránea (viva y muerta) del sitio	Numérico	Mg M.S. ha ⁻¹
B_Total	Biomasa (viva y muerta) total (aérea y subterránea) del sitio	Numérico	Mg M.S. ha ⁻¹

La clasificación de la vegetación del INEGI (1997) utiliza el concepto de sucesión en dos vertientes: primaria (sin intervención antropogénica) y secundaria (con intervención antropogénica). En el caso de la vegetación secundaria se reconocen tres fases o estadios (Cuadro 5), en función de la predominancia del estrato

herbáceo, arbustivo o arbóreo. En las estimaciones de biomasa de la base de datos a nivel de sitios, se utilizó solo la fase vegetación secundaria (degradada) en forma general, sin distinguir la predominancia de algún estrato de la vegetación.

Cuadro 5. Fases de la vegetación secundaria.

Degradación/Sucesión	Clave
Secundaria herbácea	VSh
Secundaria arbustiva	VSa
Secundaria arbórea	VSA
General (VSh, VSa, VSA)	VS

La cantidad de sitios por tipo de vegetación se muestra en el Cuadro 6, en donde hay casos de tipos de vegetación con pocos o ningún sitio, por lo que su representación espacial es relativamente pobre a escala

de país. El número de conglomerados con información es de 21 989 y la cantidad de sitios es 81 648, con 117 sitios sin tipo de vegetación identificada.

Cuadro 6. Número de sitios por tipo de vegetación y sucesión/degradación *sensu* INEGI.

Clase INEGI	Tipo de Vegetación	Degradación/Sucesión	No. Sitios
BA	Bosque de Oyamel	Primaria	178
BA/VS	Bosque de Oyamel	Secundaria	71
BB	Bosque de Cedro	Primaria	20
BB/VS	Bosque de Cedro	Secundaria	8
BJ	Bosque de Táscate	Primaria	281
BJ/VS	Bosque de Táscate	Secundaria	202
BM	Bosque Mesófilo de Montaña	Primaria	731
BM/VS	Bosque Mesófilo de Montaña	Secundaria	933
BP	Bosque de Pino	Primaria	3705
BP/VS	Bosque de Pino	Secundaria	2109
BPQ	Bosque de Pino-Encino	Primaria	7535
BPQ/VS	Bosque de Pino-Encino	Secundaria	2956
BQ	Bosque de Encino	Primaria	8970
BQ/VS	Bosque de Encino	Secundaria	7706
BQP	Bosque de Encino-Pino	Primaria	4846
BQP/VS	Bosque de Encino-Pino	Secundaria	2172
BS	Bosque de Ayarín	Primaria	20
BS/VS	Bosque de Ayarín	Secundaria	17
SAP	Selva Alta Perennifolia	Primaria	800
SAP/VS	Selva Alta Perennifolia	Secundaria	2437
SAQ	Selva Alta Subperennifolia	Primaria	59
SAQ/VS	Selva Alta Subperennifolia	Secundaria	154
SBC	Selva Baja Caducifolia	Primaria	3712
SBC/VS	Selva Baja Caducifolia	Secundaria	2751
SBK	Selva Baja Espinosa Caducifolia	Primaria	106

Clase INEGI	Tipo de Vegetación	Degradación/Sucesión	No. Sitios
SBK/VS	Selva Baja Espinosa Caducifolia	Secundaria	161
SBP/VS	Selva Baja Perennifolia	Secundaria	3
SBQ	Selva Baja Subperennifolia	Primaria	246
SBQ/VS	Selva Baja Subperennifolia	Secundaria	315
SBS	Selva Baja Subcaducifolia	Primaria	28
SBS/VS	Selva Baja Subcaducifolia	Secundaria	56
SMC	Selva Mediana Caducifolia	Primaria	9
SMC/VS	Selva Mediana Caducifolia	Secundaria	31
SMQ	Selva Mediana Subperennifolia	Primaria	2467
SMQ/VS	Selva Mediana Subperennifolia	Secundaria	5914
SMS	Selva Mediana Subcaducifolia	Primaria	809
SMS/VS	Selva Mediana Subcaducifolia	Secundaria	5659
MC	Matorral Crasicaule	Primaria	99
MC/VS	Matorral Crasicaule	Secundaria	20
MDM	Matorral Desértico Micrófilo	Primaria	1841
MDM/VS	Matorral Desértico Micrófilo	Secundaria	204
MDR	Matorral Desértico Rosetófilo	Primaria	906
MDR/VS	Matorral Desértico Rosetófilo	Secundaria	48
MET	Matorral Espinoso Tamaulipeco	Primaria	954
MET/VS	Matorral Espinoso Tamaulipeco	Secundaria	332
MK	Mezquital	Primaria	92
MK/VS	Mezquital	Secundaria	12
MKE	Mezquital Tropical	Primaria	36
MKE/VS	Mezquital Tropical	Secundaria	9
MKX	Mezquital Xerófilo	Primaria	734
MKX/VS	Mezquital Xerófilo	Secundaria	124
ML	Chaparral	Primaria	576
ML/VS	Chaparral	Secundaria	16
MRC	Matorral Rosetófilo Costero	Primaria	55
MRC/VS	Matorral Rosetófilo Costero	Secundaria	8
MSC	Matorral Sarcocaula	Primaria	1747
MSC/VS	Matorral Sarcocaula	Secundaria	24
MSCC	Matorral Sarco-Crasicaule	Primaria	735
MSCC/VS	Matorral Sarco-Crasicaule	Secundaria	17
MSM	Matorral Submontano	Primaria	823

