

PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA AÉREA EN ALGUNOS ECOSISTEMAS Y ESTIMACIONES DE BIOMASA EN PLANTACIONES FORESTALES

José Salas R.^{1,2} Angel Infante C.²

RESUMEN

El presente trabajo tiene por finalidad realizar una revisión de los diversos métodos para estimar la producción aérea vegetal y la biomasa, en vista de que es una necesidad la determinación de la productividad de los diversos ecosistemas terrestres que cumplen una función de almacenamiento de carbono para ofrecer medidas que conlleven a la mitigación de uno de los problemas globales más importantes de esta época como es el calentamiento global. Se predice que, este fenómeno afectará la estructura y funcionamiento de los ecosistemas trayendo consecuencias nefastas para la humanidad. Esta investigación contempla la revisión de los métodos para estimar la producción primaria neta en diferentes tipos de ecosistemas, tomando en consideración la tasa de reemplazo, bien sea rápida o lenta, mediante el uso de métodos directos destructivos e indirectos no destructivos. Para el caso de los bosques, se incluyen métodos que se refieren a la determinación de la biomasa de la hojarasca y del componente madera. También se indican diversas ecuaciones alométricas que se han derivado para la estimación de la biomasa.

Palabras claves: métodos, biomasa, productividad, tasa de reemplazo, bosques tropicales, plantaciones forestales.

^{1,2} Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), Postgrado de Ecología Tropical. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE)². Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes. Mérida – Venezuela. e-mail: salasi@inia.gob.ve.

² Postgrado de Ecología Tropical. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE)². Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes. Mérida – Venezuela. e-mail: infantea@ula.ve

ABOVEGROUND NET PRIMARY PRODUCTION IN SOME ECOSYSTEMS AND BIOMASS ESTIMATION IN FOREST PLANTATIONS

José Salas R.^{1,2} Angel Infante C.²

SUMMARY

The aim of this essay is to carry out a review of different methods for estimating aboveground production, taking into consideration the need of determining diverse terrestrial ecosystem production that has a carbon storage function for offering measures to mitigate one of the most important global problems at the present time like global warming. It is predicted that this phenomenon will affect ecosystem structure and functioning, bringing about bad consequences for mankind. This review comprises methods for estimating net primary production in different ecosystems, taking into account fast turnover, be it fast or slow by means of use of direct destructive and non-destructive methods. For the case of forests, methods referred to litter and wood biomass estimation are indicated. Moreover, diverse allometric equations derived for estimating biomass are indicated.

Key words: methods, biomass, production, turnover, tropical forests, forest plantations.

^{1,2} Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), Postgrado de Ecología Tropical. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE)². Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes. Mérida – Venezuela. e-mail: salasi@inia.gob.ve.

² Postgrado de Ecología Tropical. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE)². Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes. Mérida – Venezuela. e-mail: infantea@ula.ve

INTRODUCCIÓN

Una necesidad importante actual es desarrollar un mejor entendimiento de la producción primaria neta (PPN) en los bosques del mundo, ecosistemas que juegan un gran papel en el balance de carbono global (Dixon *et al.*, 1994). La producción primaria neta es la diferencia entre la fotosíntesis total (producción primaria bruta, PPB) y la respiración total de las plantas en un ecosistema. En el campo, no es posible medir la producción primaria neta del bosque en términos de esta diferencia (Waring y Schelesinger 1985). Por otra parte, la PPB no puede ser medida directamente (Ryan 1991) y estimar la respiración total de las plantas a nivel de ecosistema sigue siendo difícil e involucra incertidumbres significativas.

De acuerdo con Clark *et al.*, (2001a), la PPN se define como la nueva materia orgánica total producida en un intervalo específico. Aunque los componentes de esta producción se pueden conceptualizar como se indica en la figura 1, no puede medirse directamente en el campo debido a las transformaciones (consumo, descomposición, mortalidad, exportación). En la práctica, pocos componentes de la PPN son medidos en estudios de campo en los ecosistemas forestales. Mayormente, las mediciones se restringen a la hojarasca fina y el incremento de la biomasa aérea y la suma es el equivalente considerado a la PPN aérea. Los componentes subterráneos son a menudo ignorados o estimados como una proporción teórica de los valores de la parte aérea.

De acuerdo con Prince y Zheng (2006), la PPN es un componente importante del ciclo del carbono y entre los depósitos y flujos que forman el ciclo, es uno de los pasos más accesibles para la medición en el campo. Sin embargo, las mediciones de la PPN son tediosas y poco prácticas en grandes áreas, así que los modelos se usan generalmente para estudiar el ciclo del carbono a escala global. Los modelos requieren mediciones de campo de la PPN para la parametrización, calibración y validación.

La biomasa y la productividad, aunque muy diferentes, a menudo se confunden. En parte, esta confusión surge porque la biomasa se usa para estimar la productividad en algunos casos. Por otra parte, la biomasa de una comunidad de plantas se define como su masa seca total. Incluye el follaje, ramas, troncos y raíces, pero excluye la hojarasca y la materia orgánica en descomposición (Whitmore, 1975). Es el peso del material vegetal vivo aéreo y subterráneo contenido en una unidad de área en un punto dado del tiempo (Roberts *et al.*,

1985). Generalmente, se hace la distinción entre biomasa aérea y biomasa subterránea, tanto en aspectos conceptuales como metodológicos.

En consecuencia, la producción primaria neta es todo el carbono asimilado después de haber descontado los gastos por mantenimiento foliar, es decir, la respiración. Por otra parte, la biomasa es la parte de la producción primaria neta que la planta destina a la producción de estructuras, es decir que se acumula. También la biomasa se define como la cantidad total de materia orgánica viva de un sistema biológico presente en un momento dado. Se puede dividir en zoomas y fitomasa según el aporte de los animales y plantas, siendo la fitomasa la mayor proporción de materia orgánica en la biomasa total. La fitomasa se puede separar en fitomasa aérea (aporte de las hojas, ramas y tallos) y fitomasa subterránea (raíces, raicillas, rizomas y tallos subterráneos), expresándose en términos de peso de materia seca por unidad de área (árbol, hectárea, región). Además, la producción primaria representa la mayor entrada de carbono y energía en los ecosistemas. MacNaughton *et al.*, (1989), propuso la producción primaria neta como la variable integradora del funcionamiento de todo el ecosistema debido a sus relaciones con la biomasa animal, la producción secundaria y el ciclo de nutrientes.

