

## EXISTENCIAS Y TASAS DE INCREMENTO NETO DE LA BIOMASA Y DEL CARBONO EN BOSQUES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS DE COLOMBIA

Sergio Alonso Orrego<sup>1</sup> y Jorge Ignacio del Valle<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Profesor Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. E-mail: saorrego@perseus.unalmed.edu.co

<sup>1</sup> A.A. 568 Medellín, Colombia, Sur América; tel.: 57-(4)-4309085; fax: 57-(4)-4309079

<sup>2</sup>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 m<sup>2</sup> (0,1 ha) en bosques primarios y 77 parcelas permanentes de 500 m<sup>2</sup> (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 233,494 t/ha, representada 91% por árboles y arbustos dicotiledóneos, 7,58% en palmas (3,8% la palma mil pesos), 1,16% bejucos y sólo 0,26% en hierbas. Los bosques secundarios tuvieron en este compartimiento una biomasa aérea viva 5 veces inferior a los primarios, 45,823 t/ha. En cuanto a la necromasa total alcanzó 14,772 t/ha en los bosques primarios y 7,312 t/ha en los bosques secundarios. La biomasa radical en los bosques primarios fue 56,381 t/ha, correspondiendo a las raíces finas 31,2% y 68,8% a las gruesas. En los bosques secundarios la biomasa radical fue de 20,481 t/ha, representada en forma muy equitativa entre las raíces gruesas y las finas (47,7% y 52,3%, respectivamente). Para los primeros 30 cm de suelo se registraron 99,248 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 12,006 t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (5,373 tC ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) en los bosques primarios, y 6,190 t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (2,770 tC ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) en los bosques secundarios. Las tasas anuales de incremento neto de las raíces equivalen a 1,816 t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (0,813 tC ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) y 1,718 t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (0,769 tC ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) 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 21,177 t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> de biomasa seca, y en 13,860 t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> de biomasa seca para los bosques secundarios. En

términos de los datos de Clark *et al.* (2001) los bosques estudiados se encuentran en el tercio inferior pantropical.

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 10 parcelas de 25 m<sup>2</sup> cada una. La biomasa aérea viva sólo registra 5,437 ± 1,503 t/ha (± es la desviación estándar) de biomasa seca, y 2,175 t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (0,973 tC ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) de tasa media anual de incremento neto con edad promedio de los rastrojos de 2,5 años. Una cifra similar se obtuvo para la biomasa muerta: 6,308 ± 4,049 t/ha y 2,523 t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (1,129 tC ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) 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.*

---

## **Introducción**

Los métodos existentes para el monitoreo del CO<sub>2</sub> en bosques (MacDicken 1997) se han desarrollado 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 el diseño y construcción de equipos de alta precisión para medirlos. Para algunas monocotiledóneas arbóreas (guaduas y palmas, por ejemplo) las cuales no tienen crecimiento secundario, no se han desarrollado métodos prácticos para monitorear sus tasas de crecimiento. 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 (1997) 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 permiten estimar las tasas de aumento de la biomasa aérea (y

por lo tanto del C y del CO<sub>2</sub>), 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 secundarios y, en general, todas las comunidades serales (rastrosos bajos, rastrosos altos, bosques secundarios tempranos y tardíos), actúan como sumideros netos de carbono (Ortíz 1997, Brown 1997, Prebble 1998, Orrego *et al.* 1998); igualmente los bosques plantados (Brown & Lugo 1985) y, por tanto, aportan en la mitigación del cambio climático por cuanto tienen una acumulación neta de C. Quizá 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**

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 (EPM) (Figura 1). Se establecieron 33 parcelas de 1000 m<sup>2</sup> (0,1 ha) en bosques primarios y 77 parcelas de 500 m<sup>2</sup> (0,05 ha) en bosques secundarios, para un área de muestreo de 7,15 ha. En los rastrosos bajos se cosecharon 10 parcelas de 25 m<sup>2</sup> cada una. El error de muestreo es del 12% si se considera un muestreo estratificado proporcional al área (Berrouet & Loaiza 2000a). 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 (0,01mm 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. Se

realizó la primera medición con el microdendrómetro. 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.



**FIGURA 1.** Ubicación de la Central Hidroeléctrica Porce II.

Por cuanto 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 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, Sattoo & Madgwick 1982, Brown 1997, MacDicken 1997, Márquez & Roy 2000). Al monitorear el crecimiento diamétrico de las palmas, su tasa de cambio es cero, subvalorando 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 tienen 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 cuelgan 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 (2000b).

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 maderables<sup>1</sup>. A continuación se detallan los métodos y procedimientos empleados para la estimación de la biomasa de cada uno de estos compartimientos.

- **Biomasa aérea**

**Biomasa de árboles, palmas, bejucos y arbustos con diámetro  $\geq 1$  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 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 estos bosques la ecuación de Sierra & Hernández (2000) tiene validez para  $1 \text{ cm} \leq D \leq 31 \text{ cm}$ . 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 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. Igual sucede para la palma mil pesos (Tabla 1, ecuación 6), 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  $1,0 \text{ cm} \leq D \leq 11 \text{ cm}$ .

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 las ecuaciones predicen biomاسas para árboles con diámetro superior a 40 cm que difieren en factores desde 2 hasta 6 veces (Brown 1997, Clark & Clark 2000).

---

<sup>1</sup> 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.

**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 <sup>2</sup>
1. Plantas del bosque primario ( $D \geq 1$ cm)	$= -2,25739 + 2,46443 \ln (D)$	0,08464	141	98,14
2. Plantas del bosque secundario ( $D \geq 1$ cm)	$= -2,23167 + 2,42225 \ln (D)$	0,08333	152	97,47
3. Biomasa de raíces gruesas bosque secundario	$= - 4,128 + 2,579 \ln (D)$	0,3424	40	87,70
4. Biomasa de raíces gruesas (ambas comunidades)	$= - 0,79200 + 1,17667 \ln (G)$	0,01958	77	98,23
5. Biomasa de raíces finas (ambas comunidades)	$= 6,9981 + 0,2879 (G)$		12	48,98
6. Biomasa aérea palma mil pesos ( <i>Oenocarpus bataua</i> )	$= e^{1,98914} * H^{1,13281} + 139,48$	$E^{0,10586}$	83	82,95
7. Biomasa aérea otras palmas	$= 0,63227 + 1,29616 \ln (H)$		17	75,00
8. Biomasa de bejucos	$= -0,23656 + 1,88032 \ln (D)$	0,08166	9	97,25

Notas: Definiciones de símbolos empleados en las ecuaciones de arriba: la variable dependiente es  $\ln (B)$ , excepto en las ecuaciones (6) y (7) que es  $B$ .  $B$  = biomasa seca en kg, excepto en las ecuaciones (4) y (5) que se expresa en t/ha,  $D$  = 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 m<sup>2</sup>/ha,  $FC$  = factor de corrección =  $\frac{1}{2}$  (cuadrado medio del error),  $N$  = tamaño de la muestra, %R<sup>2</sup> = coeficiente de determinación por ciento. Ecuación (1): Zapata (2001); ecuación (2): Colorado (2001); ecuación (3), (4) y (5): Sierra & Hernández (2001); ecuación (6): esta investigación; ecuación (7): Galeano (1995); ecuación (8): esta investigación.

Aunque se ensayaron modelos que involucraban tanto  $D$  como  $H$  ( $H$  es la altura de la planta), en sus variables independientes o explicativas 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 incluyen en las ecuaciones de la Tabla 1.

Finalmente, las ecuaciones (1), (2), (3), (4), (6), (7) y (8) (Tabla 1) son transformaciones logarítmicas que buscan linearizar modelos que en su forma original son no lineales. En efecto, todos ellos son modelos alométricos simples. Desde la perspectiva eminentemente estadística, estos modelos se deben linearizar y, por tanto, emplear la regresión lineal. 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 explicativa. 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 se hacen homocedásticos (Sato & Madgwick 1982). No obstante, ésta mejora estadística conlleva un sesgo: se subestiman las verdaderas biomasa para cualquier valor de la variable explicativa (diámetro o altura en la Tabla 1).

Sato & 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.

Hasta cinco diferentes correcciones se han propuesto para este sesgo (Sato & Madgwick 1982). Zapata (2001) realiza un exhaustivo análisis sobre el asunto, que no obstante haberse estudiado al menos desde 1941 (Finney citado por Zapata 2001), 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 ha anotado 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 hecho, constante en todas las estimaciones de esta investigación, de que en los proyectos donde los bosques actúan como sumideros de carbono, las estimaciones conservadoras son preferibles y le dan más confianza a un eventual inversionista. En efecto, el uso de las ecuaciones corregidas, aumentaría entre 8 y 10% la biomasa aérea de los bosques primarios y secundarios y hasta en 50% la biomasa de las raíces gruesas. En igual proporción, entonces, aumentará la captura de CO<sub>2</sub>.

