



Existencias y Tasas de Incremento Neto de la Biomasa y del Carbono en Bosques Primarios y Secundarios de Colombia¹

*Sergio Alonso Orrego Suaza
Jorge Ignacio del Valle Arango*

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
Sede Medellín

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORESTALES

Medellín, julio 18 de 2002

¹ El presente trabajo hace parte de la línea de investigación Bosques y Cambio Climático, proyecto "Eficiencia de las Coberturas Vegetales en la Asimilación de CO₂, Central Hidroeléctrica Porce II", dirigido por los autores y cofinanciado por la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, y las Empresas Públicas de Medellín E.S.P., contrato 3/DJ-1367/17, Acta 19. El documento fue presentado por el autor principal como trabajo de promoción a la categoría de profesor asociado.

634.9
077

Créditos Institucionales

La presente investigación se realizó gracias al apoyo oportuno y eficiente brindado por el Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, y las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. Una invaluable e imponderable sinergia entre universidad y empresa permite que el país muestre, a la comunidad científica nacional e internacional, resultados preliminares de investigación en quizás el más desafiante y complejo problema ambiental de los últimos tiempos: el cambio climático.



0 NC
~~RE B~~ 392 83

Stocks and Net Increment Rates of Biomass and Carbon for Primary and Secondary Forests of Colombia

Sergio Alonso Orrego[†]

Profesor Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
E-mail: saorrego@perseus.unalmed.edu.co

Jorge Ignacio del Valle

Profesor Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
E-mail: jidvalle@perseus.unalmed.edu.co

Abstract

Data from permanent plots were used for estimating above-ground biomass, below-ground biomass, necromass and soil carbon. Primary forests were sampled through 33 plots of 0.1 ha, while secondary forests were sampled through 77 plots of 0.05 ha. The above-ground biomass, including trees, lianas, palms and herbaceous vegetation, was about $246.5 \pm 180.8 \text{ t ha}^{-1}$ (\pm standard deviation). For this same pool, secondary forests reached $46.5 \pm 30.5 \text{ t ha}^{-1}$, an amount approximately five times lower than the value obtained for primary forests.

A necromass of $13.2 \pm 5.6 \text{ t ha}^{-1}$ and $5.7 \pm 1.9 \text{ t ha}^{-1}$ are reported for primary and secondary forests, respectively. The root biomass, which comprises both fine and coarse roots, was equivalent to $85.0 \pm 72.6 \text{ t ha}^{-1}$ for primary forests. A below-ground biomass of $20.6 \pm 9.3 \text{ t ha}^{-1}$ was associated with secondary forests. To determine soil carbon a 30 cm depth was analyzed. Values between 99.5 ± 16.8 and $93.6 \pm 21.7 \text{ t ha}^{-1}$ were estimated for primary and secondary forests, respectively.

Net increments of 11.7 ± 4.3 and $6.2 \pm 3.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ for the above-ground biomass were estimated for primary and secondary forests, respectively. If additional information is added to these findings, a net primary productivity ranged between 13.9 and $26.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ can be assumed for the forests studied. However, the productivity is likely to be low if reports for tropical forests are considered.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECAS
BIBLIOTECA "JEN" GOMEZ

[†] A.A. 568 Medellín, Colombia, Sur América; tel.: 57-(4)-4309085; fax: 57-(4)-4309079

Existencias y Tasas de Incremento Neto de la Biomasa y del Carbono en Bosques Primarios y Secundarios de Colombia

Sergio Alonso Orrego[†]

Profesor Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. E-mail: saorrego@perseus.unalmed.edu.co

Jorge Ignacio del Valle

Profesor Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. E-mail: jidvalle@perseus.unalmed.edu.co