Las plantas usan la energía almacenada en compuestos orgánicos fijados en la fotosíntesis para la respiración autótrofa. El balance entre la fijación del carbono en la fotosíntesis y la pérdida de carbono en la respiración de la planta es la producción primaria neta (Sala *et al.*, 2000). Las plantas pierden carbono a través de varias vías aparte de la respiración. La más grande de estas liberaciones es la transferencia del carbono de las plantas al suelo. Esto ocurre a través de la caída de hojas, mortalidad de otras estructuras de la planta, exudación de raíces y transferencias de carbono a los microbios.

Esta revisión comprende los métodos para estimar la producción primaria neta en diferentes tipos de ecosistemas, tomando en cuenta la tasa de reemplazo, bien sea rápida o lenta, mediante el uso de métodos directos destructivos e indirectos no destructivos. Se describen los métodos de estimación de la biomasa, tanto para bosques naturales como para plantaciones, considerando la información que debe obtenerse directamente de levantamientos de campo y a partir de inventarios de vegetación. Para el caso de los bosques, mayormente se incluyen aquellos métodos que se refieren a la determinación de la biomasa de la hojarasca y del componente madera. También se indican diversas ecuaciones alométricas que se han derivado para la estimación de la biomasa.

1. Compartimientos de la Producción Primaria Neta (PPNA)

La estimación de la producción primaria neta comprende dos niveles referidos a la producción aérea y subterránea. Cada nivel se estudia considerando los diversos compartimientos. Para el caso de la producción primaria neta aérea, mayormente, se toman en cuenta los incrementos y las pérdidas. De manera más detallada, la figura 1 indica los diversos compartimientos de la producción primaria neta aérea de un bosque. La suma de todos los materiales representa la (i) la cantidad de nueva materia orgánica que es retenida por las plantas vivas al final del intervalo y (ii) la cantidad de materia orgánica que fue producida y perdida durante el mismo intervalo. En la práctica, pocos componentes de la PPNA son medidos. Frecuentemente, las mediciones se restringen a la hojarasca fina y el incremento de la biomasa aérea.

2. Métodos para Estimar la Producción Primaria Neta Aérea

Para estimar la producción primaria neta aérea existen dos categorías que dependen de la tasa de reemplazo de la biomasa. Los pastizales y estepas están entre los ecosistemas de tasa de reemplazo rápida con altas proporciones de PPNA/biomasa y están caracterizados por individuos pequeños de vida relativamente corta. En contraste, los bosques pertenecen al grupo de tasa de reemplazo lenta con proporciones de PPNA/ biomasa bajas y grandes individuos de vida relativamente larga. Los ecosistemas de arbustales son intermedios entre los pastizales y los bosques y usualmente requieren el uso de un método híbrido que combina aquéllos de los ecosistemas con tasa de reemplazo rápida y lenta (Sala *et al.*, 2000). Por otra parte, existen otros métodos para estimar la PPN, que incluyen la relación entre fotosíntesis y evapotranspiración, como es el caso del modelo PnET, que considera la dinámica del carbono, el agua y el nitrógeno en los ecosistemas forestales. Este modelo puede usarse para predecir las respuestas temporales en la producción primaria neta (Aber *et al.*, 2005).

2.1 Métodos para Estimar la PPNA en Ecosistemas con Tasa de Reemplazo Rápida.

Singh *et al.*, (1975), revisó ampliamente los métodos para estimar la PPNA usados durante el Programa Biológico Internacional (PBI) y describió los efectos de los diferentes métodos en la estimación de PPNA a lo largo de deferentes sitios PBI.

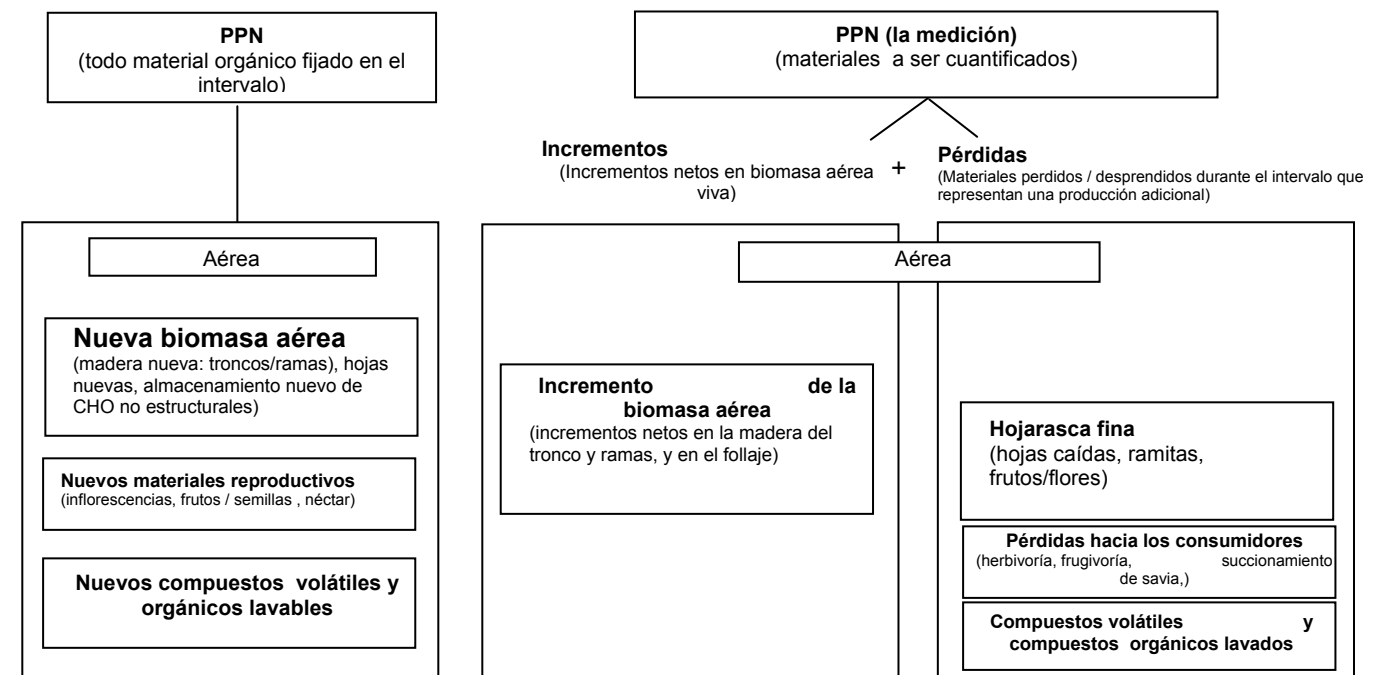


Figura 1. Componentes de la Producción Primaria Neta Aérea de un Bosque. CHO: Carbohidratos. Adaptado de: Clark *et al.*, (2001a).