### **Biomasa de la vegetación no leñosa**

El tamaño de las parcelas varía según el estudio. Por ejemplo, Newbould (1967) sugirió tamaños que van desde 100 cm<sup>2</sup> para musgos hasta 1 m<sup>2</sup> para pastos finos uniformes. En este proyecto se estimó la vegetación no leñosa del sotobosque y leñosa, menor de 1 cm de diámetro, mediante seis parcelas de 1 m<sup>2</sup> en cada una de las parcelas establecidas en bosques primarios y secundarios.



### **Biomasa de rastrojos altos y bajos**

Los rastrojos tanto altos como bajos se evaluaron mediante el método de la cosecha en 10 parcelas de 25 m<sup>2</sup> (5 m x 5 m). En ellos se cosechó toda la biomasa viva a ras del suelo la cual se pesó en el campo. Igualmente se recogió y pesó toda la biomasa muerta pesándola también en el campo. Se extrajeron muestras de la biomasa viva y de la muerta para secarlas a 80°C hasta peso constante y estimar el peso seco de los componentes en cada parcela cosechada. Los datos de biomasa viva por parcela se presentan en el Anexo 1 y los de necromasa en el Anexo 2.

- **Necromasa**

### **Hojarasca fina en el suelo**

La hojarasca fina está conformada por hojas, flores, frutos, semillas y fragmentos de éstas, ramitas y material leñoso con diámetros variablemente definidos (Proctor 1983, Duivenvoorden & Lips 1995). Para la biomasa se emplearon seis parcelas de 1 m<sup>2</sup> en proyección ortogonal en todas las parcelas permanentes, en las cuales se colectaron todos los detritos vegetales finos, incluyendo ramitas de menos de 2 cm de diámetro. Se calculó el peso fresco y se les estimó el peso seco con submuestras secadas hasta peso constante a 80°C.

### **Detritos gruesos (diámetro > 2 cm)**

Los detritos gruesos constituyen la masa vegetal muerta compuesta por pedazos de madera, leños, troncos, ramas o árboles muertos en pie o caídos con diámetros  $\geq 2$  cm (Saldarriaga 1994). En subparcelas de 25 m<sup>2</sup>, se pesaron todos los detritos de madera cuyo diámetro superó los 2 cm cuando se midieron en bosques secundarios. En bosques primarios las subparcelas fueron de 100 m<sup>2</sup>. Se calculó el peso seco estimando el contenido de humedad de submuestras secadas a 80°C hasta peso constante.

Mientras se desarrollan ecuaciones de biomasa específicas para los árboles muertos en pie, se evaluó su biomasa como el 70% de la estimación obtenida con las ecuaciones de la biomasa para los árboles vivos. Este procedimiento está avalado por otras investigaciones (Márquez & Roy 2000), así como por el hecho de que estos árboles por lo regular adolecen de toda o casi toda su copa que representa, aproximadamente, 30% de la biomasa de los árboles de estos bosques (Zapata 2001).

- **Biomasa subterránea**

**Biomasa de las raíces gruesas (diámetro  $\geq$  5 mm)**

Uno de los principales compartimentos en la medición de la cantidad de carbono almacenada en los bosques es la biomasa de las raíces (MacDicken 1997). La clasificación entre raíces gruesas y finas obedece a un límite relativamente arbitrario. En general, los estudios de la biomasa subterránea permiten considerar las raíces gruesas como aquellas que tienen diámetro  $\geq$  5 mm, las cuales juegan un papel fundamental como soporte mecánico del árbol y como medio de transporte de nutrientes y agua. Para las raíces gruesas en bosques secundarios se emplearon ecuaciones de biomasa (ecuaciones 3 y 4, Tabla1). Para las raíces gruesas en bosques primarios se optó por la extracción de las mismas en calicatas de 1 m<sup>3</sup> de volumen en 20 parcelas permanentes, con la idea de estimar una relación entre la biomasa de raíces y el área basal de las parcelas.

**Biomasa de las raíces finas (diámetro < 5 mm)**

Las raíces finas cumplen una importante función en la absorción de agua y nutrientes por el árbol. No obstante, la determinación de su biomasa es una tarea ardua y laboriosa. El método utilizado fue el siguiente:

- En diez parcelas de bosques secundarios y en tres de primarios se tomaron cinco muestras imperturbadas de suelo de 0-15 cm y cinco de 15-30 cm empleando un barreno de raíces (*Eijkelpomp*) de 750 cm<sup>3</sup>.
- Las muestras se lavaron en un tamiz fino donde se eliminaron el suelo y las raíces gruesas.
- Las raíces se secaron hasta peso constante a 80°C.
- Se estimó el peso por hectárea.

Posteriormente, se estimó la biomasa de raíces finas ( $BR_f$ ) por parcela en función del área basal de la misma ( $G$ ) en m<sup>2</sup>/ha, usando las relaciones matemáticas encontradas por Sierra (2001) (ecuación 5, Tabla 1).

- **Carbono en el suelo (0-30 cm)**

Con el cambio en el uso del suelo como resultado de la destrucción del bosque declina no solamente el carbono existente en la biomasa aérea, sino también el contenido de carbono edáfico. A su vez, actividades de rehabilitación, revegetalización y restauración, conducen al aumento del

carbono en los diferentes compartimientos. Dada la dinámica y la magnitud de las existencias de carbono en el suelo en los distintos ecosistemas forestales, es dable pensar en la necesidad de su cuantificación y medición. Siguiendo a MacDicken (1997) se muestrearon los primeros 30 cm, mediante el siguiente procedimiento:

- Se determinó la densidad aparente en 74 parcelas mediante la extracción, en cada una, de 8 cilindros de 750 cm<sup>3</sup> de volumen y 15 cm de longitud. El número de muestras dependió del premuestreo y de la teoría estadística (Lara 2000).
- Se determinó el contenido de carbono de una muestra compuesta de 20 muestreos de suelo, extraídos entre 0 – 30 cm de profundidad. Para determinar el número de muestras por parcela se realizó un premuestreo (Lara 2000).
- Se calcularon las toneladas por hectárea, al multiplicar la densidad aparente por la profundidad de muestreo, por 10.000 como factor de equivalencia de una hectárea en m<sup>2</sup>, y por el contenido de carbono, previo análisis de laboratorio.

## Resultados y discusión

- **Existencias de biomasa y carbono para la medición 1999-2000**

El establecimiento y la primera medición de las parcelas permanentes se realizó entre noviembre de 1999 y julio de 2000. En la Tabla 2 se presentan los resultados del primer inventario de la biomasa en los tres compartimientos, así como del carbono edáfico, tanto para los bosques primarios como secundarios.

La biomasa aérea total viva en los bosques primarios promedió 233,494 t/ha, representada 91% por árboles y arbustos dicotiledóneos, 7,58% en palmas (3,8% la palma mil pesos), 1,16% bejucos y sólo 0,26% en hierbas. Este resultado invita a una reflexión en torno de los costos del monitoreo en bosques primarios. El monitoreo de las hierbas es costoso por cuanto consume tiempo en el montaje de las parcelas, en el pesado en el campo y luego en el laboratorio (Herrera 2000), que difícilmente se compensaría con su magro aporte a la biomasa total, por cuanto los demás componentes representan 99,74% de la biomasa aérea viva. En proyectos comerciales de monitoreo, que no tengan como objetivo la investigación, esta componente se debería estimar, a medida que las investigaciones publicadas aporten tal información, casi inexistente en la actualidad.

El alto coeficiente de variación de este compartimiento en los bosques primarios (62,85%) revela la poca uniformidad de estos bosques debido, probablemente, a la abrupta e irregular topografía y, sobre todo, a la corta furtiva de árboles y palmas.

Los bosques secundarios tuvieron en este compartimiento una biomasa aérea viva 5 veces inferior a los primarios, 45,823 t/ha (Tabla 2); y su alto coeficiente de variación (66,37%) es explicable, tanto por la irregularidad de la respuesta por el uso previo del suelo y el impacto de la ganadería, uso que se prolongó después de que EPM comprara los terrenos (este proceso se inició hace 12 años y terminó hace 6 años) hasta el presente, así como por la diversidad de edades de estos bosques; seis hasta probablemente unos 25 años. A este respecto se demostró en México, en condiciones de bosques muy húmedos tropicales, que la duración del uso previo en ganadería y cultivos de maíz tuvo un efecto dramático en la respuesta de la sucesión medida en tasas de acumulación de la biomasa seca. La curva de respuesta fue una exponencial negativa. Cuando el uso previo duró sólo 2 años, el bosque secundario creció  $12,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ; cuando el uso previo se prolongó por 30 años, la tasa de recuperación bajó a  $4,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Hughes *et al.* 1999).

La palma mil pesos, típica indicadora de bosques primarios, no se encontró en ninguna parcela de bosques secundarios. Las otras palmas sólo contribuyeron con 1,1% de la biomasa viva; y su altísimo coeficiente de variación (860,46%) demuestra su existencia en muy pocas parcelas, caracterizadas por altas biomásas y pertenecer a procesos sucesionales más avanzados. Las palmas en los bosques secundarios son indicadoras de un incipiente proceso de restauración de la biodiversidad, que es preciso acelerar con técnicas apropiadas.