RESUMEN

En 33 parcelas permanentes de 1000 m² (0,1 ha) en bosques primarios y 77 parcelas permanentes de 500 m² (0,05 ha) en bosques secundarios, para un área de muestreo de 7,15 ha, se estimaron las existencias de biomasa y del carbono almacenado en los siguientes compartimientos: biomasa aérea, necromasa, biomasa subterránea y suelo. La biomasa aérea total viva en los bosques primarios promedió 246,542 t/ha, representada 92,42% por árboles y arbustos dicotiledóneos, 5,93% en palmas (3,58% la palma mil pesos), 1,41% bejucos y sólo 0,24% en hierbas. Los bosques secundarios tuvieron en este compartimiento una biomasa aérea viva 5 veces inferior a los primarios, 46,491 t/ha. En cuanto a la necromasa total alcanzó 13,197 t/ha en los bosques primarios y 5,749 t/ha en los bosques secundarios. La biomasa radical en los bosques primarios fue 85,002 t/ha, correspondiendo a las raíces finas 21,10% y 78,90% a las gruesas. En los bosques secundarios la biomasa radical fue de 20,648 t/ha, representada en forma muy equitativa entre las raíces gruesas y las finas (48,09% y 51,91%, respectivamente). Para los primeros 30 cm de suelo se registraron 99,544 t/ha de carbono orgánico en los bosques primarios y una cifra similar para los secundarios (93,600 t/ha).

Una segunda medición de todas las parcelas permitió estimar la tasa anual de incremento neto de la biomasa aérea en 11,665 t ha⁻¹ a⁻¹ (5,220 tC ha⁻¹ a⁻¹) en los bosques primarios, y 6,233 t ha⁻¹ a⁻¹ (2,789 tC ha⁻¹ a⁻¹) en los bosques secundarios. Las tasas anuales de incremento neto de las raíces equivalen a 3,051 t ha⁻¹ a⁻¹ (1,365 tC ha⁻¹ a⁻¹) y 1,862 t ha⁻¹ a⁻¹ (0,833 tC ha⁻¹ a⁻¹) para los bosques primarios y secundarios, respectivamente. Con estos resultados e información secundaria es posible estimar la productividad primaria neta (PPN) de los bosques primarios en 26,715 t ha⁻¹ a⁻¹ de biomasa seca, y en 13,982 t ha⁻¹ a⁻¹ de biomasa seca para los bosques secundarios.

El estudio también evaluó las tasas de acumulación de biomasa y carbono en coberturas de rastrojos bajos y altos, determinando la biomasa viva y la necromasa por el método de la cosecha en 38 parcelas de 25 m² cada una. La biomasa aérea viva sólo registra 7,687 ± 3,849 t/ha (± es la desviación estándar) de biomasa seca, y 3,075 t ha⁻¹ a⁻¹ (1,376 tC ha⁻¹ a⁻¹) de tasa media anual de incremento neto con edad promedio de los rastrojos de 2,5 años. Una cifra muy superior se obtuvo para la biomasa muerta: 13,933 ± 11,381 t/ha y 5,573 t ha⁻¹ a⁻¹ (2,494 tC ha⁻¹ a⁻¹) de tasa media anual de incremento.

Palabras claves: medición de carbono; biomasa aérea; necromasa; biomasa subterránea; carbono edáfico; tasa de incremento neto; productividad primaria neta.

LOS CIENTÍFICOS HAN VENIDO HABLANDO del cambio climático desde hace al menos 90 años (Sarre 1994). Desde que se descubrió en el observatorio de Mauna Loa, Hawai, que el aumento del dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, producto de la quema de los combustibles fósiles y de la biomasa, era el responsable de cuanto menos 65 por ciento del aumento de la temperatura de la tierra observada durante el presente siglo (Shugart 1984),

[†] A.A. 568 Medellín, Colombia, Sur América; tel.: 57-(4)-4309085; fax: 57-(4)-4309079

ha habido una justificada preocupación en los medios científicos que, muy lentamente, está encontrando eco entre los políticos. Este calentamiento, conocido como efecto de invernadero inducido se produce por cuanto el CO_2 , y otros gases y vapores que lo producen son relativamente transparentes a la luz del sol compuesta por longitudes de onda cortas, pero poco permeables a las longitudes de onda largas producidas por el calentamiento de la superficie terrestre. Ello hace que parte de estas ondas reboten, y generen como consecuencia directa un lento pero constante aumento de la temperatura de la atmósfera terrestre.