2.1.1 Pico de Biomasa

Es el método más simple para estimar la PPNA y consiste en evaluar la biomasa pico e igualar este valor con su producción anual. Este método asume que la mínima biomasa es cero o cerca de cero y que incrementa hasta un punto (o pico de biomasa) después que la senescencia ha comenzado. Se aplica en ecosistemas herbáceos y estacionales. Por otra parte, asume que no existe transferencia de una estación de crecimiento a otra. Es un método sencillo y de bajo costo. Este método puede aplicarse solamente dentro de ciertos rangos de biomasa, es decir, para las estepas de pastizales templados (Scurlock *et al.*, 2002). Es un subestimador de la magnitud de la PPNA.

2.1.2 Biomasa Máxima y Mínima

Este método indica que no hay transferencia y se estima una biomasa mínima y una máxima. Luego, la PPNA se calcula como la diferencia entre la biomasa máxima y mínima. Se toma en cuenta también un incremento monótonico de biomasa a partir de un mínimo valor a un máximo, y la separación en el tiempo de los procesos de producción y senescencia (Sala *et al.*, 2000).

2.1.3 Determinaciones Secuenciales

Este método toma en cuenta el incremento de biomasa monótonico y la suma de todas las diferencias entre picos de biomasa sucesivos. Una hipótesis importante de los tres métodos anteriores es que la producción, senescencia y descomposición ocurren en diferentes períodos durante la estación de crecimiento. Es importante indicar que los ecosistemas multiespecies, sometidos a una gran variedad de estreses, la producción y la senescencia ocurren simultáneamente. Nuevas hojas emergen al mismo tiempo que otras envejecen o caen al suelo (Sala *et al.*, 2000).

2.1.4 Suma de los Incrementos Positivos de la Biomasa

Este método contempla que la mayor parte del crecimiento ocurre en intervalos de tiempo sucesivos. El crecimiento simultáneo y la muerte no ocurren. La producción primaria nunca es negativa durante un intervalo de muestreo. Se ignora la necromasa. Se realizan varios muestreos a lo largo del año a intervalos regulares de tiempo. Permite estimar la biomasa para

distintas fases de crecimiento en el año, pero no contabiliza el crecimiento de nuevos brotes durante períodos de alta mortalidad (Scurlock *et al.*, 2002).

La desventaja que posee es que subestima la producción porque no considera la descomposición, la mortalidad, exudados y la necromasa. Este método establece que no existe crecimiento y muerte simultánea. Si hay un sistema altamente productivo con una tasa de reemplazo muy alta, entonces no puede medirse la producción. Deben evitarse las comparaciones entre los pastizales templados que poseen cambios estacionales marcados en biomasa y pastizales tropicales, donde la biomasa no cambia mucho a pesar de una alta tasa de reemplazo (Scurlock *et al.*, 2002).

2.1.5 Suma de los Incrementos Positivos en Biomasa y Necromasa

Este método indica que el crecimiento, la mortalidad y la descomposición no ocurren simultáneamente, es decir, existe una tasa de reemplazo continua. La PPN nunca es negativa durante el intervalo. Este método ignora la producción subterránea. En el método 1.5 la mortalidad se refiere a los cambios en la materia muerta en pie. Produce un estimado completo de la dinámica de la biomasa que incluye la mortalidad y descomposición. El método 6 toma en cuenta la hojarasca (Scurlock *et al.*, 2002). Estos métodos son recomendados para estimar la PPN en un amplio rango de sitios, sin subestimar la producción porque toman en consideración la biomasa y necromasa.

2.1.6 Suma de los Cambios en Biomasa y Necromasa y Ajuste por Descomposición

Este método establece que los cambios medidos en los parámetros son estadísticamente significativos durante el intervalo de muestreo y la tasa de descomposición es constante e independiente de la composición de la necromasa. Ignora además, la biomasa subterránea. Este es el único método que incorpora todos los componentes requeridos para una estimación exacta de la PPN y tiene la posibilidad de mejorar los estimados mediante la modelización de la descomposición usando información de otros sitios similares (Scurlock *et al.*, 2002). El cuadro 1 resume los algoritmos descritos anteriormente, para la estimación de la producción primaria neta en pastizales.

Cuadro 1. **Resumen de Algoritmos Empleados en la Estimación de la PPN en Pastizales**

MÉTODO	CÁLCULO	REFERENCIA
Pico de biomasa	Máximo (biomasa aérea)	Sing <i>et al</i> (1975); Long <i>et al</i> (1989)
Biomasa máxima y mínima	Máximo (biomasa aérea + necromasa) Máximo (biomasa aérea + nueva necromasa) Máximo (biomasa total)	Lucera <i>et al</i> (1967); Long <i>et al</i> (1989)
Determinaciones secuenciales	Máximo (biomasa aérea) - Mínimo (biomasa aérea)	Sing <i>et al</i> (1975); Long <i>et al</i> (1989)
Suma de incrementos positivos de biomasa	Suma (Incrementos positivos de biomasa)	Milner y Hughes (1968)
Suma de incrementos positivos de biomasa, necromasa y hojarasca	Suma (Incrementos positivos de biomasa + necromasa o necromasa total)	Sing <i>et al</i> (1975)
Suma de cambios en biomasa y necromasa con ajuste por descomposición	Suma (cambio de la biomasa aérea + + cambio en la necromasa total + [tasa relativa de descomposición aérea x necromasa total])	Long <i>et al</i> (1989); Weigert y Evans (1964)

Tomado de: Scurlock *et al.*, (2002).

2.2 Métodos para Estimar la PPNA en Ecosistemas con Tasa de Reemplazo Lenta

Los ecosistemas con marcadas diferencias en la tasa de reemplazo de sus componentes aéreos representan un reto para evaluar efectivamente la producción primaria. De esta forma, los bosques, tierras arboladas y arbustales tienen dos componentes separados de la producción primaria aérea: las hojas que son producidas en un intervalo de tiempo dado y el incremento en madera. Cada uno tiene una tasa de retorno y metodologías diferentes (Sala *et al.*, 2000).