En los bosques secundarios la biomasa de los bejucos es sólo 19,5% de la existente en los bosques primarios, pero las hierbas superan en 42% al bosque primario. Estos resultados son coherentes con la dinámica del proceso sucesional. Los bejucos tardan en establecerse en los bosques secundarios, de allí su relativamente alto coeficiente de variación (168,15%); además, crecen lentamente y por ello, los que se encuentran, por lo regular tienen bajas dimensiones. Como consecuencia de que el dosel de los bosques secundarios es menos denso, el piso del bosque recibe mayor iluminación lo que estimula el crecimiento de las hierbas.

En cuanto a la necromasa total alcanzó 14,772 t/ha en los bosques primarios; esto es 6,3% de la biomasa aérea viva; con respecto a este mismo compartimiento, la hojarasca fina y los detritos de madera gruesos representan 5,17%. Estos detritos son costosos y difíciles de medir (Herrera 2000) y una cuidadosa revisión de literatura podría llegar a promedios para los bosques húmedos tropicales que permitirían estimarlos, especialmente, en monitoreos comerciales. Más aún, porque su duración es efímera por cuanto tienen una vida media corta debido al proceso de

descomposición. Su cambio en el tiempo también es lento porque a medida que se descomponen, igualmente se acumulan a tasas sensiblemente similares (del Valle 2001a, 2001b). Los árboles muertos en pie alcanzaron 2,676 t/ha, y representan sólo 1,14% de la biomasa aérea viva, cifra muy baja comparada con los resultados reportados para la Amazonia colombiana. Saldarriaga (1994) encontró 8,9% y Álvarez (1993) 18,97%, ambos en bosques primarios imperturbados .

En los bosques secundarios la necromasa total fue 7,312 t/ha, 49,5% de la de los primarios. Los árboles muertos en pie y los detritos gruesos fueron muy inferiores en cantidad que en los bosques primarios; por el contrario, la hojarasca fina representa 81% de la de los bosques primarios. Ello conduce a pensar que de las variables de la necromasa, la hojarasca fina es la más dinámica y rápidamente tiende a igualar las cantidades existentes en los bosques primarios.

La biomasa radical en los bosques primarios fue 56,381 t/ha, correspondiendo a las raíces finas 31,2% y 68,8% a las gruesas. Ello implica una relación entre la biomasa subterránea a biomasa aérea viva de 24,1%, similar a la registrada por Saldarriaga (1994) en la Amazonia (27,8%) y a la citada por Sierra & Hernández (2000) para bosques sobre oxisoles tropicales (19,9%), pero dos veces superior al promedio de veintitrés estudios en bosques de tierras bajas tropicales (Sierra & Hernández 2000). Las diferencias de métodos entre los autores aportan gran incertidumbre a estas comparaciones.

En los bosques secundarios la biomasa radical fue de 20,481 t/ha, representada en forma muy equitativa entre las raíces gruesas y las finas (47,7% y 52,3%, respectivamente). En estos bosques sucesionales la biomasa radical llega al 44,7% de la aérea. Al menos como hipótesis se podría argumentar que en las fases tempranas de la sucesión, las plantas asignan una mayor proporción de recursos fotosintéticos al desarrollo de un potente sistema radical, en especial de raíces finas, por cuanto así acceden a mayores cantidades de agua y de nutrientes de por sí escasos en estos suelos depauperados por la ganadería extensiva, llevada a cabo durante décadas previas a la iniciación del proceso sucesional. La literatura es escasa en este tema. Saldarriaga (1994) reporta cifras de 18,6% de relación biomasa subterránea a aérea para bosques sucesionales de menos de 20 años de la Amazonia. Pero sus datos provienen de sucesiones que, aunque se hallaban sobre suelos pobres, habían sido chagras indígenas cuyo uso agrícola es muy efímero y nunca estuvieron sometidos a la ganadería.

**TABLA 2.** Resultado del inventario de biomasa y del carbono edáfico en los cuatro compartimientos donde se almacena el carbono (biomasa aérea viva, necromasa, raíces y suelo), tanto para los bosques primarios como secundarios del área de influencia de la Central Hidroeléctrica Porce II. Primera medición: 1999-2000.

	Bosques primarios						Bosques secundarios					
	Árboles	Palma mil pesos	Otras palmas	Bejucos	Hierbas	Total	Árboles	Palma mil pesos	Otras palmas	Bejucos	Hierbas	Total
	Biomasa aérea viva (t/ha)											
$\bar{x}$	212,429	8,819	8,887	2,712	0,647	<b>233,494</b>	43,879	0,000	0,496	0,529	0,919	<b>45,823</b>
N	33	33	33	33	33	<b>33</b>	77	77	77	77	70	<b>77</b>
%CV	71,97	169,91	136,99	98,26	58,36	<b>62,85</b>	66,09	-	860,46	168,15	64,03	<b>66,37</b>
	Necromasa (t/ha)											
$\bar{x}$	En pie 2,676	Hojarasca fina 6,028	Detritos gruesos 6,068			<b>Total 14,772</b>	En pie 0,410	Hojarasca fina 4,880	Detritos gruesos 2,022			<b>Total 7,312</b>
N	33	33	31			<b>33</b>	77	70	70			<b>77</b>
%CV	149,89	21,02	119,49			<b>57,84</b>	227,88	42,38	208,26			<b>80,40</b>
	Raíces (t/ha)											
$\bar{x}$	Raíces gruesas 38,774		Raíces finas 17,607		<b>Total 56,381</b>	Raíces gruesas 9,762		Raíces finas 10,719		<b>Total 20,481</b>		
N	20		33		<b>34</b>	77		77		<b>77</b>		
%CV	109,61		17,87		<b>93,76</b>	70,02		20,72		<b>43,83</b>		
	Carbono en el suelo (t/ha) <sup>a</sup>											
$\bar{x}$	%C 2,978		$\rho$ (t/m <sup>3</sup> ) 1,117		<b>Total 99,248</b>	%C 2,340		$\rho$ (t/m <sup>3</sup> ) 1,335		<b>Total 93,600</b>		
N	35		35		<b>35</b>	74		74		<b>74</b>		
%CV	7,91		7,91		<b>16,45</b>	6,42		6,42		<b>23,18</b>		

<sup>a</sup> Hasta 30 cm de profundidad.

Por otra parte, Sips (1997) aporta evidencias de que las tasas relativas de crecimiento de la biomasa de las raíces de los bosques secundarios, superan las de la biomasa aérea; este proceso dura de dos a tres décadas. A partir de ahí, la biomasa radical permanece constante, en tanto que la aérea continua creciendo hasta los 80 años, último registro existente.

Para los primeros 30 cm de suelo se registraron 99,248 t/ha de carbono orgánico en los bosques primarios y una cifra similar para los secundarios (93,600 t/ha). Obsérvese que el contenido relativo de carbono orgánico en los bosques primarios supera significativamente (Lara 2000) el de los bosques secundarios (2,978% vs. 2,340%). La razón de que estas diferencias se atenúen al calcular los pesos de carbono radica en que la densidad aparente de los bosques secundarios (1,335 t/m<sup>3</sup>), difiere significativamente de la de los primarios (1,117 t/m<sup>3</sup>) (Lara 2000). Este aumento de la densidad aparente se debe, sin duda, a la compactación producida por la ganadería no tecnificada durante varias décadas. No debe causar sorpresa que la compactación alcance hasta los 30 cm de profundidad, por cuanto Müller & Solis (1997) reportan información de Costa Rica donde se evidencia este efecto hasta 70 cm de profundidad del suelo.

Una comparación más equitativa, que evite el sesgo introducido por el aumento de la densidad, consiste en emplear para los bosques secundarios la densidad aparente del bosque primario que no ha sufrido compactación. Este cálculo arroja 78,413 t/ha de carbono, más de 20 t/ha inferior al de los bosques primarios.

En términos globales, los suelos contienen tres veces más carbono en el primer metro de suelo que la biomasa viva y muerta contenida en la biota (Rozenweig & Hillel 2000). Pero en los bosques tropicales se acumula la más baja cantidad de carbono edáfico de todos los biomas mundiales; en ellos la relación de carbono en la biota a carbono en el suelo se acerca a la unidad, en tanto que en los bosques boreales la relación es de 1 a 5 (IPCC 2000). En los bosques primarios se conserva esta relación, por cuanto al multiplicar la biomasa aérea viva por el contenido promedio de carbono de los diferentes componentes de la biomasa, 44,75%, se obtiene 104,489 t/ha de carbono; así la relación biomasa aérea a suelo sería para los bosques primarios 104,489/99,248; una relación 1/1 hasta la primera cifra decimal para 30 cm de profundidad.