Cabe destacar que el efecto de invernadero no es en si un problema, todo lo contrario, es indispensable para que exista la vida que hoy conocemos en la tierra; de hecho, si este efecto no existiese, la temperatura promedio de la tierra sería de -23°C y no de 15°C como en realidad lo es (Pabón & Chaparro 1998). El problema radica en su acelerada tasa de aumento. Al calentarse la tierra, parte del agua que hoy se encuentra en su fase sólida entraría al ciclo hidrológico en sus fases gaseosa y líquida, lo cual elevaría el nivel del océano, y aumentaría las inundaciones catastróficas y el deshielo de los casquetes polares y de las cumbres montañosas, hoy cubiertas con "nieves perpetuas". Con esto también se aumentaría la frecuencia y magnitud de las avalanchas. Dado que el vapor de agua tiene un notorio efecto de invernadero, su aumento en la atmósfera a consecuencia del calentamiento global potenciaría este efecto. También se puede prever un aumento en el área cubierta por humedales y, por tanto, de la emisión de metano (CH_4), también responsable del calentamiento global. No obstante, muchos de estos humedales, a su vez, albergan turberas que son sumideros netos de CO_2 .

Pero también hay efectos que podrían considerarse positivos, por cuanto el aumento de la temperatura y de la precipitación podrían aumentar la productividad primaria neta y las cosechas, en regiones donde el crecimiento de las plantas está limitado por uno o por ambos factores. Se sabe que la cantidad de CO_2 en la atmósfera está lejos del óptimo para el crecimiento de la vegetación; por tanto, su aumento produce un efecto fertilizante en las plantas verdes (Luo & Reynolds 1999, Wilsey 1996). Shugart (1984) predijo efectos positivos en el aumento de la biomasa aérea con los aumentos del CO_2 atmosférico, en seis modelos de simulación de crecimiento de bosques durante 500 años; no obstante, los resultados difieren notablemente en sus respuestas por cuanto todavía se carece de mucha información. Parece lógico suponer que el aumento simultáneo de la temperatura, el CO_2 y la humedad tendría efectos multiplicativos en cuanto al crecimiento de la vegetación en

amplias regiones del mundo. Ésta actuaría como sumidero de carbono (C)¹ y contrarrestaría en algo el efecto de invernadero que dio origen al aumento adicional de la fitomasa.

Los métodos existentes para el monitoreo del CO₂ en bosques (MacDicken 1997) se desarrollaron en los bosques de las regiones frías y templadas, muy diferentes de los tropicales por su bajísima diversidad biológica y su dinámica menos acelerada. Por ello se requiere no sólo adaptar, sino también desarrollar nuevos métodos para que los resultados sean ciertos y consistentes. Por ejemplo, los métodos para el estudio de la demografía de las raíces de los bosques tropicales, están en ciernes. La falta o incertidumbre de anillos de crecimiento en los árboles tropicales obliga a un prolongado monitoreo de su crecimiento así como al diseño y construcción de equipos de alta precisión para medirlos. Igualmente, no se cuenta con métodos prácticos para monitorear las tasas de crecimiento de algunas monocotiledóneas arbóreas (guaduas y palmas, por ejemplo), las cuales no tienen crecimiento secundario. En el trópico húmedo estas plantas son tan importantes que se deben desarrollar métodos e instrumentos para ello.

El establecimiento de parcelas permanentes constituye una de las actividades fundamentales en el monitoreo de proyectos forestales, orientados hacia la materialización de estrategias para mitigar el calentamiento global. Como lo afirman Brown (1997a) y MacDicken (1997) las parcelas permanentes tienen ventajas en el monitoreo de carbono, si se considera que suministran información confiable y pueden ser objeto de verificación externa. Pero el monitoreo a largo plazo de las parcelas permanentes, que permitan estimar las tasas de aumento de la biomasa aérea (y por lo tanto del C y del CO₂), así como el monitoreo de los demás compartimientos en donde se almacena el C en las comunidades vegetales (humus, hojarasca, detritos de madera gruesa y raíces), requiere varios años de observación.

