

CARBONO CAPTURADO Y ACUMULACIÓN DE BIOMASA EN CINCO ESPECIES LEÑOSAS NATIVAS DE LA CORDILLERA ORIENTAL, UTILIZADAS EN PROGRAMAS DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN LA SABANA DE BOGOTÁ.

CARBON CAPTURE AND BIOMASS ACCUMULATION IN FIVE WOODY NATIVE SPECIES OF THE EASTERN MOUNTAIN RANGE USED IN ECOLOGICAL RESTORATION PROGRAMS IN THE SAVANNA OF BOGOTA

Omar Melo^{1*}; Nathaly Rodríguez²; Ferney Rojas³.

¹ Departamento de Ciencias Forestales, Universidad del Tolima omelo@ut.edu.co

² Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima. natha@hotmail.com

³ Corporación Ambiental Empresarial CAEM, Cámara de Comercio de Bogota.dtecnicofojasverdes@ccb.org.co

Recibido: Agosto 16 de 2010

Aceptado: Marzo 7 de 2011

*Correspondencia del autor. Departamento de Ciencias Forestales, Universidad del Tolima, Grupo de investigación en Biodiversidad y Dinámica de Ecosistemas Tropicales. E-mail: omelo@ut.edu.co

RESUMEN

La investigación se realizó en áreas de restauración ecológica ubicadas en el Parque La Poma, municipio de Soacha, Cundinamarca, cuya zona de vida se clasifica como Bosque Seco Montano Bajo (Bs-Mb), con precipitaciones inferiores a 600 mm.año⁻¹, generando un entorno ambiental crítico para la vegetación, principalmente por las bajas temperaturas que generan heladas recurrentes. Se cuantificó el carbono capturado, su distribución diferencial en los compartimentos funcionales (hojas, ramas, raíces y fuste) de los individuos de cinco especies leñosas (*Dodonaea viscosa*, *Abatiaparviflora*, *Escalloniapaniculata*, *Baccharismacrantha* y *Quecus-humboldtii*). Se evaluaron 100 individuos por especies distribuidos en cinco categorías de edad comprendidas entre 1 y 10 años. Para cada clase de edad se seleccionó un individuo modelo con base en el método de árbol promedio, el cual se evaluó en pie, se cosechó, se cuantificó la biomasa fresca por compartimento y a nivel de laboratorio se determinó el contenido de materia seca y la fracción de carbono por compartimento funcional. Se generaron modelos alométricos para la acumulación de biomasa, modelos de acumulación de carbono total por especie y modelos de distribución de carbono por compartimento funcional. Como resultado se obtuvo que para un horizonte de 14 años la especie *Dodonaea viscosa*, puede acumular hasta 8,36 tc.ha⁻¹año⁻¹ mientras que *Baccharismacrantha*, solo alcanza 1,57 tc.ha⁻¹año⁻¹. Se concluye que bajo este entorno ambiental crítico estas especies muestran mayor adaptabilidad y eficiencia en el proceso de restauración del carbono, por lo cual se consideran como de alto valor para la mitigación del clima cambiante.

PALABRAS CLAVE. Acumulación de biomasa, captura de carbono, especies leñosas andinas, restauración ecológica, cambio climático global.

ABSTRACT

This research was carried out in ecological restoration areas located in La Poma Park, municipality of Soacha, Cundinamarca. Its life zone classification is Lower Montane Dry Forest (Bs-Mb). The annual rainfall is less than 600 mm, generating a critical environmental setting for vegetation, mainly by low temperatures that generate constant frosting. Carbon sequestered was quantified. Furthermore, the differential distribution in the functional compartments (leaves, branches, roots and stem) of individuals of five woody species (*Dodonaeaviscosa*, *Abatiaparviflora*, *Escalloniapaniculata*, *Baccharismacrantha* and *Quecushumboldtii*) was calculated. One hundred individuals were evaluated by species distributed in five age groups from 1 to 10 years. For each age class, one individual model was selected on basis of the average tree method, which was evaluated in standing, and harvested. In the laboratory, fresh biomass was quantified by compartment, and the dry matter content and the fraction carbon functional compartment were determined. Allometric models for the accumulation of biomass, carbon accumulation models by species and total carbon allocation models for functional compartment were generated. The results obtained shows that for a 14-year horizon, *Dodonaeaviscosa* species can accumulate up to 8,36 tc.ha⁻¹year⁻¹, while *Baccharismacrantha*, only reaches 1,57 tc.ha⁻¹year⁻¹. It is concluded that under this critical environmental conditions, these species show greater adaptability and efficiency in the process of carbon restoration; that is why they are considered highly valued for the changing climate mitigation.

KEY WORDS: Accumulation of biomass, carbon sequestration, Andean woody species, ecological restoration, global climate change.

INTRODUCCIÓN

Las actividades antrópicas relacionadas con el desarrollo industrial, el uso de la tierra y la deforestación, han incrementado muy significativamente las emisiones de gases efecto invernadero, en los últimos 100 años y en particular el gas carbónico de 280 a 375 ppm, lo que ha generado un aumento de la temperatura en el planeta y han conducido a un cambio climático global acelerado(1).

De los organismos vivos que habitan el planeta, las plantas son quizá el grupo de seres vivos con mayor capacidad de adaptación, de tal manera que pueden sobrevivir y evolucionar en climas y entornos ambientales críticos. La función de las plantas como organismos autótrofos, ha permitido su utilización como mitigadores del cambio climático global, a partir de la captura del CO₂ atmosférico que ellas realizan, con el propósito de disminuir las concentraciones de este gas (2).