La cifra porcentual de carbono empleada para la vegetación difiere del 50% comúnmente aceptada por el IPCC (Houghton *et al.* 1990), como una regla práctica cuando no hay datos locales. La cifra aquí presentada se basa en el análisis de ochenta y dos muestras de todos los componentes, y de las especies más abundantes de bosques primarios y secundarios del área del proyecto. Estas muestras fueron analizadas en la Universidad Internacional de la Florida, mediante el analizador Carlo – Erba NA Series 1500 NC. Este instrumento de combustión en seco, se considera el más

adecuado para estos propósitos. Los suelos se analizaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por el método de Walkey & Black, método de combustión húmeda recomendado para los suelos en proyectos de sumideros de carbono (MacDicken 1997). El contenido de carbono de la biomasa fue muy parecido al de un estudio similar realizado en México donde el C promedió 46,6% (Hughes *et al.* 1999)

Si bien es cierto que los datos por biomas del IPCC (2000) corresponden a contenidos de carbono hasta un metro de profundidad, también es cierto que esta variable disminuye exponencialmente con la profundidad. La información es confirmada en el área del proyecto hasta 4 m de profundidad (F. Moreno, comunicación personal). A un metro de profundidad, cuatro muestras arrojaron sólo 0,446%C, apenas el 15% del superficial. Por ello, la relación obtenida se afectaría poco si se incluyesen los 70 cm de suelo adicionales.

La disminución del porcentaje de carbono en los suelos secundarios se debe atribuir a dos causas ante todo: la erosión y la descomposición del carbono orgánico. La erosión estimulada por la ganadería afecta la porción superficial del suelo, portadora del mayor contenido de materia orgánica edáfica. La descomposición por el cambio microclimático inducido por la deforestación tiende a aumentar la temperatura del suelo, y con ello, la descomposición de la materia orgánica.

- **Existencias de biomasa y carbono para la medición 2000-2001**

La remediación de las parcelas permanentes se llevó a cabo entre noviembre de 2000 y marzo de 2001. Para el caso de los bosques secundarios, casi después de un año, ya no existían las parcelas BS056, BS064, BS070 y BS075 por corte total de la cobertura existente en las mismas. A su vez, la parcela del bosque primario BP023 no se remidió por la presencia de un enjambre de agresivas abejas africanizadas. Los resultados se resumen en la Tabla 3.

Como promedio, en la biomasa viva del bosque primario aumentaron su participación en la biomasa total todos los componentes medidos, excepto los árboles que mantuvieron su biomasa aérea y las hierbas que no se midieron de nuevo; su aparente disminución (compárense las Tablas 2 y 3) con respecto a la primera medición se debe a la falta de la parcela 23 que registró uno de los mayores valores en este componente (1,043 t/ha). La disminución de la biomasa viva de los árboles entre las dos mediciones se debe, ante todo, al efecto de la mortalidad, acentuada en la parcela 19 que tuvo la más alta biomasa (939,842 t/ha en 1999/2000), pero que en el período entre las mediciones sufrió la mortalidad de un árbol gigante, reduciendo su biomasa en 274,890 t/ha. En los bosques secundarios los componentes de la biomasa viva mantuvieron una participación similar con respecto a la biomasa total registrada en la primera medición. En cuanto a la necromasa los datos de los detritos gruesos y finos son los mismos de la primera medición. Las diferencias



observadas entre las Tablas 2 y 3 se deben a que en las parcelas cortadas o no medidas en la segunda medición, no se tuvieron en cuenta estas variables para el promedio de estos componentes en la segunda medición.

Los árboles muertos en pie si aumentaron en biomasa por un factor de 4 en los bosques secundarios y de casi 5 en los bosques primarios. El altísimo coeficiente de variación de esta mortalidad en los bosques primarios (326,48%), indica que este es un fenómeno concentrado en unas pocas parcelas, o gregario, como ya se había mencionado en el caso de la parcela 19. En los bosques secundarios el fenómeno se encuentra distribuido de manera más aleatoria.

La biomasa muerta en pie en los bosques primarios es similar a la de la literatura para bosques húmedos tropicales (Saldarriaga 1994, Álvarez 1993, Hughes *et al.* 1999); lamentablemente, pocos autores registran este tipo de información. En cuanto a los bosques secundarios los resultados de Saldarriaga (1994) y Hughes *et al.* (1999) muestran biomazas muertas en pie para bosques menores de 20 años, entre dos y cinco veces superiores de los aquí registrados. Esto puede atribuirse a las bajas tasas de crecimiento de los bosques secundarios del área del proyecto, asunto que se discutirá más adelante y, por tanto, a las pequeñas dimensiones de los árboles.

En cuanto a las raíces se deben hacer estos comentarios. En los bosques primarios las raíces gruesas no cambiaron por cuanto esta cifra correspondió a la extracción de estas raíces en 20 calicatas de un metro cúbico cada una (1m x 1m x 1m), establecidas en igual número de parcelas permanentes, buscando correlacionar su peso seco con el área basal medida en una parcela puntual, empleando el Relascopio de Bitterlich. Al no obtenerse relación significativa entre las dos variables (Sierra 2001), se optó por asignar igual peso en ambas mediciones. Por esta razón, al compararlas (Tabla 2 y Tabla 3), las raíces de los bosques primarios parecen menos dinámicas que las de los secundarios en las que se empleó la ecuación 3 (Tabla 1).

En cuanto al comportamiento del carbono en el suelo se emplearon los mismos datos de la primera medición.

**TABLA 3.** Resultado del inventario de biomasa y del carbono edáfico en los cuatro compartimientos donde se almacena el carbono (biomasa aérea viva, necromasa, raíces y suelo), tanto para los bosques primarios como secundarios del área de influencia de la Central Hidroeléctrica Porce II. Segunda medición: 2000-2001.

	Bosques primarios						Bosques secundarios					
	Biomasa aérea viva (t/ha)											
	Árboles	Palma mil pesos	Otras palmas	Bejucos	Hierbas <sup>a</sup>	<b>Total</b>	Árboles	Palma mil pesos	Otras palmas	Bejucos	Hierbas <sup>a</sup>	<b>Total</b>
— x	212,285	9,648	11,926	2,761	0,634	<b>237,255</b>	49,888	0,000	0,613	0,633	0,895	<b>52,029</b>
N	32	32	32	32	32	<b>32</b>	73	73	73	73	67	<b>73</b>
%CV	54,63	166,41	155,74	88,91	59,37	<b>45,68</b>	60,22	-	839,44	159,13	63,64	<b>61,63</b>
	Necromasa (t/ha)											
	En pie	Hojarasca fina <sup>a</sup>	Detritos gruesos <sup>a</sup>		<b>Total</b>	En pie	Hojarasca fina <sup>a</sup>	Detritos gruesos <sup>a</sup>		<b>Total</b>		
— x	12,805	6,095	6,101		<b>25,001</b>	1,694	4,951	2,088		<b>8,733</b>		
N	32	32	30		<b>32</b>	73	67	67		<b>73</b>		
%CV	326,48	20,11	120,81		<b>184,29</b>	121,59	41,37	205,54		<b>69,68</b>		
	Raíces (t/ha)											
	Raíces gruesas <sup>a</sup>		Raíces finas		<b>Total</b>	Raíces gruesas		Raíces finas		<b>Total</b>		
— x	38,774		18,191		<b>56,965</b>	11,182		11,205		<b>22,387</b>		
N	20		32		<b>34</b>	73		73		<b>73</b>		
%CV	109,61		18,57		<b>94,40</b>	64,11		19,98		<b>41,68</b>		
	Carbono en el suelo (t/ha) <sup>a</sup>											
	%C	ρ (t/m <sup>3</sup> )		<b>Total</b>		%C	ρ (t/m <sup>3</sup> )		<b>Total</b>			
— x	2,978	1,117		<b>99,248</b>		2,340	1,335		<b>93,600</b>			
N	35	35		<b>35</b>		74	74		<b>74</b>			
%CV	7,91	7,91		<b>16,45</b>		6,42	6,42		<b>23,18</b>			

<sup>a</sup> Se emplearon los mismos datos del inventario 1999-2000 de la Tabla 1.

- **Existencias de biomasa aérea y carbono en los rastrojos bajos**

Después del abandono de los potreros, o mejor, porque la ganadería continuó accediendo a estas áreas, cuando se dejan enmalezar, como en efecto sucedió, empiezan a aparecer numerosas plantas herbáceas y leñosas así como arbustos, en gran profusión pero de pequeño tamaño. También se encontraron a veces allí árboles pioneros típicos de pequeño tamaño pertenecientes al género *Vismia*, así como numerosas Melastomataceae que tratan de emerger entre una maraña de helechos (*Pteridium aquilinum*) de cortadera (*Scleria* sp) y de pastos que empiezan a morir por la poca iluminación que reciben. El dosel en este tipo de cobertura generalmente se encuentra por debajo de 2,0 m de altura. A esta cobertura se ha denominado generalmente rastrojo bajo.