Hoy se reconoce que los bosques plantados (Brown & Lugo 1985) y los bosques secundarios y, en general, todas las comunidades serales (rastros bajos, rastros altos, bosques secundarios tempranos y tardíos), actúan como sumideros netos de carbono (Ortiz 1997, Brown 1997b, Prebble 1998, Orrego *et al.* 1998) y, por tanto, aportan en la mitigación del cambio climático por cuanto tienen una acumulación neta de C. En los trópicos algunas investigaciones muestran que algunos bosques primarios pueden estar capturando carbono a tasas pequeñas pero positivas, pero con la imposibilidad de extrapolar estos resultados a toda la región tropical dada la alta heterogeneidad ecosistémica (Schimel *et al.* 2001). Quizás

¹ El factor de conversión de carbono a CO₂ es 3,667, el cual resulta del cociente entre los pesos moleculares del dióxido de carbono (44) y del carbono (12).

la investigación en torno de la medición de captura de carbono por parte de las coberturas vegetales, puede dar luces sobre la posibilidad de contar con opciones de mitigación de gases con efecto de invernadero, las cuales sean técnicamente posibles y económicamente costo-efectivas.

MÉTODOS

SITIO DE ESTUDIO.— Desde el mes de diciembre de 1999 se inició el trabajo de campo para el levantamiento de parcelas permanentes en el área de influencia de la Central Hidroeléctrica Porce II, localizada al noreste del departamento de Antioquia, Colombia, en predios de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM) y en jurisdicción de los municipios de Yolombó, Amalfi y Gómez Plata (Figura 1), a una distancia de Medellín de 120 km por carretera (EPM 1992).

La precipitación media es de 3050 mm anuales y la temperatura promedio de 22,8°C, con valores promedios mínimos de 17,9°C y máximos de 29,3°C (EPM 1992). Antes del inicio del proyecto hidroeléctrico en la región predominaba la ganadería extensiva, la agricultura poco tecnificada y la minería. El uso ganadero compactó sustancialmente los suelos si se compara, para los primeros 30 cm de profundidad, la densidad aparente de 1,121 t/m³ en los bosques primarios, con el valor de 1,335 t/m³ en bosques secundarios (Lara 2000). Desde 1989 EPM comenzó un proceso de compra de predios, el cual finalizó en 1996 con la adquisición de aproximadamente 6000 ha. Si se reagrupan algunas de las categorías de uso del suelo del trabajo de Gómez *et al.* (2001), el área de estudio cuenta con 693,9 ha en bosques primarios, 1462,6 ha en bosques secundarios, 1611,4 ha en rastrojos bajos, 426,2 ha en pastos y 537,9 en pastos enrastrados.



FIGURA 1. Ubicación de la Central Hidroeléctrica Porce II.

ESTABLECIMIENTO DE PARCELAS PERMANENTES.— Se establecieron 33 parcelas de 1000 m² (0,1 ha) en bosques primarios y 77 parcelas de 500 m² (0,05 ha) en bosques secundarios, para un área de muestreo de 7,15 ha. Para el año de 2001 el número de parcelas en bosques secundarios era de 90, como resultado de la línea de profundización de ese mismo año. En los rastrojos bajos se cosecharon 38 parcelas de 25 m² cada una². El error de muestreo fue del 10% si se considera un muestreo estratificado proporcional al área, usando en los cálculos la variable tasa de incremento de la biomasa aérea (Berrouet & Loiza 2002). Las parcelas permanentes y los sitios de cosecha de la cobertura correspondiente a rastrojo bajo se georreferenciaron con GPS.

En los bosques primarios las parcelas son de 50 m x 20 m, y en ellas se midió el diámetro normal D a 1,3 m sobre el suelo o arriba de las bambas, si las hubiera, de todas las plantas leñosas (árboles, arbustos, palmas y bejucos), con $D \geq 10$ cm. Por lo regular el instrumento para esta medición fue el calibrador forestal (forcípula), con exactitud de 0,5 mm. Se marcaron con cruces de pintura amarilla los dos puntos de apoyo de las dos quijadas del calibrador forestal.