Continuación Cuadro 6...

Clase INEGI	Tipo de Vegetación	Degradación/Sucesión	No. Sitios
MSM/VS	Matorral Submontano	Secundaria	157
MSN	Matorral Sarco-Crasicaule de Neblina	Primaria	220
MST	Matorral Subtropical	Primaria	325
MST/VS	Matorral Subtropical	Secundaria	94
BC	Bosque Cultivado	Primaria	34
BI	Bosque Inducido	Primaria	9
PI	Pastizal Inducido	No Aplica	472
PN	Pastizal Natural	Primaria	118
PN/VS	Pastizal Natural	Secundaria	108
PH	Pastizal Halófilo	Primaria	5
PY	Pastizal Gipsófilo	Primaria	4
PT	Vegetación de Petén	Primaria	3
VG	Vegetación de Galería	Primaria	149
BG	Bosque de Galería	Primaria	12
SG	Selva de Galería	Primaria	1
VA	Popal	No Aplica	18
VT	Tular	No Aplica	302
VH	Vegetación Halófila	Primaria	244
VH/VS	Vegetación Halófila	Secundaria	24
VHH	Vegetación Halófila Hidrófila	Primaria	49
VM	Manglar	Primaria	842
VM/VS	Manglar	Secundaria	80
VPI	Palmar Inducido	No Aplica	57
VPN	Palmar Natural	Primaria	19
VPN/VS	Palmar Natural	Secundaria	4
VS	Sabana	Primaria	2
VD	Vegetación de Desiertos Arenosos	Primaria	197
VU	Vegetación de Dunas Costeras	Primaria	11
VY	Vegetación Gipsófila	Primaria	4
A	Agrícola	No Aplica	331
ACUI	Acuícola	No Aplica	1
DV	Sin Vegetación Aparente	No Aplica	12
H2O	Cuerpos de Agua	No Aplica	29
AH	Asentamientos Humanos	No Aplica	5
-999	No Definida	No Definida	117

DISCUSIÓN

La base de datos con estimaciones de la biomasa (materia seca) a nivel de sitios de los conglomerados del INFyS permite realizar cálculos de los almacenes (vivo y muerto) aéreo y subterráneo de la vegetación a escala nacional, por lo que ha sido previamente utilizada en el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI) de la cuarta comunicación ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (de Jong *et al.*, 2009b), con estimaciones de incertidumbre usando el nivel 1 (*tier 1*) del IPCC (2003).

Aun cuando el número de ecuaciones alométricas es relativamente bajo, las nuevas ecuaciones alométricas incorporadas a la base (Rojas-García *et al.*, 2015) no mejoran, significativamente, las estimaciones, por lo que los resultados obtenidos con la base alométrica original pueden utilizarse en forma confiable.

CONCLUSIONES

La base de datos de estimaciones de la biomasa aérea y subterránea viva y muerta, usando ecuaciones alométricas específicas y generales permite aproximar el inventario nacional de los almacenes de la vegetación en los distintos ecosistemas de México donde hay sitios de muestreo.

Los factores de emisión (densidades de carbono) asociados a los diferentes tipos de vegetación, en forma espacialmente explícita, permitirán realizar análisis de la distribución de los almacenes de carbono de los ecosistemas terrestres en las diferentes regiones geográficas del país.