Teóricamente no deberían existir estos rastrojos en las propiedades de EPM, por cuanto ya hace seis años compró los últimos predios, tiempo suficiente al menos para el establecimiento de un incipiente bosque secundario. Si ello no es así es por estas razones: uso continuado de la ganadería, aun después de la compra de los terrenos por EPM; uso del fuego para favorecer los pastos; excesiva degradación del suelo.

Para evaluar las tasas de acumulación de biomasa y carbono en estos rastrojos bajos, se determinó la biomasa viva y la necromasa por el método de la cosecha en 10 parcelas de 25 m<sup>2</sup> cada una. En la Tabla 4 se presentan los resultados para este tipo de coberturas tanto para la biomasa anhidra viva como muerta y las tasas medias de aumento de la biomasa, estimando la edad promedia de estos rastrojos en 2,5 años.

A los dos y medio años la biomasa aérea viva sólo registra  $5,437 \pm 1,503$  t/ha ( $\pm$  es la desviación estándar) de biomasa seca, y  $2,175$  t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> de tasa media anual de incremento neto. Una cifra similar se obtuvo para la biomasa muerta:  $6,308 \pm 4,049$  t/ha y  $2,523$  t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> de tasa media anual de incremento.

Aunque se dispone de pocos datos de la literatura para comparar, Fontaine *et al.* (1978) citan tasas medias de incremento de la biomasa viva en Filipinas de  $15,6$  t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> a los 2,5 años y en Guatemala de  $7,10$  t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. En Borneo Hashimoto *et al.* (2000) encontraron a los 2,5 años  $10,816$  t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. Sánchez (1976) cita datos de Yangambi, Zaire, que permiten estimar una acumulación media de biomasa a los dos años y medio de  $12,8$  t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. Los resultados del área del proyecto son casi tres veces menores que la más baja de las cifras citadas. De hecho, las tasas de acumulación de biomasa son comparables con las de algunas sabanas naturales (Koechlin 1979), y no con las fases más tempranas del desarrollo de barbechos en los procesos de sucesión secundaria de las zonas tropicales húmedas. Aquí, como en los bosques secundarios, no parece haber explicación distinta del agotamiento de unos suelos, de hecho pobres, así como de su

compactación producto de una ganadería extensiva y de prácticas de manejo, que como la quema, son supremamente destructivas.

**TABLA 4.** Biomasa aérea viva y necromasa de los rastrojos bajos en t/ha. Se incluyen también las tasas medias ( $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ) de ambas. Edad estimada 2,5 años.

	Biomasa aérea viva	necromasa
$\bar{x}$	5,437 (2,433) <sup>a</sup>	6,308 (2,822) <sup>a</sup>
Tasa medias	2,175	2,523
D.E. <sup>b</sup>	1,503	4,049
%C.V. <sup>c</sup>	27,65	64,20

<sup>a</sup> Equivalente en carbono, con un porcentaje de 44,75.

<sup>b</sup> Desviación estándar.

<sup>c</sup> Coeficiente de variación.

La biomasa muerta se ha acumulado a tasas medias un poco mayores que la viva ( $2,523\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ), pero es difícil compararla con otras investigaciones por no haberse encontrado información de este compartimiento en la literatura. La suma de estos compartimientos (viva más necromasa) es una buena aproximación de la productividad primaria neta de la biomasa aérea,  $4,698\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$  de biomasa. Por tanto, la tasa de acumulación de carbono es  $2,102\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ .

- **Tasa anual de incremento neto de las raíces (TINR)**

Para los bosques secundarios la tasa de incremento neto de las raíces gruesas se determinó así: Sierra (2000) ajustó la relación alométrica entre la biomasa de las raíces gruesas en función del diámetro de los árboles secundarios (ecuación 3, Tabla 1). Por tanto, al aplicar esta ecuación a las dos mediciones de los diámetros de cada una de las parcelas permanentes, se obtienen las tasas de aumento periódico de las raíces gruesas. Estas se llevan linealmente a tasa anual y se ajustan por el factor de expansión previamente citado según se trate de la subparcela o de la parcela. En la Tabla 5 se presentan los resultados promedios para todas las parcelas de bosques secundarios.

**TABLA 5.** Tasas anuales netas de incremento de las raíces gruesas, finas y totales (TINR) en  $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$  para los bosques primarios y secundarios. Período: 1999/2000-2000/2001.

	Bosques primarios			Bosques secundarios		
	$\Delta rg^a$	$\Delta rf$	$TINR^c_1$	$\Delta rg$	$\Delta rf$	$TINR^d_2$
$\bar{X}$	1,410	0,406	1,816	1,282	0,437	1,718
N	32	32	32	73	73	73
%CV	65,78	65,74	65,75	65,06	60,32	63,77

<sup>a</sup>Tasa anual de incremento neto de las raíces gruesas.

<sup>b</sup>Tasa anual de incremento neto de las raíces finas.

<sup>c</sup>Tasa anual de incremento neto de las raíces (gruesas + finas) de los bosques primarios.

<sup>d</sup>Tasa anual de incremento neto de las raíces (gruesas + finas) de los bosques secundarios.

Para los bosques primarios, como ya se había mencionado, la regresión entre el peso de las raíces extraídas de las calicatas y el área basal no funcionó. Al aplicar el mismo valor para ambas mediciones, las raíces gruesas tendrían una tasa de cambio nula, subestimándose este componente. Por esta razón se empleó la ecuación 4 (Tabla 1) que cubre gran parte del rango de área basal de los bosques primarios. Con base en esta ecuación los cambios de área basal de parcelas permanentes producidos entre las dos mediciones, permiten estimar los cambios de la biomasa de las raíces gruesas, los cuales se ajustan linealmente a un año. Los promedios para todas las parcelas se presentan en la Tabla 5.

Para estimar la tasa de cambio de las raíces finas se empleó la ecuación 5 (Tabla 1) válida tanto para bosques primarios como secundarios. Mediante esta ecuación los cambios en las raíces finas se asocian con cambios en el área basal. Como en los casos anteriores, estas cifras se expresan linealmente en  $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ .

En la Tabla 5 aparecen los resultados de las tasas anuales de incremento neto de las raíces. Los bosques primarios y secundarios presentaron tasas muy similares ( $1,816\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$  vs.  $1,718\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ , respectivamente), pero cuando se calculan las tasas específicas o relativas las raíces de los bosques primarios sólo crecen 3,2% ( $[1,816/56,381]100$ ), en tanto que las raíces de los bosques secundarios lo hacen al 8,4% ( $[1,718/20,481]100$ ). Ello confirma que los bosques secundarios asignan proporcionalmente más energía fotosintética al crecimiento radical que los primarios.

- **Tasas anuales de incremento neto de la biomasa aérea (TINBA) y del carbono contenido en ella**

Para este cálculo se revisó la clásica aproximación de Beers (1962). De las cinco diferentes versiones mencionadas por este autor para el estudio de las tasas de crecimiento, cuando se monitorea el crecimiento de las plantas individualmente, la más lógica parece ser, para el balance anual de la biomasa y del carbono, la tasa de incremento neto de la biomasa aérea (TINBA)

$$TINBA = \ddot{A}_s + I - C - M,$$

donde:  $\ddot{A}_s$  = cambio de biomasa de las plantas sobrevivientes; o sea aquellas vivas en ambas mediciones, estimadas con los diámetros correspondientes a la segunda medición, menos los de la primera medición,

$I$  = biomasa de los árboles que superaron el diámetro mínimo establecido en la primera medición, registrado en la segunda medición,

$C$  = biomasa de los árboles cortados entre dos mediciones,

$M$  = biomasa de los árboles muertos entre dos mediciones.

Pero un análisis más detallado de esta fórmula revela imprecisiones e inconsistencias, a pesar de su amplio uso hasta la actualidad como se deduce de su inclusión en la última edición del Forestry Handbook (Bell *et al.* 1984: 343). De acuerdo con las instrucciones de Beers (1962), los ingresos ( $I$ ) entrarían con la biomasa correspondiente al diámetro registrado en la segunda medición, cuando los diámetros de las plantas de una parcela permanente se miden en dos ocasiones distanciadas en el tiempo; así, si el diámetro mínimo registrado fuese de 10 cm, un árbol que no superase ese límite en la primera medición y que en la segunda apareciese como ingreso con  $D = 10,5$  cm, acumularía la biomasa correspondiente a un árbol de 10,5 cm de diámetro. No obstante, si un árbol tenía en la primera medición  $D = 10$  cm y en la segunda medición su diámetro fuese  $D = 10,5$  cm, sólo acumularía en biomasa la diferencia entre estas dos biomosas: la correspondiente a 10,5 cm de diámetro menos la correspondiente a 10 cm de diámetro, cifra muy inferior a la del árbol ingresado. Lo lógico no es sumar  $I$  sino  $\Delta I$ , siendo esta cifra la diferencia entre la biomasa correspondiente al diámetro observado en la segunda medición (10,5 cm) y la del diámetro límite (10 cm en este ejemplo).