Las plantas leñosas y en particular los árboles son los que más tiempo retienen el carbono capturado y por consiguiente, los más utilizados en programas forestales que involucran mecanismos de desarrollo limpio

(MDL) para tal fin, sin embargo, las plantas leñosas arbustivas, que presentan mayor posibilidad de adaptación a climas adversos, son igualmente captadoras de carbono, pero en la actualidad se desconoce o se dispone de muy poca información sobre este proceso ecofisiológico dentro de este grupo, lo que ha limitado su valor de uso para tal fin (3).

De ahí la importancia que han adquirido últimamente los estudios ecofisiológicos, que permiten evaluar el comportamiento de las plantas, su desarrollo y crecimiento, puesto que es el CO₂, es el insumo principal que utilizan estos organismos para su funcionamiento, el cual es capturado de la atmósfera y transformado en biomasa. De esta manera el monitoreo de carbono a través de los bosques y las plantaciones, como sumideros del mismo, son esenciales para contribuir con algunas soluciones ante este problema mundial (4).

Existen diversas metodologías que permiten cuantificar el carbono capturado por las especies en un bosque determinado, estas metodologías permiten obtener una realidad del carbono capturado por medio de modelos alométricos de biomasa. Una herramienta esencial que permite estimar la biomasa de cada compartimento del

árbol son los modelos alométricos de biomasa, los cuales por medio de otros análisis en laboratorio arrojan con gran aproximación la capacidad de carbono fijado en una especie, para determinada edad y en un entorno ambiental particular (5). Debido a que una forma de mitigar los problemas generados por el aumento del CO₂ atmosférico, además de reducir las emisiones, es capturarlo y mantenerlo en la biomasa; es importante aclarar que el primero se logra a través de la fotosíntesis y el segundo a través de la descomposición y mineralización de la materia orgánica (6).

Para el caso del Parque Ecológico La Poma, que se encuentra ubicado en áreas de bosque seco alto andino, en la sabana de Bogotá y que frecuentemente es afectado por fuertes heladas, se ha logrado establecer exitosamente un programa de restauración ecológica, con especies leñosas principalmente de tipo arbustivo que se caracterizan por ser nativas de la cordillera oriental. Estas poblaciones se encuentran acumulando biomasa y aportando materia orgánica al suelo por más de 10 años, como servicio ambiental anexo a la misma restauración de las coberturas. Por lo anterior se ha propuesto este trabajo que tiene como propósito la cuantificación del carbono capturado por cuatro especies arbustivas y una especie arbórea, que en conjunto revisten la mayor importancia dentro de este programa, de tal manera que se pueda determinar la distribución del carbono por compartimento funcional y la tasa de acumulación anual que expresa el crecimiento fisiológico, en comparación con las especies arbóreas. La captura de carbono de las especies forestales de interés para el Parque Ecológico La Poma, permite dar a conocer cuánto carbono hay capturado en una especie a una edad determinada, creando de esta manera un incentivo a las empresas cuyas emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero son altos (7).

De acuerdo con lo anterior, queda claro, que a pesar que las plantas leñosas de tipo arbustivo, por su arquitectura poseen un patrón diferencial en la acumulación y distribución de la biomasa, en sus compartimentos funcionales, son igualmente eficientes en la captura de carbono al igual que los árboles, lo que las convierte en especies potencialmente utilizables para este tipo de función ecológica, mas aun en ambientes con restricciones, para el óptimo crecimiento del componente forestal arbóreo, donde ellas tienen mejor adaptación. Por lo anterior se hizo necesario la generación de conocimiento, sobre aspectos ecofisiológicos de este grupo de plantas, para permitir su utilización en programas para tal fin(7).

MATERIALES Y MÉTODOS

Determinación de la distribución y acumulación de biomasa, para los diferentes compartimentos funcionales de las especies.

Para la determinación de distribución y acumulación de la biomasa en las cinco especies evaluadas, se diseñaron tanto los protocolos de campo, así como de laboratorio con base en los métodos estandarizados propuestos por (5,8).

Evaluación precosecha de individuos. Para determinar la población de trabajo, se realizó una distribución de alturas totales, expresadas en m. con aproximación al centímetro (medidas con vara graduada), respecto a la edad expresada en años, para las cinco especies objeto de estudio. Para cada especie, se evaluó un total de 100 individuos, agrupados en 5 categorías de edad, que variaron entre 1 y 10 años. Cada categoría de edad se constituyó de 20 individuos, cuyo valor promedio, representó al árbol modelo por clase de edad (Tabla 1). Este árbol modelo, se ubicó en campo, revisando los diferentes sectores del Parque Ecológico La Poma. Para cada árbol modelo, se evaluaron en pie todas las variables dasométricas: diámetro normal (DN) en cm, Altura total (HT) en m, altura del fuste limpio (HFL) en m, altura de copa (HC) en m, diámetros de copa (DC) en m, diámetro en la base del fuste (DBF) en cm. Posteriormente, se realizó el aprovechamiento del individuo y una vez apeado, se midió la longitud del árbol (L) en m, diámetro en la base del tocón (DBT) en cm, diámetro a la longitud media del fuste (DMF) en cm, diámetro en la base de la copa (DBC) en cm, la altura de tocón (HBT) en m y diámetro medio del tocón (DMT) en cm.