La incorporación del resto de los almacenes de carbono del IPCC (2006), tales como el material leñoso caído (cama de combustibles), mantillo y suelo requiere de información complementaria no incluida originalmente en el INFyS del ciclo 2004-2007, pero que a partir del 2009 se consideró para el ciclo 2009-2014 (CONAFOR, 2009). Su inclusión en la base de datos generada permitirá tener una visión completa de la distribución del carbono en todos los almacenes de los ecosistemas terrestres.

BASE DE DATOS

En seguimiento a la política del Programa Mexicano del Carbono de libre acceso a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones,

así como en soporte de las síntesis nacionales del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres y acuáticos, la base de datos de este trabajo está disponible en http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/.

LITERATURA CITADA

- Ayala-López, R. S. 1998. Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la meseta central de Chiapas. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. 70 p.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass change of tropical forests, a primer. Forest Resources Assessment Publication. Forestry Papers 134. FAO. Rome 134 p.
- Brown, S., A. J. R. Gillespie and A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35:881-902.
- Cairns, M. A., I. Olmsted, J. Granados and J. Argaez. 2003. Composition and aboveground tree biomass of a dry semi-evergreen forest on Mexico's Yucatan Peninsula. *Forest Ecology and Management* 186:125-132.
- Carré, F., R. Hiederer, V. Blujdea and R. Koeble. 2010. Background guide for the calculation of land carbon stocks in the biofuels sustainability scheme drawing on the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. EUR 24573 EN. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg. 109 p.
- Case, B. S. and R. J. Hall. 2008. Assessing prediction errors of generalized tree biomass and volume equations for the boreal forest of west-central Canada. *Can. J. For. Res.* 38:878-889.
- Chave, J., C. Andalo, S. Brown, M. A. Cairns, J. Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J. P. Lescure, B. W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riéra and T. Yamakura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145:87-99.
- Chave, J., M. Réjou-Méchain, A. Búrquez, E. Chidumayo, M. S. Colgan, W. B. C. Delitti, A. Duque, T. Eid, P. M. Fearnside, R. S. Goodman, M. Henry, A. Martínez-Yrizar, W. A. Mugasha, H. C. Muller-Landau, M. Mencuccini, B. W. Nelson, A. Ngomanda, E. M. Nogueira, E. Ortiz-Maavassi, R. Péli-sier, P. Ploton, C. M. Ryan, J. G. Saldarriaga and G. Vieilledent. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology* 20:3177-3190.
- Chave, J., R. Condit, S. Aguilar, A. Hernandez, S. Lao and R. Perez. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 35:409-420
- CONAFOR. 2004. Manual y Procedimientos para el Muestreo de Campo. Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2004-2009. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, Jalisco, México 97 p.