2.2.1 Producción de Hojarasca

Las estimaciones de producción de hojas y pequeñas ramas en los bosques usualmente abarcan el uso de cestas o trampas de hojarasca distribuidas en el sotobosque. El objetivo es recolectar hojas durante un determinado tiempo de por lo menos un año, representando la hojarasca la producción aérea. Debe tenerse en cuenta la estacionalidad de la hojarasca, la tasa de descomposición y los factores climáticos a la hora de realizar las recolecciones (Sala *et al.*, 2000), así como las condiciones de equilibrio o sucesionales de los ecosistemas.

La estimación de producción de hojarasca se realiza por superficie y es la única que no requiere la estimación de la densidad de los individuos. Deben efectuarse cosechas periódicas, especialmente para evitar la pérdida de material por descomposición. Lo recomendable es considerar un período de 15 días. La forma y superficie de las cestas depende de varios factores. Se usan de forma geométrica regular (Renolfi *et al.*, 1986).

En cuanto a las ventajas de este método, Renolfi *et al.*, (1986) indican las siguientes: no destruye el material bajo evaluación, no requiere la estimación de la densidad de las especies leñosas, permite el análisis estadístico de los resultados obtenidos y es un buen método para correlacionar 2 a 3 años de mediciones con datos anuales de lluvia. Por otra parte, las principales desventajas son: sólo es útil para especies caducifolias, requiere recolecciones frecuentes por la descomposición del material y supone condiciones de equilibrio.

Anderson y Ingram (1993); explican el procedimiento de campo para recolectar la hojarasca compuesta por hojas, pequeñas ramas, estructuras reproductivas y

cenizas. En cuanto a las trampas pueden ser bolsas o cajas con una abertura de 0,25- 1m². Una construcción circular es mejor pues minimiza los efectos de borde. Las trampas deben permitir el buen drenaje de la lluvia con una rejilla de densidad de 1 mm para retener las fracciones finas de hojarasca. El procedimiento es el siguiente (Anderson y Ingram, 1993):

- Se sitúan las trampas al azar con parcelas homogéneas o en un patrón al azar estratificado (10 trampas por subparcela) en los lugares donde es necesario incluir la mayor variación en topografía, suelos y estructura de la vegetación. Newbould (1967) recomienda 20 trampas por parcela para alcanzar el 5% de error estándar alrededor de la media. En lugares heterogéneos, se sugiere una cantidad mayor.
- Recolectar la hojarasca cada 2 semanas y secarla al aire. Recolecciones más frecuentes es necesario para la hojarasca que se descompone rápidamente (algunos árboles leguminosos).
- Clasificar el material seco en: hojas (incluye pecíolos y raquis foliar, ramas pequeñas menores de 2 cm de diámetro y corteza, estructuras reproductivas (flores y frutos), cenizas (fracciones menores de 5 mm).
- Secar las submuestras de hojarasca en estufa para obtener factores de corrección del contenido de humedad.
- Expresar todas las fracciones definidas anteriormente sobre una base seca en estufa g/m²/año⁻¹ o t/ha⁻¹/año⁻¹ con 95% de límites de confianza.
- Estimar la caída de las ramas a partir de cuadrantes en el terreno, por ejemplo, 100 m². Romper las ramitas a los 2 cm de diámetro, pesar el material de diámetro mayor de 2 cm, submuestrear para la masa seca al horno y otras determinaciones que son requeridas.

Para estimar la producción de hojas se ha desarrollado otra técnica de doble muestreo referido al índice de área foliar (LAI) que es el área en metros cuadrados de área de hoja por metro cuadrado del área de suelo. Se estima al medir la intensidad de luz en el fondo y en el tope del dosel usando un dispositivo comercial llamado analizador del dosel vegetal (Sala *et al.*, 2000). El LAI es modelado usando la siguiente ecuación:

$$\frac{IL}{IO} = e^{-kLAI} \quad (L)$$

Donde IL es la luz incidente al fondo del dosel; IO es la luz incidente en el tope del dosel y K es el coeficiente de extinción de luz, que varía de acuerdo con el tipo de vegetación y el ángulo de inclinación de las hojas. Los cambios en LAI en el tiempo pueden ser convertidos en biomasa de hojas y usarse para representar la producción de hojas en los bosques. La curva de calibración LAI vs biomasa es difícil de realizar en ecosistemas boscosos. Es necesario indicar que el componente que más se ha medido para la estimación de la PPNA es la hojarasca fina, sobre todo en bosques tropicales (Clark *et al* 2001a). Sin embargo, Proctor (1983, 1984) expresa que la documentación incompleta y la variación en los tipos de material recolectado hacen que la interpretación de los datos sea problemática.

En 21% de 34 estudios de una muestra con datos de hojarasca, los investigadores no establecieron lo que fue recolectado como hojarasca. Cuando se definió el componente leñoso, cinco criterios diferentes se habían usado: piezas de ≤ 10 , ≤ 3.5 , ≤ 1 , y ≤ 0.5 cm en diámetro y todo era leñoso. Esta situación afecta las estimaciones. Otro aspecto se refiere a la varianza espacial de la hojarasca en cualquier bosque tropical. En un bosque de tierras bajas en Costa Rica, el análisis de varianza de los datos de dos conjuntos de 10 trampas de 0,5 m² indicaron que cerca de 50 trampas se necesitaban para una parcela de 0,5 ha para medir la hojarasca dentro de un 20% (Clark *et al* 2001a).

2.2.2 Componente Herbáceo y Leñoso

- Estimación de la biomasa de la vegetación herbácea y leñosa (sotobosque).

La vegetación herbácea y leñosa pequeña está conformada por plántulas de regeneración de los árboles de los bosques más desarrollados y son el comienzo de la sucesión en áreas desprovistas de una cobertura vegetal más compleja. Está conformada por gramíneas, helechos, pequeños arbustos, bejucos, pequeñas plantas y regeneración de árboles cuyo diámetro normal D (a 1,30 m de altura) o altura total sean menores de un límite determinado (Brown y Lugo, 1982; Herrera *et al.*, 2003).

Este límite puede cambiar en diferentes estudios, como el realizado por Woomey y Palm (1998), en el cual el diámetro máximo de la vegetación herbácea fue 2,5 cm. Hashimoto *et al* (2000) cosecharon plantas con circunferencias < 10 cm ($D < 3,18$ cm), Álvarez (1993) menor de 3 m y (Hughes *et al.*, 1999) con altura $< 1,3$ m. En un estudio realizado por

Hashimoto *et al.*, (2000), se establecieron 15 parcelas de 10m x 10m donde se cosecharon todas las plantas con un D <3,18 cm y en 4 parcelas de 2m x 2m se cosecharon pastos. Las parcelas de este trabajo se distribuían en edades desde 1 hasta 12 años, y se presenta un modelo logístico que describe el comportamiento de la biomasa aérea mediante la fórmula:

$$Y = \frac{K}{(1 + e^{a - bt})}$$

Donde Y es la biomasa aérea (t/ha), $K = 53$; $a = 1,86$; $b = 0,36$ ($R^2 = 0,97$) y t es la edad en años de la vegetación de las parcelas. Para estimar las alturas de las plantas leñosas se emplean varas extensibles, flexómetros y clinómetros.