Evaluación post-cosecha de individuos. Una vez seleccionado y evaluado en pie, el árbol modelo a cosechar, se ubicó la dirección de caída más conveniente, que generara el menor daño posible del individuo y de la remanencia de la plantación. Se limpió el lugar donde caería el individuo con el propósito de adecuar el sitio de trabajo. Se seleccionó el punto de pesaje cerca al árbol caído y se realizó la evaluación de los pesos frescos de la biomasa, por compartimento funcional. Una vez apeado el árbol, se realizó su desrame con sierra de mano, preparando el fuste limpio para su marcación y medición. El fuste limpio, se seccionó para facilitar su pesaje y a cada sección se le midió el diámetro en los extremos, con sus respectivos espesores de corteza,

Tabla 1. Distribución de las alturas totales medidas en m, de los árboles modelos, para determinación de biomasa y cuantificación de carbono, por clase de edad, en el Parque Ecológico La Poma. Total árboles evaluados por especie: 100. Total árboles evaluados por clase de edad: 20.

ESPECIES	ALTURA PROMEDIO (m) POR CLASE DE EDAD (años)				
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10
<i>Dodonaea viscosa</i>	1.95	2.14	2.53	3.25	4.11
<i>Abatia parviflora</i>	1.67	1.93	2.61	4.24	4.85
<i>Escallonia paniculata</i>	1.43	2.05	2.52	3.34	3.82
<i>Quercus humboldtii</i>	1.57	2.01	3.54	4.87	5.34
<i>Baccharis macrantha</i>	1.22	1.77	2.05	2.79	3.15



se enumeraron y marcaron con la cinta de enmascarar, ordenándolas de menor a mayor tamaño, para controlar el pesaje. Las secciones del fuste, se pesaron individualmente y se registraron cada una de ellas en la planilla de pesaje de acuerdo con el orden de marcación.

Las hojas se desprendieron de las ramas, se pesaron y posteriormente se empacaron en una bolsa plástica, las cuales se sellaron y transportaron en bolsas de poliuretano de color negro, para su desplazamiento al laboratorio de Ciencias Forestales de la Universidad del Tolima. Las flores y frutos (si el individuo presentaba), se pesaron en campo y se empacaron separadamente para su traslado al laboratorio.

Las ramas se clasificaron y separaron como gruesas cuando tuvieron más de 3 cm de diámetro y delgadas o ramillas, con valores inferiores al mencionado. Dichos componentes se agruparon y pesaron separadamente, además, las muestras de cada compartimento funcional se seleccionaron y transportaron al laboratorio, para su posterior evaluación.

Una vez, evaluado la totalidad del componente aéreo del individuo (fuste, ramas, ramillas, hojas, flores y frutos), se procedió a la evaluación de la biomasa subterránea. Para esto se ubicó la distribución de la rizósfera en el suelo, realizando excavaciones en forma radial desde el tocón, hasta la zona de cubrimiento de la copa del individuo. Una vez ubicada una raíz gruesa, se realizó su seguimiento hasta la terminación de la misma, la cual fue separada y cosechada del tocón. Junto con las raíces gruesas, se cosecharon las raíces finas. Una vez extraído del suelo la mayor parte de la rizósfera de

los individuos, se procedió a la extracción del tocón. Al igual que con las ramas, la raíz se dividió en componentes subterráneos, tales como raíces gruesas, raíces finas y tocón. A los que se le registró su peso en campo y se colectaron las respectivas muestras, para su evaluación a nivel de laboratorio.

Finalmente, las muestras de cada árbol, se constituyeron en un conjunto debidamente marcado, identificado y etiquetado como una unidad, se empacaron en las bolsas de poliuretano y se remitieron en el menor tiempo posible al laboratorio de Ciencias Forestales, de la Universidad del Tolima, para la continuidad del proceso de investigación.

Evaluación en laboratorio. Una vez ubicadas las muestras, en el laboratorio de Ciencias Forestales, de la Universidad del Tolima, se procedió a determinar los parámetros de biomasa para cada una de las especies objeto de evaluación. Se determinó el peso fresco (Wf) en gramos de los compartimentos tanto aéreos como subterráneos, de los individuos, utilizando una balanza de precisión 0,0000 gr. Posteriormente, se llevaron al horno a una temperatura de 80°C, hasta estabilizar la curva de pérdida de humedad, lo cual sucedió en promedio a las 72 horas. Seguidamente, se determinó el peso seco al horno (Wd) por compartimento. Posteriormente, se separaron sub-muestras de 100 gr de cada compartimento funcional, para cada uno de los individuos de las especies, para luego realizar los respectivos análisis de carbono, en el Laboratorio LASEREX del departamento de Química, de la Universidad del Tolima.

Cuantificación del carbono capturado para cada una de las especies objeto de estudio.

Para la determinación del carbono orgánico para los diferentes compartimentos funcionales de las especies evaluadas, se realizaron análisis químicos para submuestras de 100 gr. de materia seca, utilizando la metodología de Walkley y Black, cuyos protocolos han sido estandarizados por el laboratorio LASEREX del departamento de Química de la Universidad del Tolima, donde fueron realizadas las pruebas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinación de la distribución y acumulación de biomasa para los diferentes compartimentos funcionales de las especies.

Modelos alométricos de biomasa por especie y por compartimentos funcionales.