Como el seguimiento futuro no se hará con este instrumento sino con el microdendrómetro sueco (0,01 mm de exactitud en incremento radial), se clavaron al tallo tres clavos galvanizados de 3 pulgadas, requeridos para soportar el instrumento, dejando poco menos de 4 cm de cada clavo al aire. Ello permite monitorear el incremento radial por varios años sin cambiar los clavos. En algunos árboles con $D < 16$ cm se midió con calibrador digital con quijadas ampliadas (exactitud de 0,01 mm), y se marcaron en el tallo los puntos de apoyo mediante cruces muy finas de pintura amarilla. A las plantas muertas en pie se les aplicó idéntico protocolo que a las vivas. Por cuanto la mayoría de las palmas existentes en el área del proyecto no tienen crecimiento secundario (diamétrico), este procedimiento no revelaría, al monitorear su diámetro en mediciones futuras, las tasas de cambio de la biomasa de las palmas. Por ello se siguió un procedimiento diferente. Se ascendió a las palmas hasta el punto de inserción de la vaina de la última hoja (la más baja) en el estipe, y se midió con cinta métrica la longitud del estipe hasta este punto. Luego se pintó con pintura amarilla tanto la última porción de la vaina de la hoja, cerca de su punto de inserción, como parte del estipe. Ello tiene por finalidad que al desprenderse esta hoja, quede una marca amarilla circular alrededor del estipe. Aquí vale la pena poner de presente que las palmas tienen un número constante de hojas durante su lapso vital y su crecimiento primario, en altura, es rítmico. Crecen en altura cuando se forma una nueva hoja pero, casi

² El 74% de las parcelas se cosecharon durante la Línea de Profundización del año 2001.

simultáneamente, la hoja más antigua se desprende dejando una cicatriz en el estipe. La distancia entre la base de esa cicatriz en el estipe, que quedará marcada con la pintura, y la base de la hoja que quedó de última, registra el crecimiento en altura del estipe durante el tiempo transcurrido entre la formación de estas dos hojas.

El monitoreo del crecimiento primario de las palmas, en consecuencia, se reduce a medir la distancia entre la mancha amarilla en el estipe y la base de la vaina de la última hoja, durante un lapso de tiempo conocido (el tiempo transcurrido entre dos mediciones de la parcela). Adicionalmente, se les midió a las palmas su diámetro en la base del estipe.

Los monitoreos de carbono en bosques han sido diseñados o asesorados por científicos de fuera del trópico, donde las palmas son inexistentes o muy escasas, lo cual ha llevado a que no se propongan mediciones especiales para ellas (Attiwill & Ovington 1968, Alemdag 1980, Satoo & Madgwick 1982, Brown 1997a, MacDicken 1997, Márquez & Roy 2000). Al monitorear el crecimiento diamétrico de las palmas, su tasa de cambio es cero, subestimando las tasas de captura del carbono por los bosques tropicales, donde las palmas son un elemento florístico muy importante. A pesar de que algunos recomiendan ecuaciones específicas para las palmas (Márquez & Roy 2000), no es claro cómo monitorean el crecimiento en altura, pues es bien conocido que la mayoría de los instrumentos empleados para medir la altura de los árboles tienen baja exactitud, inaceptable para una medición tan fina (con frecuencia el estipe de las palmas adultas y seniles sólo aumenta unos pocos centímetros al año).

Además, en la tercera esquina de cada parcela, se levantó una subparcela de 0,01 ha (10 m x 10 m). En ella se midieron con calibrador digital los diámetros de todas las plantas leñosas con $1 \text{ cm} \leq D < 10 \text{ cm}$. Se marcaron con pintura amarilla los puntos de contacto del calibrador con el tallo. Las palmas tuvieron un tratamiento similar al mencionado en los párrafos anteriores.

Tanto los árboles de las parcelas como los de las subparcelas se numeraron con etiquetas gravadas de aluminio, las cuales se colgaron de los clavos o con un collar holgado de alambre de cobre alrededor del tallo. También se pintó el número en el tronco de los árboles más grandes con pintura amarilla.

En los bosques secundarios se aplicó un protocolo similar, excepto que las parcelas fueron de 0,05 ha (25 m x 20 m) y la subparcela de 0,0025 ha (5 m x 5 m). En toda la parcela se midieron las plantas leñosas con $D \geq 5 \text{ cm}$. En la subparcela se midieron todas las plantas leñosas con $1 \text{ cm} \leq D < 5 \text{ cm}$.

En todas las parcelas se midieron las alturas del 30% de los árboles, excepto lianas, empleando clinómetros Suunto y Haga. En las subparcelas se midieron las alturas de todas las plantas leñosas, excepto lianas, empleando varas extensibles y flexómetros. Los resultados de estas mediciones los reportan Berrouet & Loaiza (2000).