- CONAFOR. 2009. Manual y Procedimientos para el Muestreo de Campo (Re-Muestreo 2009). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, Jalisco, México 140 p.
- de Jong, B., C. Anaya, O. Maser, M. Olguin, F. Paz, J. Etchevers, R. Martínez, G. Guerrero and C. Balbontin. 2010. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecology and Management* 260:1689-1701.
- de Jong, B. H. J., M. Olguin, F. Rojas, V. Maldonado, V. de la Cruz y F. Leyva. 2009a. Informe del mapa de contenido de biomasa leñosa por hectárea año 2007. Informe preparado para CONAFOR. 15 p.
- de Jong, B., M. Olguin, F. Rojas, V. Maldonado, F. Paz, J. Etchevers, C.O. Cruz y J. A. Argumedo. 2009b. Inventario nacional de emisiones de gases invernadero 1990-2006. Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura. Reporte preparado para el Instituto Nacional de Ecología. D.F., México 119 p.
- de Jong, B., O. Maser, R. D. Martínez, F. Paz, M. Olguin, C. Anaya, C. Balbontin, M. Motolinia y G. Guerrero. 2006. Inventario nacional de emisiones de gases invernadero 1993-2002. Uso del suelo, cambio de uso del suelo y bosques. Reporte preparado para el Instituto Nacional de Ecología. D.F., México 78 p.
- FAO and ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy.
- Feldpausch, T. R., J. Lloyd, S. L. Lewis, R. J. W. Brienen, M. Gloor, A. Monteagudo M., G. Lopez G., L. Banin, K. Abu S., K. Affum B., M. Alexiades, S. Almeida, I. Amaral, A. Andrade, L. E. O. C. Aragao, A. Araujo M., E. J. M. M. Arets, L. Arroyo, G. A. Aymard C., T. R. Baker, O. S. Bánki, N. J. Berry, N. Cardozo, J. Chave, J. A. Comiskey, E. Alvarez, A. de Oliveira, A. Di Fiore, G. Djangbletey, T. E. Dominguez, T. L. Erwin, P. M. Fearnside, M. B. Franca, M. A. Freitas, N. Higuchi, E. Honorio C., Y. Lida, E. Jiménez, A. R. Kassim, T. J. Killeen, W. F. Laurance, J. C. Lovett, D. J. Metcalfe, E. T. A. Mitchard, D. A. Neill, B. W. Nelson, R. Nilus, E. M. Nogueira, A. Parada, K. S. H. Peh, A. Pena C., M. C. Peñuela, N. C. A. Pitman, A. Prieto, C. A. Quesada, F. Ramírez, H. Ramírez A., J. M. Reitsma, A. Rudas, G. Saiz, R. P. Salomao, M. Schwarz, N. Silva, J. E. Silva E., M. Silveira, B. Sonké, J. Stropp, H. E. Taedoumg, S. Tan, H. Teer S., J. Terborgh, M. Torello R., G. M. F. van der Heijden, R. Vásquez, E. Vilanova, V. A. Vos, L. White, S. Wilcock, H. Woell and O. L. Phillips. 2012. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences* 9:3381-3403.
- Forrester, D. I., I. H. H. Tachauer, P. Annighoefer, I. Barbeito, H. Pretzsch, R. Ruiz P., H. Stark, G. Vacchiano, T. Zlatanov, T. Chakraborty, S. Saha and G. W. Sileshi. 2017. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management* 396:160-175.
- Gayon, J. 2000. History of the concept of allometry. *Amer. Zool.* 40:748-758.
- Genet, A., H. Wernsdörfer, M. Jonard, H. Pretzsch, M. Rauch, Q. Ponette, C. Nys, A. Legout, J. Ranger, P. Vallet and L. Saint-André. 2011. Ontogeny partly explains the apparent heterogeneity of published biomass equations for *Fagus sylvatica* in central Europe. *Forest Ecology and Management* 261:1188-1202.
- Henry, M., N. Picard, C. Trotta, R. Manlay, R. Valentini, M. Bernoux and L. Saint-André. 2011. Estimating tree biomass of Sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. *Silva Fennica* 45:477-569.
- INEGI. 1997. Base de datos geográficos. Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación (vectorial). Escala 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags. 56 p.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. In: Penman, J., M. Gytarsky, T. Hiraiishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe and F. Wagner (eds.). Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. Kanagawa.
- IPCC. 2006. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Eggleston, H. S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- Jenkins, J. C., D. C. Chojnacky, L. S. Heath and R. A. Birdsey. 2003. National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science* 49:12-35.
- Jenkins, J. C., D. C. Chojnacky, L. S. Heath and R. A. Birdsey. 2004. Comprehensive database of diameter-based biomass regressions for North American tree species. General Technical Report NE-319. Northeastern Research Station. USDA Forest Service, Newton Square, PA. 47 p.
- Lambert, M. C., C. H. Ung and F. Raulier. 2005. Canadian national tree aboveground biomass equations. *Can. J. For. Res.* 35:1996-2018.
- Ludwig, J. A., J. F. Reynolds and P. D. Whitso. 1975. Size-biomass relationships of several Chihuahuan desert shrubs. *The American Midland Naturalist* 94:451-461.
- Martínez-Yrizar, A., M. Maass, L. Pérez-Jiménez and J. Sarukhán. 1996. Net primary productivity of a tropical deciduous forest ecosystem in western Mexico. *Journal of Tropical Ecology* 12:169-175.