- **Altura total en m., por edad y por especie.** La tabla 2, muestra los modelos alométricos que relacionan la altura total medida en metros, en función de la edad registrada en años, para las cinco especies objeto de estudio. Igualmente, la misma tabla muestra el coeficiente de correlación expresado en porcentaje y el error estándar registrado para los modelos. En generar todos los modelos elaborados presentan ajustes que superan el 95% y los valores del error estándar son mínimos. Igualmente los modelos matemáticos utilizados para las diferentes especies son en su mayoría de tipo polinomial, excepto *Q. humboldtii*, cuyo mayor ajuste lo presentó bajo un modelo lineal convencional, este tipo de modelo fue utilizado, puesto que en las etapas iniciales

de crecimiento de los árboles forestales, su crecimiento es de tipo lineal, tal como sucede con esta especie.

- **Modelos alométricos por componente por especie.** En las tablas 3, 4, 5, 6 y 7, se muestran los modelos alométricos que relacionan la biomasa por tipo de compartimento funcional (hojas, ramas, raíz y fuste), expresada como gramos de materia seca, en relación con la altura total de los individuos, medida en m. y su diámetro de copa, medido en m. Igualmente, se muestran los coeficientes de determinación expresados en porcentaje y una prueba de uniformización de varianzas, por el método de Durwin & Watson.

- **Modelos alométricos de acumulación de biomasa por especie y por edad.** Los modelos de acumulación de biomasa construidos para las cinco especies objeto de evaluación, expresan el total del peso de la materia seca (gr), sumando los diferentes compartimentos de los individuos, tanto aéreos como subterráneos, en función de la edad expresada en años. Igualmente, la misma tabla muestra los coeficientes de correlación expresados en % y la respectiva prueba de uniformización de varianzas de Durwin & Watson (Tabla 8).

La acumulación de biomasa expresada en gramos de materia seca por especie, en función de la edad de los individuos, expresada en años, se aprecia en la figura 1. La especie *Dodonaea viscosa*, es la que acumula más biomasa, durante el periodo evaluado, que tiene un horizonte de 10 años. A este tiempo el individuo promedio de *D. viscosa*, en esta clase de edad, acumula cerca de 16000 gr. de materia seca. En contraste, Los individuos de *Baccharismacrantha*, tan solo acumulan cerca de 4000 gramos de materia seca, bajo las mismas

Tabla 2. Modelos alométricos para la variación de la altura total medida en m, en función de la edad medida en años, para cinco especies leñosas, utilizadas en el programa de restauración, del Parque Ecológico La Poma, en la sabana de Bogotá.

ESPECIES	Altura total (m) x Edad (años)	R2	Error estándar
<i>Dodonaea viscosa</i>	$htDv = 2,002 - 0,0863571 * age + 0,0298214 * age^2$	99,94	0,0301
<i>Abatia parviflora</i>	$htAp = 1,284 + 0,0799286 * age + 0,0294643 * age^2$	96,29	0,3851
<i>Escallonia paniculata</i>	$htEp = 0,846 + 0,2885 * age + 0,00125 * age^2$	99,36	0,1091
<i>Quercus humboldtii</i>	$htQh = 0,346 + 0,52 * age$	98,26	0,3593
<i>Baccharis macrantha</i>	$htBm = 0,772 + 0,226857 * age + 0,00142857 * age^2$	98,45	0,1349

Tabla 3. Biomasa total por compartimento (hojas, ramas, raíz, fuste), expresada en gramos, en función de la altura total y el diámetro de copa, expresados en m. para la especie *Dodonaea viscosa*, utilizada en el programa de restauración, del Parque Ecológico La Poma, en la sabana de Bogotá

<i>Dodonaea viscosa</i>			
RELACION ALOMÉTRICA	MODELO	R2	D. W.
Altura total x peso seco hojas	$DWLDv = 5911,73 - 5102,78 * HTDv + 1150,6 * HTDv^2$	99,69	2,41
Altura total x peso seco ramas	$DWBDv = -40566,5 + 27456,7 * HTDv - 3741,68 * HTDv^2$	72,89	2,51
Altura total x peso seco raíz	$DWRDv = -1064,14 + 305,056 * HTDv + 111,508 * HTDv^2$	93,58	2,52
Altura total x peso seco fuste	no		
Altura total x diámetro de copa	$DCDv = 0,957166 - 0,518062 * HTDv + 0,300857 * HTDv^3$	91,77	2,39
Altura total x diámetro de copa x peso seco hojas	$DWLDv = 1536,0 - 1894,66 * DCDv + 688,813 * DCDv^2$	99,68	3,38

Tabla 4. Biomasa total por compartimento (hojas, ramas, raíz, fuste), expresada en gramos, en función de la altura total y el diámetro de copa, expresados en m. para la especie *Abatia parviflora*, utilizada en el programa de restauración, del Parque Ecológico La Poma, en la sabana de Bogotá.

<i>Abatia parviflora</i>			
RELACION ALOMÉTRICA	MODELO	R2	D. W.
Altura total x peso seco hojas	$DWLAp = 1993,88 - 1015,53 * HTAp + 241,778 * HTAp^2$	78,66	3,508
Altura total x peso seco ramas	$DWBAP = -1872,32 + 1283,32 * HTAp + 100,218 * HTAp^2$	98,56	3,44
Altura total x peso seco raíz	$DWRAP = -1211,29 + 1749,06 * HTAp - 175,832 * HTAp^2$	99,58	2,55
Altura total x peso seco fuste	no		
Altura total x diámetro de copa	$DCAp = 0,251669 + 0,5023 * HTAp - 0,0212223 * HTAp^2$	86,043	2,59
Altura total x diámetro de copa x peso seco hojas	$DWLAp = 173,841 - 434,58 * DCAp + 1063,48 * DCAp^2$	95,65	2,54