En los ecosistemas forestales se pueden identificar diferentes compartimientos en los cuales se almacena el carbono. En términos generales se habla de la biomasa aérea, necromasa, biomasa subterránea, carbono en el suelo, productos derivados de la madera en el caso de aprovechamiento forestal y otros productos no maderables³. A continuación se detallan los métodos y procedimientos empleados para la estimación de la biomasa de cada uno de estos compartimientos.

BIOMASA AÉREA: ÁRBOLES, PALMAS, BEJUCOS Y ARBUSTOS CON DIÁMETRO ≥ 1 cm.— La estimación de la biomasa, tanto en la primera como en la segunda medición, se realizó con ecuaciones de biomasa estimadas mediante árboles pesados *in situ* dentro del área de la investigación, pero por fuera de las parcelas permanentes (Tabla 1). Zapata (2000, 2001) y Colorado (2001) detallan todos los procedimientos de campo y laboratorio, así como los métodos estadísticos y matemáticos para la correcta estimación de los parámetros de este tipo de ecuaciones. Aquí sólo se mencionan algunos aspectos particularmente relevantes. Por cuanto la extrapolación es un procedimiento estadísticamente inaceptable, se trata de evitarla al máximo. En las plantas leñosas de los bosques primarios la ecuación de Zapata (2001) (Tabla 1, ecuación 1) es válida para $0,5 \text{ cm} \leq D \leq 198 \text{ cm}$. En los bosques secundarios casi la totalidad de los diámetros se encuentran por debajo de 30 cm. La ecuación de Colorado (2001) (Tabla 1, ecuación 2) tiene validez en $0,9 \text{ cm} \leq D \leq 40 \text{ cm}$. Para las raíces gruesas de bosques primarios y secundarios estimada durante esta investigación (Tabla 1, ecuación 3), la ecuación tiene validez para $1 \text{ cm} \leq D \leq 64,61 \text{ cm}$.

En ninguna de las parcelas existen árboles que superen el rango de validez estadística de las ecuaciones de biomasa aérea; sólo unos pocos superan el límite de la ecuación de raíces gruesas (23 individuos de 11.323 en la primera medición 1999-2000, 27 individuos de 13.752 en la segunda medición 2000-2001). Igual sucede para la palma mil pesos (Tabla 1, ecuación 5), cuyo rango es $0,5 \text{ m} \leq H \leq 25 \text{ m}$; para las demás palmas $1,0 \text{ m} \leq H \leq 15 \text{ m}$ y para los bejucos $1,0 \text{ cm} \leq D \leq 11 \text{ cm}$.

³ Estos dos últimos compartimientos no son relevantes en el área de Porce, dada la gestión ambiental encaminada a desincentivar cualquier tipo de aprovechamiento forestal en la zona.

Para disminuir costos, muchas investigaciones emplean ecuaciones existentes en la literatura. Este procedimiento conlleva un grave riesgo de error, por cuanto en las zonas bajas tropicales estas ecuaciones sobreestiman la biomasa, para árboles con diámetro superior a 40 cm, en factores desde 2 hasta 6 veces (Brown 1997a, Clark & Clark 2000).

TABLA 1. Ecuaciones de biomasa anhidra (80 °C hasta peso constante) para la parte aérea y subterránea empleadas en los cálculos.

Biomasa por tipo de planta	Ecuación	FC	N	%R ²
1. Plantas del bosque primario ($D \geq 1$ cm)	$= -2,2862 + 2,4709 \ln (D)$	0,0908	140	97,90
2. Plantas del bosque secundario ($D \geq 1$ cm)	$= -2,2317 + 2,4223 \ln (D)$	0,0833	152	97,47
3. Biomasa de raíces gruesas (ambas comunidades)	$= - 4,3942 + 2,6927 \ln (D)$	0,3163	49	91,79
4. Biomasa de raíces finas (ambas comunidades)	$= 6,9981 + 0,2879 (G)$	*	13	48,98
5. Biomasa aérea palma mil pesos (<i>Oenocarpus bataua</i>)	$= e^{1,98914} * H^{1,13281} + 139,48$	*	83	82,95
6. Biomasa aérea otras palmas	$= 0,3596 + 1,2184 \ln (H)$	0,3252	37	65,28
7. Biomasa de bejucos	$= 0,02785 + 1,841157 \ln (D)$	0,1332	33	87,44
8. Vegetación herbácea y leñosa pequeña	$= 100,235 * e^{-4,0092G^{0,0688}}$	*	103	40,99
9. Hojarasca fina	$= 1,11203 \ln (1 + 6,1844 G)$	*	102	27,66
10. Detritos de madera gruesa	$= 0,0052 + 1,839 \ln (G)$	1,1300	101	48,73

* No se requiere corrección.