- Molto, Q., V. Rossi and L. Blanc. 2013. Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution* 4:175-183.
- Muukkonen, P. 2007. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *Eur. J. Forest Res.* 126:157-166.
- Návar, C. J.; N. González y J. Graciano. 2001. Ecuaciones para estimar el rendimiento e incremento de biomasa total en plantaciones forestales de Durango, México. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia– Chile. 13 p.
- Návar, J., J. Ríos-Saucedo, G. Pérez-Verdin, F. de J. Flores and P. Domínguez-Castellanos. 2013. Regional aboveground biomass equations for North American arid and semi-arid forests. *Journal of Arid Environments* 97:127-135.
- Ngomanda, A., N. L. Engone-Obiang, J. Lebamba, Q. Moundounga M., H. Gomat, G. Sidoine Mankou, J. Loumeto, D. Midoko-Iponga., F. Ditsouga, R. Christophe, B. K. Botsika, C. Mikala-Okouyi., R. Nyangadouma, A. Lepengue, B. Mbatchi and N. Picard. 2013. Site-specific versus pantropical allometric equations: which option to estimate the biomass of a moist central African forest? *Forest Ecology and Management*. 312:1-9.
- Nickless, A., R. J. Scholes and S. Archibald. 2011. A method for calculating the variance and confidence intervals for tree biomass estimates obtained from allometric equations. *S. Afr. J. Sci.* 107:1-10.
- Nuno, A., M. Tomé, J. Tomé, P. Soares and L. Fontes. 2007. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Can. J. For. Res.* 37:895-906.
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45:573-593.
- Pastor, J., J. D. Aber and J. M. Melillo. 1984. Biomass prediction using generalized allometric regressions for some north east tree species. *Forest Ecology and Management* 7:265-274.
- Paul, K. I., S.H. Roxburgh, J. Chave, J. R. England, A. Zerihun, A. Specht, T. Lewis, L. T. Bennet, T. G. Baker, M. A. Adams, D. Hustable, K. D. Montagu, D. S. Falster, M. Feller, S. Sochacki, P. Ritson, G. Bastin, J. Bartle, D. Wildy, T. Hobbs, J. Larmour, R. Waterworth, H. T. L. Stewart, J. Jonson, D. A. O'Grady, D. Green, R. Sudmeyer, S. J. Rance, J. Turner, C. Barton, E. H. Wenk, T. Grove, P. M. Attiwill, E. Pinkard, D. Butler, K. Broodsbank, B. Spencer, P. Snowdon, N. O'Brien, M. Battaglia, D. M. Cameron, S. Hamilton, G. Mcauthur and J. Sinclair. 2016. Testing the generality of above-ground biomass allometry across plant functional types at the continental scale. *Global Change Biology* 22:2106-2124.
- Pelletier, J., K. Kirby and C. Potvin. 2010. Significance of carbon stock uncertainties on emission reductions from deforestation and forest degradation in developing countries. *Forest Policy and Economics* 24. DOI: 10.1016/j.forpol.2010.05.005.
- Peterson, H. S. Holm, G. Stahl, D. Alger, J. Fridman, A. Lehtonen and A. Makipaa. 2012. Individual tree biomass equations of biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. *Forest Ecology and Management* 270:78-84.
- Picard, N., F. Boyemba B. and V. Rossi. 2015. Reducing the error in biomass estimates strongly depends on model selection. *Annals of Forest Science* 72:811-823.
- Picard, N., M. Henry, F. Mortier, C. Trotta and L. Saint-Andre. 2012. Using Bayesian model averaging to predict tree aboveground biomass in tropical moist forests. *Forest Science* 58:15-23.
- Rojas-García, F., B. H. de Jong, P. Martínez-Zurimendi and F. Paz-Pellat. 2015. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science* 72:835-864.
- Ruesch, A. and H. Gibbs. 2008. New global biomass carbon map for the year 2000 based on IPCC tier-1 methodology. Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, TN. USA.
- SARH. 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. D.F., México. 81 p.
- Sileshi, G. W. 2014. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management* 329:237-254.
- Temesgen, H. D. Affleck, K. Poudel, A. Gray and J. Sessions. 2015. A review of the challenges and opportunities in estimating above ground forest biomass using tree-level models. *Scandinavian Journal of Forest Research* 30:326-335.
- Terk-Mikaelian, M. T. and M. D. Korzukhin. 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97:1-24.
- van Breugel, M., J. Ransijn, D. Craven, F. Bongers and J. S. Hall. 2001. Estimating carbon stock in secondary forests: decisions and uncertainty associated with allometric biomass models. *Forest Ecology and Management* 262:1648-1657.
- Vargas-Larreta, B., C. A. López-Sánchez, J. J. Corral-Rivas, J. O. López-Martínez, C. G. Aguirre-Calderón and J. G. Álvarez-González. 2017. Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western Mexico. *Forests* 8. DOI: 10.3390/f8080269.
- Wutzler, T., C. Wirth and J. Schumacher. 2008. Generic biomass functions for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Central Europe – predictions and components of uncertainty. *C. J. For. Res.* 38:1661-1675.