Tabla 5. Biomasa total por compartimento (hojas, ramas, raíz, fuste), expresada en gramos, en función de la altura total y el diámetro de copa, expresados en m. para la especie *Escallonia paniculata*, utilizada en el programa de restauración, del Parque Ecológico La Poma, en la sabana de Bogotá

<i>Escallonia paniculata</i>			
RELACION ALOMÉTRICA	MODELO	R2	D. W.
Altura total x peso seco hojas	$DWLSp = -1638,51 + 1383,98 * HTSp - 163,15 * HTSp^2$	94,68	2,55
Altura total x peso seco ramas	$DWBSp = -869,333 + 961,308 * HTSp + 29,9778 * HTSp^2$	88,64	2,58
Altura total x peso seco raíz	$DWRSp = -43,3176 + 167,357 * HTSp - 7,53545 * HTSp^2$	93,45	2,59
Altura total x peso seco fuste	no		
Altura total x diámetro de copa	$DCSp = 0,583607 + 0,74881 * HTSp - 0,074739 * HTSp^2$	94,02	3,02
Altura total x diámetro de copa x peso seco hojas	$DWLSp = -2535,44 + 1975,01 * DCSp - 160,09 * DCSp^2$	93,31	3,51

Tabla 6. Biomasa total por compartimento (hojas, ramas, raíz, fuste), expresada en gramos, en función de la altura total y el diámetro de copa, expresados en m. para la especie *Quercushumboldtii*, utilizada en el programa de restauración, del Parque Ecológico La Poma, en la sabana de Bogotá.

<i>Quercus humboldtii</i>				
RELACION ALOMÉTRICA	MODELO	R2	D. W.	
Altura total x peso seco hojas	$DWLQh = 610,009 - 386,615 * HTQh + 99,304 * HTQh^2$	96,94	2,83	
Altura total x peso seco ramas	$DWBQh = 662,594 - 405,821 * HTQh + 102,711 * HTQh^2$	98,24	2,77	
Altura total x peso seco raíz	$DWRQh = -283,194 + 345,588 * HTQh - 5,41166 * HTQh^2$	97,87	2,73	
Altura total x peso seco fuste	$DWPQh = 83,9159 - 36,9443 * HTQh + 22,1669 * HTQh^2$	93,38	3,17	
Altura total x diámetro de copa	$DCQh = 0,4265 + 0,345413 * HTQh + 0,0184021 * HTQh^2$	98,02	2,63	
diámetro de copa x peso seco hojas	$DWLQh = 422,69 - 508,678 * DCQh + 300,503 * DCQh^2$	99,97	3,57	

Tabla 7. Biomasa total por compartimento (hojas, ramas, raíz, fuste), expresada en gramos, en función de la altura total y el diámetro de copa, expresados en m. para la especie *Baccharismacrantha*, utilizada en el programa de restauración, del Parque Ecológico la Poma, en La sabana de Bogotá.

<i>Baccharis macrantha</i>				
RELACION ALOMÉTRICA	MODELO	R2	D. W.	
Altura total x peso seco hojas	$DWLBm = -199,053 + 123,918 * HTBm + 38,6435 * HTBm^2$	97,79	2,61	
Altura total x peso seco ramas	$DWBBm = 200,471 - 528,885 * HTBm + 354,078 * HTBm^2$	99,22	2,64	
Altura total x peso seco raíz	$DWRBm = -168,685 + 154,135 * HTBm + 19,2183 * HTBm^2$	99,93	2,94	
Altura total x peso seco fuste	no			
Altura total x diámetro de copa	$DCBM = -0,0504627 + 0,326061 * HTBm + 0,138278 * HTBm^2$	98,96	3,46	
diámetro de copa x peso seco hojas	$DWLBm = -202,443 + 387,33 * DCBM - 25,6063 * DCBM^2$	97,87	3,01	

Tabla 8. Biomasa total, expresada en gramos de materia seca, en función de la edad (años), para las cinco especies, utilizadas en el programa de restauración, del Parque Ecológico La Poma, en la sabana de Bogotá.

ESPECIES	MODELO	R2	D. W.	
<i>Dodonaea viscosa</i>	$DWTDv = 641,836 - 293,618 * age + 176,811 * age^2$	98,05	3,55	
<i>Abatia parviflora</i>	$DWTAp = 738,742 - 53,9866 * age + 95,9332 * age^2$	99,35	3,44	
<i>Escallonia paniculata</i>	$DWTEp = 299,0 + 14,3334 * age + 43,5507 * age^2$	99,03	3,18	
<i>Quercus humboldtii</i>	$DWTQh = -613,704 + 959,761 * age - 4,36255 * age^2$	96,55	2,61	
<i>Baccharis macrantha</i>	$DWTBm = -891,498 + 655,86 * age - 21,8229 * age^2$	95,53	3,5	

condiciones. *Quercushumboldtii* y *Abatiaparviflora*, tienen un comportamiento similar acumulando entre 9000 y 10000 gr. de materia seca respectivamente. En general, se pueden observar tres grupos de especies, en cuanto a su estrategia de acumulación de materia seca. Las especies que lo hacen en forma lenta (*Escallonia paniculada* y *Baccharismacrantha*), las especies que acumulan materia seca moderadamente (*Quercushumboldtii* y *Abatiaparviflora*) y finalmente las que acumulan materia seca aceleradamente (*Dodonaea viscosa*).

Factores de conversión para biomasa seca, por componente y por especie.