2.2.3 Componente Leñoso: Árboles de Palma

Las palmas son comunes en los bosques húmedos y perhúmedos tropicales. Presentan cuatro formas generales de crecimiento que son: (1) palmas arbóreas del dosel; (2) palmas arbustivas del sotobosque; (3) palmas acaules con tallo subterráneo o muy corto; (4) palmas trepadoras. Estas categorías no son absolutas (Dransfield, 1978).

La estimación de la biomasa es difícil puesto que se han hecho pocos estudios. Para ello, se necesitan mediciones de altura y de diámetro. Las relaciones diámetro–altura varían entre los distintos tipos de palma: arbóreas y arbustivas o solitarias o cespitosas, además de variar entre especies con formas similares de crecimiento. Se han estimado algunas ecuaciones de biomasa de palmas en función de altura como la única variable independiente (Frangi y Lugo, 1985). Otros trabajos incluyen el diámetro como variable independiente con un aporte significativo en la explicación de la variación de la biomasa total (Saldarriaga, 1994), o como la mejor variable predictiva (Alvarez, 1993).

Una manera fácil de estimar la biomasa es considerar el volumen del tallo como un cilindro (área basal x altura del tallo) y luego multiplicar por una estimación de la densidad. La densidad de la madera varía considerablemente por especies de 0,25 a casi 1,0 Mg/m³ (Rich 1987). La biomasa de las hojas tiene que añadirse y puede variar de 10 a 65% de la biomasa del tallo (Frangi y Lugo 1985, Rich 1987). El cuadro 2 presenta las ecuaciones de regresión para las palmas y por especie con la finalidad de estimar la biomasa aérea, de estudios realizados de especies de palmas más representativas del dosel bajo y

sotobosque de bosques primarios intervenidos en el área de la cuenca media del río Porce (Colombia). Estos modelos resultaron globalmente significativos. Según la prueba de Goldfeld–Quandt ningún modelo presenta heterogeneidad en los errores. Los modelos para todas las palmas y la especie *Bactris sp* permiten deducir que la variable diámetro puede ser muy útil en la estimación de la biomasa aérea. En el caso de *E. predatoria* la biomasa aérea se puede estimar con bastante precisión mediante la medición del diámetro únicamente. En el caso de *O. mapora*, las dos últimas ecuaciones permiten concluir que el diámetro tiene un aporte marginal relativamente bajo en la explicación de la biomasa aérea (Restrepo *et al.*, 2003).

Cuadro 2. Ecuaciones de Regresión para Todas las Palmas y por Especie para la Estimación de Biomasa Aérea

Estimación de Biomasa Aérea de Palmas	Modelos
Todas las Especies	$\ln(BA) = 0,263 + 1,248 \ln(L)$
	$\ln(BA) = 2,681 + 2,067 \ln(D) + 0,70 \ln(L)$
	$\ln(BA) = 2,008 + 1,260 \ln(Db) + 0,888 \ln(L)$
	$\ln(BA) = - 2,079 + 1,682 \ln(D) + 0,169 L$
	$\ln(BA) = - 1,805 + 1,283 \ln(Db) + 0,170 L$
	$\ln(BA) = - 2,304 + 0,861 \ln(D^2 \times L)$
	$\ln(BA) = - 2,230 + 0,734 \ln(D^2 \times L)$
Especies: <i>Oenocarpus mapora</i>	$\ln(BA) = - 1,303 + 1,033 \ln(L)$
	$\ln(BA) = - 0,552 + 0,90 \ln(L) + 0,952 \ln(D)$
	$\ln(BA) = - 1,714 + 0,786 \ln(D^2 \times L)$
<i>Euterpe predatoria</i>	$\ln(BA) = - 2,008 + 0,888 \ln(L)$
	$\ln(BA) = - 3,057 + 3,013 \ln(D)$
	$\ln(BA) = - 2,304 + 0,861 \ln(D^2 \times L)$
<i>Bactris sp.</i>	$\ln(BA) = - 5,559 + 0,08 \ln(L) + 3,988 \ln(D)$
	$\ln(BA) = - 2,426 + 0,842 \ln(D^2 \times L)$
Componentes: Estipe Copa Hojas	$\ln(Be) = - 3,210 + 1,211 \ln(L) + 1,670 \ln(D)$
	$\ln(Bc) = - 3,146 + 1,882 \ln(Db)$
	$\ln(Bh) = - 3,485 + 1,819 \ln(Db)$

BA, biomasa aérea (Kg); L, longitud del estipe (m); D, diámetro normal (cm); Db, diámetro en la base; Be, biomasa del estipe (Kg); Bc, biomasa de copa (Kg); Bh, biomasa de hojas (kg). Tomado de: Restrepo *et al.*, 2003.

Frangi y Lugo (1985) desarrollaron dos ecuaciones basadas en la altura total o la altura del tallo, utilizando la especie de palma *Prestoea montana*, común de los bosques húmedos de Puerto Rico. Las ecuaciones son:

$$Y(\text{biomasa, Kg}) = 10,0 + 6,4 \times \text{altura total (m)}; n= 25, r^2 = 0,96$$

$$Y(\text{biomasa, Kg}) = 4,5 + 7,7 \times \text{altura del tallo (m)}; n= 25, r^2 = 0,90$$

Estas ecuaciones son adecuadas para estimar la biomasa de palmas cuando el bosque está compuesto principalmente de ellas.

2.2.4. Componente Madera

El desarrollo de métodos para la medición del componente madera de la PPNA en ecosistemas forestales proviene de la evaluación del rendimiento de la madera. Se usa información alométrica de especies importantes económicamente. Este tipo de información puede conducir a estimaciones sesgadas, ya que se emplea el fuste comercial en las estimaciones, no considerándose otros elementos leñosos del individuo, determinando ecuaciones de regresión que relacionan la altura del árbol y el diámetro a la altura de pecho con la biomasa. Cuando no se cuenta con tablas de rendimiento, es necesario medir relaciones alométricas específicas a las especies (forma de los troncos, cambio del diámetro del tronco con la altura). Debido a que las mediciones múltiples son difíciles de realizar, se hace análisis dimensional. Este método abarca la toma de mediciones de parámetros de fácil medición, que cuando se utilizan con ecuaciones de regresión dan información acerca de parámetros difíciles de medir como la biomasa leñosa y los incrementos de crecimiento neto (Sala *et al.*, 2000).