En el caso de las plantas muertas sucede lo siguiente: cuando estas plantas no se encuentran en pie en la segunda medición, se descuenta el total de la biomasa por cuanto  $M = \Delta M$  y  $\Delta M = 0 - D_1$  (la biomasa correspondiente al diámetro en la segunda medición es cero, en razón de que  $D_2 = 0$ ). La planta muerta que yace en el suelo se evalúa en el compartimiento de detritos de madera gruesa ( $DMG$ ) si  $D > 2$  cm, y en la hojarasca fina si  $D \leq 2$  cm. Pero si la planta permanece muerta en pie debe monitoreársele su diámetro y sumar algebraicamente  $\Delta M$  a la biomasa correspondiente al diámetro en la segunda medición ( $D_2$ ), menos la biomasa correspondiente al diámetro en la primera medición ( $D_1$ ). Con frecuencia los árboles muertos en pie, al irse descomponiendo disminuyen su diámetro; entonces  $D_2 < D_1$ , luego el  $\Delta M$  será negativo; pero también puede ser que  $D_2 > D_1$  y, por tanto, que se sume una biomasa muerta. Este procedimiento es mucho más lógico que la propuesta de Beers (1962), sobre todo cuando, como en este caso, se trata de determinar el balance del carbono contenido en la vegetación. En efecto, aunque la planta esté muerta ello no significa que no contenga carbono, o que éste se halla emitido instantáneamente a la atmósfera en forma de  $CO_2$ , una vez la planta murió.

Mientras se conoce más sobre el proceso de descomposición de los árboles y otras plantas muertas en pie, se ha empleado para estimar su biomasa 70% del valor estimado con la correspondiente ecuación de biomasa. Ello se sustenta tanto en estudios previos (Márquez & Roy 2000), como en el hecho de que los árboles muertos en pie pierden rápidamente su follaje y luego sus ramas. Según la información local (Zapata 2001), aproximadamente 70% de la biomasa de los árboles del área de estudio corresponde a los tallos. Este es, en consecuencia, un tratamiento conservador en términos de evaluar el bosque como sumidero de carbono.

En cuanto a las plantas cortadas, al no disponerse del segundo diámetro, se descuenta la totalidad de la biomasa correspondiente al diámetro inicial. Esto tiene lógica por cuanto desde el punto de vista del bosque, los árboles cortados generalmente salen de él y, por tanto, su carbono. Igualmente, dentro del IPCC (Houghton *et al.* 1990) los árboles cortados se tratan como emisión instantánea, aproximación muy conservadora que sólo podría aplicarse en rigor, si la biomasa se empleara para dendroenergía. Para otros usos se debería determinar la vida útil de los productos obtenidos, asunto del que se adolece de información. Por tanto, este descuento conlleva un análisis conservador en proyectos forestales donde los bosques actúan como sumideros de carbono. Con base en lo expresado se ha optado por estimar la *TINBA* así

$$TINBA = \ddot{A}_s + \ddot{A} I - C + \ddot{A} M.$$

Como el lapso de tiempo entre las dos mediciones de cada una de las parcelas (período: 1999/2000 y 2000/2001) en algunas parcelas fue inferior a un año (365 días) y en otras superior, cada parcela se ajustó linealmente a un año. En los bosques primarios en los cuales se midieron todas las plantas con  $D \geq 10$  cm en 0,1 ha, el resultado se extrapolaron a 1ha linealmente. De igual manera, en los bosques secundarios donde se midieron todas las plantas con  $D \geq 5$  cm en 0,05 ha, se extrapolaron linealmente su biomasa a una hectárea. Así todas las unidades se expresan en  $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ .

El tratamiento para las subparcelas de 100 m<sup>2</sup> establecidas en los bosques primarios y de 25 m<sup>2</sup> establecidas en los secundarios, fue el siguiente: en los bosques primarios se midieron en estas subparcelas las plantas con  $1\ cm \leq D < 10\ cm$ . Luego, a una planta que ingresó en la segunda medición con diámetro  $1\ cm < D_2 < 10\ cm$ , su  $\ddot{A} I$  se estima con la biomasa correspondiente a  $D_2$ , menos la biomasa correspondiente a  $D_1 = 1\ cm$  (diámetro límite de registro en la subparcela), multiplicado este resultado por 100 para ajustar a 1 ha. Ahora bien, una planta que se encontraba en la subparcela en la primera medición ( $1\ cm < D_1 < 10\ cm$ ) y que en la segunda medición registró un  $D_2 > 10\ cm$ , su cambio de biomasa se determina así: se calcula el  $\ddot{A}_s$  entre las

biomasas correspondientes a  $D_2=10\text{cm}$  y  $D_1$ . El resultado se multiplica por 100. Luego se calcula el  $\ddot{A} I$  (ingreso a la parcela de 0,1 ha) como la biomasa correspondiente a  $D_2>10\text{ cm}$ , menos la biomasa correspondiente a  $D_1=10\text{ cm}$ . Este resultado se multiplica por 10 para obtener los resultados en términos de hectárea. Un razonamiento similar se aplica para  $\ddot{A} M$ .

Igual procedimiento se aplica para los bosques secundarios, pero teniendo en cuenta que el diámetro límite no es 10 cm sino 5 cm, y que los factores de expansión son 400 ( $10.000\text{ m}^2/25\text{ m}^2$ ) para las subparcelas y de 20 ( $10.000\text{ m}^2/500\text{ m}^2$ ) para las parcelas.

En la Tabla 6 se presentan los promedios anuales por tipo de planta y los totales de la *TINBA* para los bosques primarios. En los bosques primarios las plantas leñosas (árboles), responden por 85,6% de la *TINBA*, el resto básicamente corresponde a las palmas (12,4%) y los bejucos 2%; o sea, si se hubiesen monitoreado las palmas con base en su diámetro, no se hubiese detectado el 12,4% de la *TINBA*, o unas  $1,5\text{ t ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$ .

El valor de la *TINBA* obtenido ( $12,006\text{ t ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$ ) es realmente muy alto, superior a treinta y nueve registros revisados por Clark *et al.* (2001) para bosques tropicales viejos (*old-growth*) quienes registran tasas entre  $0,3$  y  $3,8\text{ t ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$  de carbono *versus* los datos de esta investigación de  $5,37\text{ t ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$  de carbono ( $12,006 \times 0,4475$ ). Phillips *et al.* (1998) encontraron en 478 parcelas en bosques maduros imperturbados del trópico húmedo, los cuales teóricamente deberían tener una tasa neta de incremento igual a cero, que estos bosques crecieron a una tasa media de  $0,38 \pm 0,22\text{ t ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$  de carbono (± son los límites de confianza al 95%). El efecto de fertilización del  $\text{CO}_2$  atmosférico producido por la combustión de combustibles fósiles, parece ser una de las causas para que estos bosques no se encuentren en el equilibrio esperado. La razón para que estos bosques tengan tan altas tasas de incremento de biomasa seca (y de carbono) hay que buscarla en su historia. Aun hoy, cuando estos bosques son vigilados por los guardabosques de EPM, se presentan aprovechamientos furtivos de las especies maderables más valiosas y útiles, así como de las palmas con el fin de extraer su dura madera (macana), las fibras de sus hojas para hacer escobas y el renuevo foliar para los llamados “ramos benditos” durante las semanas santas. En el pasado esto debió haber ocurrido con mayor intensidad por la escasa o nula vigilancia que de ellos se hacía. La existencia de maderas valiosas tan cerca de una gran metrópoli como Medellín, que las demanda hábidamente para las industrias del mueble y de la construcción, son una presa muy codiciada por los traficantes de madera. Las evidencias encontradas, representadas por tocones de árboles y palmas cortadas y de entables de aserraderos, llevan a considerar estos bosques como primarios intervenidos, lejos de su condición de equilibrio dinámico. Teóricamente los bosques aumentan su biomasa siguiendo una función sigmoïdal. Cuando los bosques han



permanecido inalterados por mucho tiempo (más de 200 años en la Amazonia según Saldarriaga 1994), su biomasa se encuentra muy cerca de la asíntota de la curva. La intervención selectiva de los bosques reduce su biomasa hasta la zona de mayor pendiente de la curva, el bosque se recupera entonces a tasas muy altas de incremento de la biomasa aérea y subterránea hasta alcanzar, de nuevo, el equilibrio perdido, proceso que puede durar varias décadas (Botkin 1993). Esta es la situación de los bosques primarios intervenidos de Porce.