En la tabla 9, se muestran los factores de conversión de peso fresco a materia seca, para los compartimentos funcionales, hojas, flores, frutos, ramas, ramillas, raíces gruesas, raíces delgadas y tocón, para las cinco especies objeto de estudio. En cuanto al compartimento de hojas *Q. humboldtii*, es la especie que presenta la mayor relación para la materia seca superando el 78%. Para las flores y frutos, en el momento de los muestreos en

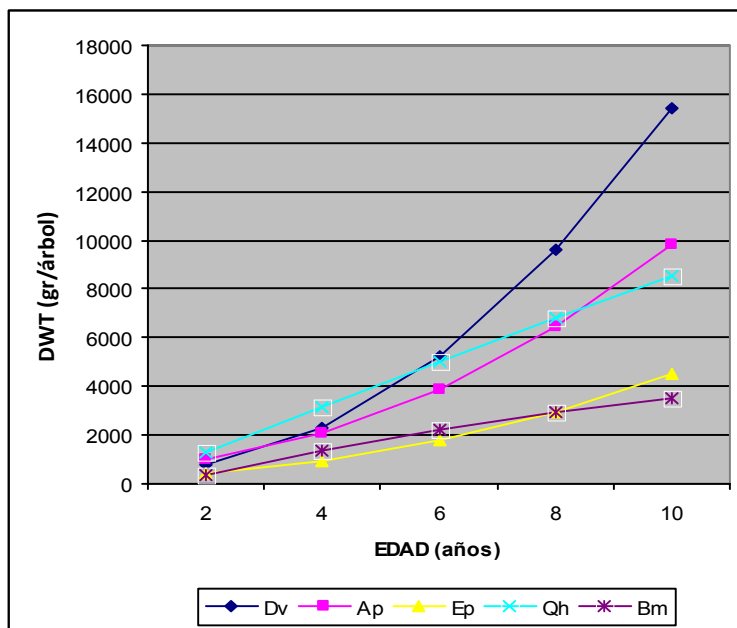


Figura 1. Biomasa total, expresada en gramos de materia seca, en función de la edad (años), para las cinco especies, utilizadas en el programa de restauración, del Parque Ecológico La Poma, en La sabana de Bogotá.

Tabla 9. Factores de conversión de peso fresco a peso seco, expresados como gramos de biomasa, para los compartimentos hojas, flores, frutos, ramas, ramillas, fuste, raíces gruesas, raíces finas y tocón, para las cinco especies, utilizadas en el programa de restauración, del Parque Ecológico La Poma, en la sabana de Bogotá.

COMPARTIMENTO	ESPECIES				
	<i>Dodonaea viscosa</i>	<i>Abatia parviflora</i>	<i>Escallonia paniculata</i>	<i>Quercus humboldtii</i>	<i>Baccharis macrantha</i>
Hojas	0,384	0,564	0,349	0,789	0,500
Flores, frutos	no presenta	0,678	no presenta	no presenta	no presenta
Ramas	0,478	0,547	0,396	0,626	0,564
Ramillas	0,504	0,593	0,403	0,764	0,641
Fuste	-	-	-	0,633	-
Raíz gruesa	0,435	0,545	0,378	0,715	0,677
Raíz delgada	0,400	0,581	0,376	0,760	0,621
Tocón	0,599	0,532	0,483	0,696	0,660

campo, *A. parviflora*, fue la única especie que presentó dicha condición, con una relación del 68% de peso seco para este compartimento. Para el compartimento ramas y ramillas *Q. humboldtii*, presenta la mayor relación con valores de materia seca del 62 y 73% respectivamente. La única especie con fuste definido fue *Q. humboldtii*, cuyo factor de conversión superó el 63%. Para los compartimentos de raíces y tocón igualmente esta especie presentó la mayor relación para la materia seca. Seguida de *B. macrantha*.

La figura 2 muestra la distribución de la biomasa, expresada como peso seco, para los compartimentos de hojas, ramas, fuste, tocón y raíces, para las especies objeto de estudio. El total de los compartimentos para cada especie suma el 100% y las convenciones de colores corresponden: DWR=peso seco de raíces, DWT=peso seco del tocón, DWP= peso seco del fuste; DWB= peso seco de las ramas y DWL= peso seco de las hojas. Este diagrama de compartimentos se ordena desde la parte inferior por las raíces y termina en la parte superior por las hojas representando la disposición de la biomasa como la presenta la especie.

De acuerdo con la forma como se distribuye la biomasa por compartimento, se pueden apreciar tres patrones: el primero constituido por *D. viscosa* y *A. parviflora*, cuyo mayor compartimento lo constituyen las ramas, pero las raíces y hojas se distribuyen similarmente. El segundo modelo, lo constituyen las especies *E. paniculata* y *B. macrantha*, cuya biomasa es dominada por el compartimento de ramas, mientras que las raíces se ubi-

can en segundo lugar. Finalmente, *Q. humboldtii*, cuya mayor biomasa es expresada por el fuste y los demás compartimentos funcionales se distribuyen regularmente, siguiendo el orden de ramas, hojas, raíces y tocón.

Cuantificación del carbono capturado para cada una de las especies objeto de estudio.

Las fracciones de carbono expresadas en porcentaje, para los diferentes compartimentos funcionales de la biomasa, con base en la evaluación de la materia seca, para las cinco especies objeto de estudio, se muestran en la tabla 10. En general, se aprecia cuales compartimentos presentan mayor contenido de carbono y cuales especies alcanzan en promedio la mayor proporción. *D. viscosa* tiene el mayor valor de conversión de carbono, alcanzando en promedio 39,05% de carbono por cada gramo de materia seca, mientras que el menor valor lo tiene *B. macrantha* con un 35,20% en promedio.