Whittaker y Marks (1975), sugirieron como estimado de la biomasa arbórea la siguiente ecuación:

$$TB = 0,5 * ABH * TH$$

donde, TB es la biomasa arbórea; ABH es el área basal a la altura de pecho y TH es la altura del árbol. De igual manera, la producción arbórea se estima así:

$$PPNT = 0,5 * AWI * TH$$

Donde $PPNT$ es la producción primaria neta y AWI es el incremento anual de la madera (a la altura de pecho). La producción por unidad de área puede estimarse de dos maneras: la primera forma es sumar los incrementos de los árboles individuales en una unidad de área y extrapolar a una base de hectárea. Los incrementos individuales pueden estimarse de estimaciones repetidas. La segunda forma de estimar la producción de madera es hacer estimaciones repetidas del total de biomasa del rodal a través del tiempo.

La producción es otro componente de la PPNA forestal. En algunos casos, la producción de ramas y de tronco pueden estimarse usando ecuaciones de regresión con la altura del árbol y el diámetro. Los investigadores han medido el diámetro de las ramas en la base y la correlacionan con medidas directas del peso seco de la rama (Sala *et al.*, 2000).

Las estepas y los arbustales comparten características de los pastizales y bosques, y usualmente requieren métodos que son híbridos de aquellos usados en ecosistemas con tasas de reemplazo lento y rápido. Generalmente, los dos componentes son evaluados separadamente y se combinan para estimar la producción primaria neta. En caso de los arbustos, Fernández *et al.*, (1991) desarrolló un método para medir la producción de arbustos donde habían cosechado el crecimiento anual de los arbustos (hojas y pequeños retoños) en un cuadrante pequeño (10x25 cm) localizado en la parte superior de varios arbustos individuales. También midieron la altura y dos diámetros de varios individuos. Una vez que hicieron esto, extrapolaron los resultados del cuadrante a individuos de arbustos basados en estudios alométricos y densidades.

3. Estimaciones de Biomasa en Plantaciones Forestales

Si bien los estudios de plantaciones forestales realizados tenían como objetivo la determinación del volumen de madera para fines comerciales, se puede estimar la densidad de biomasa a partir de los datos de estos estudios.

La estimación de la densidad de biomasa en plantaciones puede hacerse usando técnicas similares a aquellas desarrolladas para los bosques nativos. El volumen inventariado puede convertirse en densidad de biomasa aérea mediante la ecuación de densidad de biomasa aérea (t/h) = $VOB * WD * BEF$, sin embargo, la ecuación para el factor de expansión de biomasa (FEB) no funcionará en el caso de plantaciones de latifoliadas, debido a que la forma de los árboles es diferente en bosques manejados y las definiciones de volúmenes inventariados son diferentes también. Por tal razón, se recomienda que el FEB se derive localmente (Brown, S. 1997).

Deben realizarse mediciones de biomasa directas de árboles plantados representativos para probar la validez de las ecuaciones de regresión o desarrollarse ecuaciones de regresión de biomasa locales. En situaciones donde la ausencia de recursos no permite el desarrollo de ecuaciones de regresión de la biomasa, cualquiera de los métodos mencionados pueden usarse, dando estimaciones razonables de la densidad de biomasa aérea.

Las investigaciones relacionadas con la acumulación de biomasa en plantaciones forestales se han incrementado en los últimos años, debido a la importancia de estos ecosistemas como reservorios de carbono (Lugo *et al.*, 1988 y 1990; Schroeder, 1992). Sin embargo, se hace necesario realizar estimaciones de biomasa locales, debido a las variaciones entre formas de los árboles, tipos de plantación y condiciones ambientales.

- Modelos para estimar la biomasa (fitomasa) en plantaciones forestales en Venezuela

El método directo consiste en desarrollar ecuaciones de regresión basadas en la tumba y peso del fuste, ramas y hojas de los árboles en pequeñas parcelas. Se estima la biomasa (Y) para cada árbol con base en el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (H), edad (A) y volumen (V). Debido a la variabilidad de la forma de los árboles y densidad de la madera, son necesarias ecuaciones independientes para cada especie; además, estas ecuaciones deben ser desarrolladas para cada proyecto forestal, considerando las variaciones de

clima y suelo que influyen sobre las características de crecimiento de los árboles (Reynolds *et al*, 2000). El cuadro 3 presenta ecuaciones de regresión para estimar la biomasa de algunas especies forestales en Venezuela.

Cuadro 3. Ecuaciones de Regresión para Estimar la Biomasa de Algunas Especies Forestales en Venezuela.

ESPECIE	LOCALIDAD	ECUACIÓN	REFERENCIA
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Ospino, Portuguesa	$Y \text{ (kg/árbol)} = 0,024 * D1,2916 * H1,6949 - 0,0148 * [d2,9547 / D0,9547] * (H-1,3)$	Reynolds <i>et al</i> 2000
<i>Gmelina arborea</i>	Ospino, Portuguesa	$Y = 0,1099 * D1,4182 * H0,3953 * A0,6264 - 0,02 * [d2,6705 / D0,8999] * (H-1,3)$	Reynolds <i>et al</i> 2000
<i>Pinus caribaea</i>	Uverito, Monagas	$\log Y = 1,128416 * \log V + 3,020219$ ($r^2 = 0,94$)	Albarrán y Zerpa, 1992
<i>Tectona grandis</i>	Caparo, Barinas	$\ln Y = -3,443 + 2,789 \ln D$	Hase y Folster, 1983

Tomado de: Arends (2003).

Mediante el método indirecto, utilizando datos de inventarios forestales, se estima la biomasa en función del volumen de madera, densidad de la madera, edad de la plantación y la zona de vida. Mediante este método, se han desarrollado ecuaciones de regresión para estimar biomasa de fustes, en base a la edad (A) para algunas especies plantadas en zonas tropicales (Lugo *et al*, 1988). Las ecuaciones pueden verse en el cuadro 4.

A través del método indirecto, se estimó la biomasa para las principales especies nativas y exóticas, que actualmente están establecidas como plantaciones forestales en Venezuela. Para realizar las estimaciones se siguió el siguiente procedimiento:

- Se determina el volumen de madera existente por hectárea (que está en función del diámetro a la altura de pecho y de la altura del fuste, y de la densidad de árboles por hectárea).