Es preferible llamarlos primarios intervenidos y no maduros como se usa en la literatura anglófona en oposición lógica a los secundarios. En los primarios, aparentemente no ha habido en los últimos siglos una intervención antrópica o evento natural que halla eliminado totalmente estos bosques para dedicar el suelo, durante prolongados lapsos de tiempo, a otros usos. Quizá sólo la intervención indígena en pequeñas chagras de las que el bosque se recupera relativamente rápido. Las intervenciones selectivas aunque reducen la biomasa del bosque así como su valor económico y estético, mantienen en gran medida la estructura y el funcionamiento del ecosistema boscoso, pero no su madurez, concepto que parece aludir el equilibrio dinámico perdido por las intervenciones localizadas. Por el contrario, los bosques secundarios surgen después de intervenciones extensas y prolongadas de la cubierta original para dedicar el suelo a otros usos, generalmente la ganadería y la agricultura, y al ulterior abandono de este nuevo uso. Los bosques sucesionales son, al menos en el trópico húmedo, diferentes en estructura y función de los primarios, situación que puede ser permanente o durar muchas décadas (Finegan 1997, Sips 1997).

En la Tabla 7 se resumen los resultados de la tasa de incremento neto de la biomasa aérea (*TINBA*) de los bosques secundarios. La *TINBA* de los bosques secundarios arrojó cifras bajas ( $6,190 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) si se comparan con las citadas por Sánchez (1976), Fontaine *et al.* (1978), Ortíz (1997) y Hughes *et al.* (1999), pero son similares a los promedios de Saldarriaga (1994) a los 10 años. La *TINBA* de los bosques secundarios en términos absolutos resultó ser casi la mitad de la de los bosques primarios, representada en 98,0% por arbustos y árboles (árboles en la Tabla 7). No obstante, la *TINBA* relativa de los bosques secundarios ( $[6,190/45,823]100$ ), 13,5%, más que duplica la de los primarios ( $[12,006/233,494]100$ ), que es 5,1%.

Resulta interesante y útil en la práctica constatar que el coeficiente de variación de la biomasa aérea total, tanto en la primera como en la segunda medición, es muy superior (Tablas 2 y 3) que el de las tasas anuales de incremento de la biomasa aérea total, tanto para bosques primarios como secundarios (Tablas 6 y 7). Por ello, si se recalculara el tamaño de la muestra éste habría

sido más bajo que el encontrado (Berrouet & Loaiza 2001), o los límites de confianza habrían resultado mucho más cercanos a la media.

- **Tasas anuales de incremento neto de la biomasa total (aérea más subterránea)**

Con base en la información aportada en las Tablas 5 y 6, la tasa anual de incremento neto de la biomasa total ( $TINBT_1$ ) en los bosques primarios es la suma de su  $TINR_1$  (Tabla 5) más la  $TINBA$ , (Tabla 6), o sea  $13,822 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de biomasa anhidra o  $6,185 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de carbono. Para los bosques secundarios (Tablas 5 y 7) resulta ser  $7,909 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de biomasa anhidra, o  $3,539 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de carbono.

Con base en información secundaria y algunas suposiciones conservadoras es posible estimar la productividad primaria neta ( $PPN$ ) de estos dos tipos de bosques. Empleando la información de Clark *et al.* (2001), se relacionaron los diez datos de parcelas más parecidos por su biomasa aérea a los bosques primarios de este estudio (los bosques con biomasa aérea entre  $206 \text{ t/ha}$  y  $249,7 \text{ t/ha}$  en promedio). En estos bosques el promedio de pérdida por consumidores fue de  $0,41 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de carbono, lo cual equivale a  $0,82 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de biomasa, empleando el mismo factor de Clark *et al.* ( $C = 50\%$  de biomasa). En estas parcelas los compuestos orgánicos volátiles promediaron  $0,22 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de carbono; o sea  $0,44 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de biomasa.

Si se asume que en términos de hojarasca fina estos bosques se encuentran en equilibrio, como supuesto conservador por cuanto con la ecuación propuesta por Brown & Lugo (1982) basada en la temperatura y la precipitación se estimarían  $9 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (temperatura promedio  $22,8^\circ\text{C}$ , precipitación  $3000 \text{ mm}$  anuales), y si se tiene en cuenta que el promedio pantropical de hojarasca caída en los bosques tropicales húmedos es de  $9,5 \pm 0,74 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  ( $\pm$  los límites de confianza al 95%) (del Valle 2000a), entonces la hojarasca fina registrada en la Tabla 3 debe equivaler al aporte anual de hojarasca ( $6,095 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ). Por tanto, la  $PPN$  de los bosques primarios sería  $21,177 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de biomasa seca que, en términos de los datos de Clark *et al.* (2001), se encuentra en el tercio inferior pantropical.

De igual manera, tomando la información de la pérdida por consumidores y por sustancias volátiles de las cinco parcelas de biomasa más baja ( $44,8 \text{ t/ha}$ ), la pérdida por consumidores se estima en  $0,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de carbono ( $0,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de biomasa) y la pérdida por sustancias volátiles en  $0,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de carbono ( $0,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de biomasa). Si como mínimo los detritos finos caídos equivalen a los encontrados en el piso ( $4,951 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  Tabla 3), la  $PPN$  para los bosques secundarios sería  $13,860 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  de biomasa seca, localizándose también en el tercio inferior del rango pantropical de Clark *et al.* (2001).

**TABLA 6.** Tasa anual de incremento neto de la biomasa aérea (TINBA) en  $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$  desde el diámetro normal  $D \geq 1\ cm$ , de 32 parcelas permanentes en bosques primarios. Período: 1999/2000 – 2000/2001. Nota: Á. = árboles y otras plantas erectas leñosas, excepto palmas, con  $D \geq 1\ cm$ ; P.M.L. = palma mil pesos (*Oenocarpus bataua*); O.P. = otras palmas; B = bejuco con  $D \geq 1\ cm$ .

	D Sobrevivientes				D Ingresos				D Muertos				Cortados				TINBA
	Á.	P.M.P.	O.P.	B.	Á.	P.M.P.	O.P.	B.	Á.	P.M.P.	O.P.	B.	A.	P.M.P.	O.P.	B.	
$\bar{X}$	9,049	0,113	0,528	0,164	1,168	0,291	0,498	0,060	0,070	0,161	0,008	0,031	0,000	0,131	0,000	0,004	12,006
%CV <sup>a</sup>	35,68	152,2	143,4	161,1	262,5	321,4	290,6	377,0	545,7	554,6	439,5	608,8		565,7		565,7	36,63
$\sum^b$			9,854				2,017				0,270			0,135			

<sup>a</sup> Coeficiente de variación.

<sup>b</sup>  $9,854 + 2,017 + 0,270 - 0,135 = 12,006$

**TABLA 7.** Tasa anual de incremento neto de la biomasa aérea (TINBA) en  $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$  desde el diámetro normal  $D \geq 1\ cm$ , de 73 parcelas permanentes en bosques secundarios. Período: 1999/2000 - 2000/2001. Nota: Á. = árboles y otras plantas erectas leñosas, excepto palmas, con  $D \geq 1\ cm$ ; O.P.= otras palmas; B = bejuco con  $D \geq 1\ cm$ .

	D Sobrevivientes			D Ingresos			D Muertos			Cortados			TINBA
	Á.	O.P.	B.	Á.	O.P.	B.	Á.	O.P.	B.	Á.	O.P.	B.	
$\bar{X}$	5,909	0,032	0,172	0,102	0,00	0,036	- 0,002	0,000	- 0,001	0,058	0,000	0,000	6,191
%CV <sup>a</sup>	55,8	839,3	170,3	299,4		825,2	838,6		109,2	584,7			55,95
$\sum^b$		6,113		0,138			- 0,003			0,058			

<sup>a</sup> Coeficiente de variación.

<sup>b</sup>  $6,113 + 0,138 - 0,003 - 0,058 = 6,191$

## Agradecimientos

Esta investigación se realizó dentro de la línea de investigación Bosques y Cambio Climático, proyecto "Eficiencia de las Coberturas en la Asimilación de CO<sub>2</sub>, Central Hidroeléctrica Porce II", dirigido por los autores y cofinanciado por las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Contrato 3/DJ-1367/17, Acta 19.

## Literatura citada

- ALEMDAG, I. S. 1980. Manual of data collection and processing for the development of forest biomass relationship. Canadian Forest Service, Patawaw National Forest Institute, Information Report PI – 4.
- ÁLVAREZ, E. 1993. Composición florística, estructura y biomasa de un bosque inundable en la Amazonia colombiana. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Medellín.
- ATTIWILL, P. M, AND J. D. OVINGTON. 1968. Determination of forest biomass. *Forest Science* 14: 13 – 15.
- BEERS, T.W. 1962. Components of forest growth. *Journal of Forestry* 60: 245 – 248.
- BELL, J.F., A. L. EK, H.C. HITCHCOCK, K. L. MACMILLAN, CH. I. MILLER, AND J. W. MOSER. 1984. Section on timber measurement. *In* K. F. Wenger (Ed.). *Forestry Handbook*, pp. 253 – 360. Wiley & Sons, New York.
- BERROUET, L. M., Y L. M. LOAIZA. 2000a. Cálculo del tamaño de muestra. *In* S. Orrego y J. I. del Valle (Eds.). Proyecto Eficiencia de las Coberturas Vegetales en la Asimilación del CO<sub>2</sub>. Informe de Actividades N° 7, pp. 16 – 27. Empresas Públicas de Medellín E.S.P. – Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- BERROUET, L. M., Y L. M. LOAIZA. 2000b. Relaciones alométricas. *In* S. Orrego y J. I. del Valle (Eds.). Proyecto Eficiencia de las Coberturas Vegetales en la Asimilación del CO<sub>2</sub>. Informe de Actividades N° 7, pp. 29 – 37. Empresas Públicas de Medellín E.S.P. – Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- BOTKIN, D. B. 1993. *Forest Dynamics : An ecological model*. Oxford Univ. Press, Oxford, U. K.
- BROWN, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. FAO Forestry Paper 134, FAO, Rome.
- BROWN, S., AND A.E. LUGO. 1982. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14: 161-187.
- \_\_\_\_\_. 1985. Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. *Canadian Journal of Forestry Research* 16: 390-394.
- CLARK, D. A., S. BROWN, D. W. KICKLIGHTER, J. Q. CHAMBERS, J. R. THOMLINSON, J. NI, AND E. HOLLAND. 2001. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications* 11 (2): 371 – 384.