En la tabla 11, se muestran los modelos de acumulación de carbono para cada una de las especies objeto de evaluación en este estudio. Los modelos se construyeron con base en los modelos de acumulación de materia seca, restringidos por la fracción de carbono promedio por especie. Igualmente se presentan su ajuste y sus varianzas. La figura 3, visualiza el comportamiento de estos modelos.

Para la determinación del contenido de carbono para cada una de las especies y por categoría de edad, se utilizaron los resultados de los análisis de laboratorio, rea-

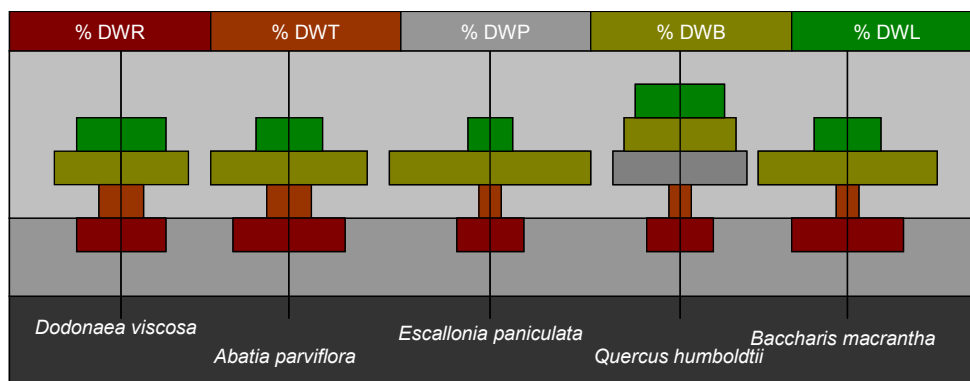


Figura 2. Distribución de la biomasa seca por compartimento: hojas, ramas, fuste, tocón y raíces, para cinco especies utilizadas en el programa de restauración del Parque Ecológico La Poma en la sabana de Bogotá. DWR=peso seco de raíz, DWT= peso seco de tocón, DWP= peso seco de fuste, DWB= peso seco de ramas, DWL= peso seco de hojas.

Tabla 10. Porcentaje de las fracciones de carbono, por unidad de materia seca, por compartimento de biomasa, para cinco especies utilizadas en el programa de restauración del Parque Ecológico La Poma en la sabana de Bogotá.

Compartimento	<i>Dodonaea viscosa</i>	<i>Abatia parviflora</i>	<i>Escallonia paniculata</i>	<i>Quercus humboldtii</i>	<i>Baccharis macrantha</i>
Hojas	37,23	35,04	34,2	35,92	33,93
Inflorescencias, semillas, flores y frutos	40,4	42,3	NO	NO	NO
Raíz delgada	35,83	33,22	32,33	33,65	32,87
Raíz gruesa	41,43	37,88	37,68	36,31	37,01
Fuste	-	-	-	35,62	-
Tocón	38,58	38,62	36,44	36,07	35,65
Ramas	40,73	37,63	38,35	36,53	35,85
Ramillas	39,17	37,98	41,41	35,71	35,91
PROMEDIO/ESPECIE	39,05	37,52	36,74	35,62	35,20

Tabla 11. Modelos de acumulación de carbono, para cinco especies utilizadas en el programa de restauración del Parque Ecológico La Poma en la sabana de Bogotá.

ESPECIES	MODELO	R2	D. W.
<i>Dodonaea viscosa</i>	$CCDv = 250,6369 - 114,6578*age + 69,0447*age^2$	98,05	3,55
<i>Abatia parviflora</i>	$CCAp = 288,4787 - 20,2558*age + 35,9941*age^2$	99,35	3,44
<i>Escallonia paniculata</i>	$CCTEp = 109,8526 + 5,2661*age + 16,0005*age^2$	99,03	3,18
<i>Quercus humboldtii</i>	$CCQh = -218,6014 + 341,8668*age - 1,5539*age^2$	96,55	2,61
<i>Baccharis macrantha</i>	$CCBm = -313,8073 + 230,8627*age - 7,6817*age^2$	95,53	3,5