- Se estimó la biomasa del fuste (Mg/ha), multiplicando la densidad básica de la madera (específica para algunas especies según la edad) por el volumen.
- Se estimó la biomasa total (fitomasa total) a partir de la biomasa de fustes utilizando los factores de expansión, según la edad de la plantación, reportados por Brown y Lugo (1982).

En general, la biomasa de fustes y total va a variar según la edad de la plantación, densidad, y volumen de madera. Según Arends (2003), en las especies nativas, el tipo de plantación incide sobre el crecimiento de la especie, siendo menor en las plantaciones en líneas que en las de campo abierto, por lo tanto, la cantidad de biomasa es mayor en este tipo de plantaciones. Entre las especies nativas establecidas a campo abierto, el crecimiento y la biomasa acumulada es mayor en el saquisaquí (*Bombacopsis quinata*), mata ratón (*Gliricidia sepium*) y apamate (*Tabebuia rosea*).

Cuadro 4. Ecuaciones de Regresión de Biomasa Obtenidas Mediante el Método Indirecto

ESPECIE	ECUACIÓN
<i>Eucalyptus urophylla</i>	$Y = -29,0 + 5,4 A$ ($r^2 = 0,54$)
<i>Gmelina arborea</i>	$Y = -10,8 + 10,3 A$ ($r^2 = 0,88$)
<i>Pinus caribaea</i>	$Y = -13,6 + 6,2 A$ ($r^2 = 0,52$)
<i>Pinus patula</i>	$Y = -37,0 + 15,3 A$ ($r^2 = 0,82$)
<i>Tectona grandis</i>	$Y = 21,2 + 2,8 A$ ($r^2 = 0,68$)

Tomado de: Arends (2003).

En las plantaciones con especies exóticas destacan en cuanto crecimiento y biomasa, el pino patula (*Pinus patula*) y el ciprés (*Cupressus lusitanica*) en las zonas montañosas. En el Bosque Seco Tropical, el eucalipto urofila (*Eucalyptus*

urophylla), la melina (*Gmelina arborea*) y la teca (*Tectona grandis*) presentan los mayores valores (Arends, 2003).

Los datos a partir de inventarios forestales juegan un papel importante en la estimación adecuada de la producción primaria neta de un bosque a escala regional y global. Zhao y Zhou (2006), en un estudio sobre la estimación de la producción primaria neta en bosques de pino en China, basado en datos de inventarios indicaron que éstos constituyen fuentes de datos importantes para estimar la producción primaria neta y el balance de carbono a escalas de paisaje y regional. En este estudio, los autores utilizaron cien bases de datos, el volumen, la producción primaria neta y la edad del rodal para los bosques de pinos (*Pinus tabulaeformis*), tomados de la literatura para desarrollar ecuaciones de regresión entre biomasa y volumen y entre producción primaria neta y biomasa, así como la edad del rodal.

Consideraciones Finales

En cuanto a los métodos para estimar la producción primaria neta en ecosistemas, puede decirse que las estimaciones están influenciadas por las metodologías, es decir, existe una heterogeneidad metodológica que puede conducir a una subestimación o sobreestimación de los valores. La subestimación o sobreestimación puede variar con el año de medición. Por otra parte, hay ausencia de datos de campo consistentes y de alta calidad para aplicar modelos (algoritmos) de estimación de la PPN.

Es importante estimar la PPN en pastizales a partir de la dinámica de la biomasa, en vista de que son los ecosistemas de reemplazo, para saber de qué manera están contribuyendo con el cambio climático global. Por esta razón, se intenta realizar una base de datos para estimar el potencial de secuestro de los pastizales del mundo.

Además, se consideraron las estimaciones de biomasa en plantaciones forestales, ya que en algún momento, pueden servir de base para estimar la producción primaria neta, pero debe tenerse en cuenta el hecho de que se pueden obtener valores subestimados si los datos provienen de inventarios con fines comerciales, que utilizan la altura comercial del árbol, ya que se están ignorando otros elementos leñosos y foliares.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Aber, J. D., S. V. Ollinger, C. T. Driscoll, C. A. Federer, and P. B. Reich. 2005. **PnET Models: Carbon, Nitrogen, Water Dynamics in Forest Ecosystems (Vers. 4 and 5)**. [<http://daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.
- 2 Anderson, J.M.; Ingram, J.S. (1983). **Tropical Soil Biology and Factibility**. A handbook of methods. UBS, UNESCO, CAB – International.
- 3 Alvarez, E. (1993). **Composición Florística, Diversidad, Estructura y Biomasa de un Bosque Inundable en la Amazonia Colombiana**. Trabajo de grado. Magister en Biología. Area Ecología. Universidad de Antioquia, Medellín.
- 4 Anderson, J.M.; Ingram, J.S. (1983). **Tropical Soil Biology and Factibility. A Handbook of Methods**. UBS, UNESCO, CAB – International.
- 5 Arends, E. 2003. **Estimación de Biomasa en Plantaciones Forestales**. En:, Consultoría: Inventario de gases de efecto invernadero, sector no energético. Subsector cambio de uso de la tierra y silvicultura. Estimación de sumideros. Proyecto VEN/00/G31. IFLA, Mérida - Venezuela.
- 6 Brown, S. 1997. **Estimating Biomass and Biomasa Change of Tropical Forest: a primer**. Forestry Paper 134, Food and Agriculture Organization, Roma, Italia.
- 7 Brown, S. y A. Lugo. (1982). **The Storage and Production of Organic Matter in Tropical Forests and Their Role in the Global Carbon Cycle**. Biotropica 14: 161-187.
- 8 Clark, D.A. *et al* (2001a). **Measuring Net Primary Production in Forests**. Concepts and field methods. Ecological Applications. 11(2), pp 371-384.
- 9 Dransfield, J. 1978. **Growth Form of Rain Forest Palms**. *In* P. B. Tomlinson and M. H. Zimmerman (Eds.). Tropical trees as living systems, pp. 247 – 268. Cambridge University Press, Cambridge.