- CLARK, D.B., AND D. A. CLARK. 2000. Landscape – scale variation in forests structure and biomass in a tropical rain forest. *Forest Ecology and Management* 137: 185 – 198.
- COLORADO, G. J. 2001. Ecuaciones de biomasa aérea para los árboles de los bosques secundarios del área de influencia de la Central Hidroeléctrica Porce II. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Forestal. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (en preparación).
- DEL VALLE, J. I. 2001a. Cantidad, calidad y nutrientes reciclados por la hojarasca fina en bosques pantanosos, Colombia. Sometido a la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.
- DEL VALLE, J. I. 2001b. Descomposición de la hojarasca fina en bosques pantanosos del Pacífico colombiano. Sometido a Biotropica.
- DUIVENVOORDEN, J. F., AND J. M. LIPS. 1995. A land ecological study of soil, vegetation and plant diversity in colombian Amazonia. Tropenbos, Wageningen.
- FINEGAN, B. 1997. Bases ecológicas para el manejo de bosques secundarios en zonas húmedas del trópico americano, recuperación de la biodiversidad y producción sostenible de madera. *In* V. Carazo y I. B. Zapata (Eds.). *Memorias del Taller Internacional sobre el Estado Actual y Potencial del Manejo y Desarrollo del Bosque Secundario Tropical en América Latina*, pp. 106 – 119. TCA, Consejo Centroamericano de Bosques y Áreas Protegidas, DGIS, GTZ, Pucallpa, Perú.
- FONTAINE, R. G., A. GÓMEZ – POMPA, AND B. LUDLOW. 1978. Secondary successions *In* Unesco/UNEP/FAO (Eds.). *Tropical Forest Ecosystems: A State – of – Knowledge Report*, pp. 216 – 232. Unesco – UNEP, París.
- GALEANO, P. E. 1995. Ecuaciones de biomasa de los bosques de Guandal: informe técnico. Programa de Investigación, Proyecto Bosques de Guandal PNUD/Col/89/011. Convenio Universidad Nacional – PNUD – Corponariño, Medellín.
- HASHIMOTIO, T., K. KOJIMA, T. TANGE, AND S. SASAKI. 2000. Changes in carbon storage in fallow forests in tropical lowland of Borneo. *Forest Ecology and Management* 126: 231-337.
- HERRERA, M. A. 2000. Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques primarios y secundarios. *In* S. Orrego y J. I. del Valle (Eds.). *Proyecto Eficiencia de las Coberturas Vegetales en la Asimilación del CO<sub>2</sub>*. Informe de Actividades N° 7, pp. 103 – 118. Empresas Públicas de Medellín E.S.P. – Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- HOUGHTON, G., J. G. JENKINS, AND J. J. EPHRAMES. 1990. *Climate change: the IPCC scientific assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- HUGHES, R. F., J. F. KAUFFMAN, AND V. JARAMILLO. 1999. Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of México. *Ecology* 80: 1892-1907.
- IPCC. 2000. *Special Report on Emissions Scenarios*.  
<http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>.
- KOECHLIN, J. 1979. Phenology and primary production. *In* Unesco (Ed.). *Tropical Grazing Land Ecosystems*, pp. 118-145. Unesco/UNEP/FAO, París.
- LARA, W. 2000. Carbono orgánico en suelos de rastrojos, bosques secundarios y bosques primarios. *In* S. Orrego y J.I. del Valle (Eds.). *Proyecto Eficiencia de las Coberturas Vegetales*

- en la Asimilación del CO<sub>2</sub>. Informe de Actividades No. 7, pp.120-137. Empresas Públicas de Medellín E.S.P. – Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- MACDICKEN, K.G. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International Institute for Agricultural Development, Arlington.
- MÁRQUEZ, L., AND A. ROY. 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Fundación Solar, Guatemala.
- MÜLLER, E., y M. SOLIS. 1997. Estudios de caso: los bosques secundarios de Costa Rica. *In* V. Carazo y I. B. Zapata (Eds.). Memorias del Taller Internacional sobre el Estado Actual y Potencial del Manejo y Desarrollo del Bosque Secundario Tropical en América Latina, pp. 119 – 158. TCA, Consejo Centroamericano de Bosques y Áreas Protegidas, DGIS, GTZ, Pucallpa, Perú.
- NEWBOULD, P. J. 1967. Methods for estimating the primary production of forests. International Biological Program, Oxford.
- ORREGO, S. A., L.F. JARAMILLO, Y L.M. LOAIZA. 1998. Venta de servicios ambientales: posibilidades y limitaciones para el departamento del Chocó. Fundación Espavé e Instituto de Investigaciones del Pacífico, Quibdó, Colombia.
- ORTÍZ, R. 1997. Costa Rican secondary forest: an economic option for joint implementation activities to reduce atmospheric CO<sub>2</sub>. Beijer Seminar, Punta Leona, Costa Rica, November 1997, 18 p.
- PHILLIPS, O. L., Y. MALHI, N. HIGUCHI, W. F. LAURANCE, P. V. NÚÑEZ, R. M. VÁSQUEZ, S. G. LAURANCE, L. V. FERREIRO, M. STERN, S. BROWN, AND J. GRACE. 1998. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long – term plots. *Science* 282: 439 – 442.
- PREBBLE, C. 1998. Cambios climáticos: el factor bosque. *Actualidad Forestal Tropical* 6: 2-5.
- PROCTOR, J. 1983. Tropical forest litterfall I. Problems of data comparison. *In* S.L. Sutton, T.C. Whitmore, and A.C. Chadwick (Eds.). *Tropical Rain Forest: Ecology and Management*, pp. 267-273. Blackwell Scientific, Oxford.
- ROSENZWEIG, C., AND D. HILLEL. 2000. Soils and global climate change: challenges and opportunities. *Soil Science* 165 (1): 47 – 56.
- SALDARRIAGA, J. G. 1994. Recuperación de la selva de “Tierra Firme” en el alto río Negro Amazonia Colombiana – Venezolana. Tropenbos, Colombia. *Estudios en la Amazonia Colombiana*, Santafé de Bogotá.
- SÁNCHEZ, P. 1976. Properties and management of soils in the tropics. Wiley & Sons, New York.
- SATOO, T., AND H. A. I. MADGWICK. 1982. Forest biomass. Martinus Nijhoff/Dr. Junk Publisher. The Hague.
- SIERRA, C. 2001. Biomasa radical de los bosques secundarios del área de influencia de la Central Hidroeléctrica Porce II. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Forestal. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (en preparación).
- SIERRA, C. A., Y HERNÁNDEZ, P. A. 2000. Biomasa de raíces gruesas en árboles del bosque secundario. *In* S. Orrego y J. I. del Valle (Eds.). Proyecto Eficiencia de las Coberturas

Vegetales en la Asimilación del CO<sub>2</sub>. Informe de Actividades N° 7, pp. 81 – 101. Empresas Públicas de Medellín E.S.P. – Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

SIPS, P. 1997. Management of secondary rain forests in Latin America. *In* V. Carazo y J. B. Zapata (Eds.). Memorias del Taller Internacional sobre el Estado Actual y Potencial de Manejo y Desarrollo del Bosque Secundario Tropical en América Latina, pp. 230 – 272. TCA, Consejo Centroamericano de Bosques y Áreas Protegidas, DGIS, GTZ, Pucallpa, Perú.

ZAPATA, M. 2000. Ecuaciones de biomasa aérea para bosques primarios. *In* S. Orrego y J. I. del Valle (Eds.). Proyecto Eficiencia de las Coberturas Vegetales en la Asimilación de CO<sub>2</sub>, pp.48-79. Empresas Públicas de Medellín E.S.P. – Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

ZAPATA, M. 2001. Ecuaciones de biomasa aérea para los bosques primarios del área de influencia de la Central Hidroeléctrica Porce II. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Forestal. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (en preparación).