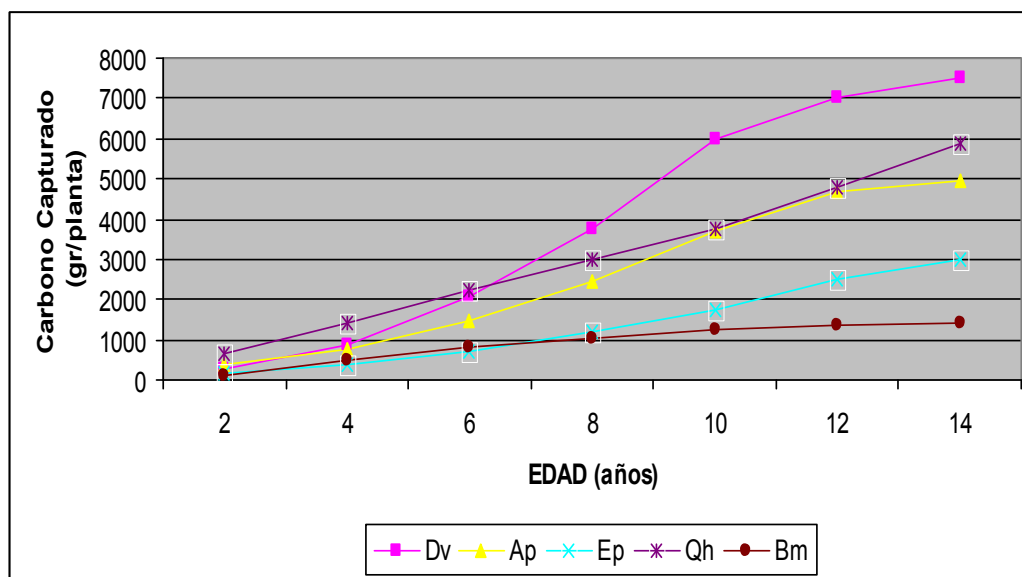


Figura 3. Comportamiento de los modelos de acumulación de carbono, para cinco especies utilizadas en el programa de restauración del Parque Ecológico La Poma en la sabana de Bogotá.

lizados para cada compartimento funcional de la planta (hojas, ramas, fuste y raíces) y se aplicaron los factores de conversión de carbono que variaron entre 0,3815 a 0,4473, presentándose los valores más bajos en los tejidos foliares, mientras que las estructuras reproductivas, el tocón y raíces gruesas, mostraron los mayores valores. Los factores de conversión de carbono se aplicaron a la biomasa seca por compartimento y se integró el valor para el individuo promedio por categoría de edad y por especie. Los valores estimados de carbono por hectárea se obtuvieron de la proyección de densidad de plantación que se utiliza en el Parque. Llama la atención que *D. viscosa*, a pesar de su condición arbustiva es la especie que manifiesta mayor eficiencia fotosintética para la captura de carbono, en el entorno ambiental del Parque Ecológico La Poma, con valores superiores a 8,3 Kg. por individuo con edades de 14 años, para una

proyección de 4,4 toneladas por hectárea, por año, (Tabla 12). Igualmente, *Q. humboldtii*, se proyecta como la especie que mayor carbono capturará a largo plazo, por su condición de vida y los valores proyectados a los 14 años de edad, muestran valores cercanos a las cuatro toneladas y media por hectárea por año. Las demás especies tienen tasas de acumulación de carbono que varían entre 1,5 y 3,5 ton/ha, año.

Si las condiciones del entorno ambiental se mantienen y se logra la expansión del índice de área foliar, sobre los predios de plantación, hasta lograr el cubrimiento total del área por las copas de los individuos, la proyección de *D. viscosa*, es superior a las 22 toneladas por hectárea mientras que *Q. humboldtii* llegaría a cerca de 20 toneladas por hectárea, las demás especies entre 7 y 14 ton/ha.

Tabla 12. Valores esperados del carbono capturado a nivel de rodal, para cinco especies utilizadas en el programa de restauración del Parque Ecológico La Poma en la sabana de Bogotá.

ESPECIES	CARBONO CAPTURADO A NIVEL DE RODAL/EDAD/ESPECIE (Ton/ha)							PROM. Ton/ha/año
	2	4	6	8	10	12	14	
<i>Dodonaea viscosa</i>	0,3305	0,9963	2,2757	4,1687	6,6755	7,8164	8,3600	4,3747
<i>Abatia parviflora</i>	0,4354	0,8703	1,6251	2,6998	4,0944	5,2280	5,4904	2,9205
<i>Escallonia paniculata</i>	0,2049	0,4299	0,7971	1,3066	1,9582	2,7521	3,3549	1,5434
<i>Quercus humboldtii</i>	0,7365	1,5998	2,4583	3,3118	4,1603	5,3373	6,5093	3,4448
<i>Baccharis macrantha</i>	0,1302	0,5408	0,8831	1,1571	1,3628	1,5003	1,5695	1,0205

AGRADECIMIENTOS

Al Programa Hojas Verdes de la Corporación Ambiental Empresarial, Filial de la Cámara de Comercio de Bogotá; por la financiación económica del proyecto. Al Parque Ecológico La Poma, por el apoyo de la logística de campo. Al Laboratorio LASEREX de la Universidad del Tolima, por su apoyo científico. Al laboratorio de Ciencias Forestales de la Universidad del Tolima por prestar los espacios de investigación científica para este proyecto

BIBLIOGRAFÍA

1. Roy J., Saugier B. and Mooney H. A. Terrestrial global productivity. Academic Press. New York; 2001. 597 p.
2. Landsberg J.J. and Gower S. T. Applications of physiological ecology to forest management. Academic Press. New York; 1997. 354 p.
3. Bugmann H.K.M. A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology* 77(7); 2006. p. 2055-2074.
4. Lambers H., Chapin F.S. and Pons T. L. Plant physiology ecology. Second Edition. Springer, Berlin; 2008. 604 p.
5. Ravindranth N. H. and Oswald M. Carbon inventory methods. Handbook for greenhouse gas inventory, carbon mitigation and roundwood production projects. Springer. Berlin; 2008. 315 p.
6. Fageria N. K., Baligar V.C. and Clarck R.B. Physiology of crop production. FPP. London; 2006. 345 p.
7. Rodríguez, N. Determinación del contenido de carbono capturado por cinco especies arbóreas y arbustivas del bosque seco alto andino en el Parque Ecológico La Poma. Universidad del Tolima. Tesis de Ingeniero Forestal. Ibagué; 2010. 115 p.
8. Hoover C.H. Field measurements for forest carbon monitoring. A landscape-scale approach. Springer. Berlin; 2008. 236 p.