- 10 Dixon, R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler, y J. Wisniewski. 1994. **Carbon Pools and Flux of Gobar Forest Ecosystems.** Science 263:185–190.
- 11 Fernández, R. J, O. E. Sala y R. A. Golluscio. 1991. **Woody and Herbaceous Aboveground Production of a Patagonian Steppe.** J. Range Manage. 44: 434 -437.
- 12 Frangi, J. L y E. Lugo. 1985. **Ecosystem Dynamics of a Subtropical Floodplain Forest.** Ecological Monographs. 55: 351- 369.
- 13 Hashimoto, T., K. Kojima, T. Tange y S. Sasaki (2000). **Changes in Carbon Storage in Fallow Forests in the Tropical Lowlands of Borneo.** Forest Ecology and Management 126: 331-337.
- 14 Herrera, M.J., J.I del Valle y S.A. Orrego (2003). **Biomasa de la Vegetación Herbácea y Leñosa y Necromasa de Bosques Primarios Intervenidos y Secundarios.** En: Medición de la captura de carbono en ecosistemas tropicales de Colombia. S.A. Orrego, J.I. Del Valle, F.H. Moreno (Eds.). 145-163.
- 15 Hughes, R.F.; J.B. Kauffman y J.J. Jaramillo (1999). **Biomasa, Carbon and Nutrient Dynamics of Secondary Forests in a Sumid Tropical Region of México.** Ecology 80: 1892 – 1907.
- 16 Lugo, A; D. Wang and H. Bormann. (1990). **A Comparative Analysis of Biomass Production in Five Tropical Tree Species.** Forest Ecology and Management 31: 153-166.
- 17 Lugo, A; S. Brown and J. Chapman. (1988). **An Analytical Review of Production Rates and Stemwood Biomass of Tropical Forest Plantations.** Forest Ecology and Management 23: 179-200.
- 18 MacNaughton, S. J, M. Oesterheld, D. A. Frank y K. J. Williams. 1989. **Ecosystem-level Patterns of Primary Productivity and Herbivory in Terrestrial Hábitats.** Nature 341:142 – 144.
- 19 Newbould, P.J. (1967). **Methods for Estimating the Primary Production of Forests.** International Biological Program, Oxford.

- 20 Prince, S. y D. Zheng. 2006. **Global Primary Production Data Initiative (GPPDI) Gridded Net Primary Productivity (NPP)**. En: [ppn/Global%20Primary%20Production%20Data%20Initiative%20\(GPPDI\)%20Gridded%20Net%20Primary%20Productivity%20\(NPP\).htm](http://ppn/Global%20Primary%20Production%20Data%20Initiative%20(GPPDI)%20Gridded%20Net%20Primary%20Productivity%20(NPP).htm).
- 21 Proctor, J. 1983. **Tropical Forest Litterfall**. I. Problems of data comparison. Pages 267–273 in S. L. Sutton, T. C. Whitmore, and A. C. Chadwick, editors. Tropical rain forest: ecology and management. Blackwell Scientific, Oxford, UK.
- 22 Proctor, J. 1984. **Tropical Forest Litterfall**. II. The data set. Pages 83 – 113 in A. C. Chadwick, S. L. Sutton and editors. Tropical rain forest: the Leeds symposium. Leeds Philosophical and Literary Society, Leeds, UK.
- 23 Renolfi, R.; F. Dallateo, H. Pérez, y C. Kunst. (1986). **Métodos de Estimación de la Biomasa Aérea (hojas) de Especies Leñosas Arbóreas y Arbustivas**. INTA, FAO, UNESCO, MAB.
- 24 Restrepo, D.E., J.F. Benjumea, S.A. Orrego, J.I. del Valle y F.H. Moreno (2003). **Ecuaciones de Biomasa para Palmas del Subdosel y Sotobosque**. En: Medición de la captura de carbono en ecosistemas tropicales de Colombia. S.A. Orrego, J.I. Del Valle, F.H. Moreno (Eds.). 121-143.
- 25 Reynolds, J; G. Marathon; L. Rosales y J. Wright. (2000). **Ecuaciones de Volumen y Peso para Eucaliptus urophylla, el Híbrido Eucalyptus grandis**.
- 26 X Reynolds, J; G. Marathon; L. Rosales y J. Wright. 2000. **Ecuaciones de Volumen y Peso para Gmelina arborea en Smurfit Cartón de Venezuela**. Informe de Investigación N° 22, Smurfit-Cartón de Venezuela.
- 27 Rich, P.M. (1987). **Developmental Anatomy of the Stem of *Welfia georgii*, *Iriartea gigantea*, and other arborescent palms: Implications for Mechanical Support**. American Journal of Botany 74: 792-802.
- 28 Roberts, M.J.; S.P. Long; Tieszen y C.L. Beadle (1985). **Measurement of Plant Biomass and Net Primary Production**. Pergamon Press. Nueva York.

- 29 Ryan, M. G. 1991. **A simple Method for Estimating Gross Carbon Budgets for Vegetation in Forest Ecosystems.** *Tree Physiology* 9:255–266.
- 30 Sala, O.; Jackson, J.; Money, H. y Howarth, R. (2000). **Methods in Ecosystem Science.** Springer-Verlag. Berlin.
- 31 Schroeder, P. (1992). **Carbon Storage Potential of Short Rotation Tropical Tree Plantations.** *Forest Ecology and Management* 50: 31-41.
- 32 Scurlock, J.M.; Johnson, K y R. Olson (2002). **Estimating net Primary Productivity from Grasslands Dynamics Measurements.** *Global Change Biology* (2002) 8, 736-753.
- 33 Singh, J. S., W. K. Laurenroth y R. K. Steinhorst. 1975. **Review and Assessment of Various Techniques for Estimating net Aerial Primary Production in Grasslands from Harvest Data.** *Bot. Rev.* 41: 181 – 232.
- 34 Waring, R. H. y W. H. Schlesinger. 1985. **Forest Ecosystems: concepts and management.** Academic Press, NewYork, New York, USA.
- 35 Whitmore, T.C. (1975). **Tropical Rain Forest of the Far East.** Oxford University Press, London.
- 36 Whittaker, R y P. Marks. 1975. **Methods of Assessing Terrestrial Productivity.** In: Leith H.; Whittaker R., eds. *Primary Productivity of the Biosphere.* New York: Springer-Verlag; 55 – 118.
- 37 Woomer, P.L. y C.A. Palm (1998). **An Approach to Estimating System Carbon Stocks in Tropical Forests and Associated Land Uses.** *Commonwealth Forestry Review* 77: 181-190.
- 38 Zhao, M y G. S. Zhou. 2006. **Estimating net Primary Productivity of Chinese Pine Forests Based on Forest Inventory Data.** *Forestry Advance Access* originalmente publicado online on January 12, 2006. *Forestry* 2006 79(2):231-239; doi:10.1093/forestry/cpl002. <http://forestry.oxfordjournals.org/misc/terms.shtml>