Notas: Definiciones de símbolos empleados en las ecuaciones: la variable dependiente es $\ln (B)$, excepto en las ecuaciones (4), (5), (8), (9) y (10) que es B . B = biomasa seca en t/ha, excepto en la ecuación (5) que se expresa en kg, D = diámetro normal (a 1,30 m de la base o arriba de las bambas si existen) en cm, H = altura del estipe en m, G = área basal m²/ha, FC = factor de corrección = $\frac{1}{2}$ (cuadrado medio del error), N = tamaño de la muestra, %R² = coeficiente de determinación por ciento. Ecuación (1): Zapata (2001); ecuación (2): Colorado (2001); ecuación (3): esta investigación; ecuación (4): Sierra (2001); ecuación (5), (6) y (7): esta investigación; ecuación (8), (9) y (10): Herrera (2002a).

Aunque se ensayaron modelos que involucraban tanto D como H (H es la altura de la planta), en sus variables independientes para todos los tipos de plantas, excepto los bejucos por cuanto no se les midió su longitud, la inclusión de la altura no mejoró el ajuste. Igual sucedió con las palmas donde la inclusión del diámetro no mejoró el ajuste. Por esta razón estas variables no se incluyeron en las ecuaciones de la Tabla 1.

Las ecuaciones (1), (2), (3), (6), (7) y (10) de la Tabla 1 corresponden, en su forma original, a modelos alométricos. Desde la perspectiva estadística estos modelos se pueden linearizar y, por tanto, emplear la regresión lineal para su estimación. Está comprobado que en su forma no lineal son tremendamente heterocedásticos; vale decir, la varianza tiende a expandirse a medida que aumenta el valor de la variable explicadora. Esto viola un principio de la regresión minimocuadrática empleada por Colorado (2001), y en esta investigación (Tabla 1), así como de la regresión mediante la estimación de parámetros de máxima verosimilitud empleada por Zapata (2001). Este principio es el de la homogeneidad de la varianza. Mediante la transformación logarítmica los modelos se hacen, por lo general, homocedásticos (Satoo & Madgwick 1982). No obstante, esta mejora estadística conlleva un sesgo: se subestiman las verdaderas biomásas para cualquier valor de la variable explicativa (diámetro o altura en la Tabla 1).

Satoo & Madgwick (1982) explican la razón de este sesgo, en el hecho de que la transformación logarítmica produce ecuaciones que estiman la media geométrica del peso de una planta de una talla determinada (diámetro o altura), y no la media aritmética, como sería el caso si se empleara la regresión no lineal. Como se sabe de la estadística elemental, la media geométrica es siempre menor o igual que la aritmética; la diferencia entre ambas es el sesgo.

La literatura reporta por lo menos cinco correcciones diferentes para este sesgo (Satoo & Madgwick 1982). Zapata (2001) realiza un análisis exhaustivo sobre el asunto, que no obstante haberse estudiado al menos desde 1941 por Finney, es poco conocido. Por lo regular, cuando se realiza el ajuste por sesgo a las ecuaciones de biomasa, tanto los forestales (Bell *et al.* 1984) como los biólogos (Hughes *et al.* 1999) emplean la corrección más simple consistente en un medio del cuadrado medio del error ($1/2[CME]$). Al sumarle este valor al término independiente de la regresión lineal, se aumenta el intercepto, pero no se modifica la pendiente.

En las ecuaciones de la Tabla 1 no se hizo la corrección; sin embargo, se consignó el factor de corrección en la tercera columna de la Tabla 1, por si alguien deseara emplearlo. La principal razón para no usar las versiones corregidas de las ecuaciones estriba en el