

# BIOMASA Y CARBONO EN LOS BOSQUES AMAZÓNICOS DE TIERRA FIRME E INUNDABLE (VÁRZEA) EN EL OESTE DE PANDO

## BIOMASS AND CARBON IN THE VÁRZEA AND TERRA FIRME AMAZON FOREST IN WESTERN PANDO

Alejandro Araujo-Murakami <sup>1</sup>, William Milliken <sup>2</sup>, Bente B. Klitgaard <sup>2</sup>, Ana María Carrion-Cuellar <sup>1</sup>, Sahuiry Vargas-Lucindo <sup>2</sup> & Ruperto Parada-Arias <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado, Universidad Autónoma Gabriel René Moreno, Av. Irala 565, Casilla 2489, Santa Cruz, Bolivia. Email: arajomurakami@yahoo.com

<sup>2</sup> Royal Botanic Gardens, Kew, Richmond, Surrey, TW9 3AB, Reino Unido.

<sup>3</sup> Universidad Amazónica de Pando, Cobija, Bolivia.

**Resumen:** Se describe y compara la biomasa en dos bosques amazónicos en el oeste de Pando, el bosque de tierra firme (altura) y el bosque inundable (várzea o bajío). En este estudio, se instalaron seis parcelas de una ha, tres en tierra firme y tres en várzea, donde se evaluaron la necromasa (del suelo y en pie) y la biomasa tanto en la parte aérea y subterránea. El bosque de tierra firme almacena  $187.45 \pm 11.90$  Mg ha<sup>-1</sup> de carbono en  $374.89 \pm 23.79$  Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa y el bosque inundable (várzea) almacena  $172.77$  Mg ha<sup>-1</sup> de carbono en  $345.55$  Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa. En la biomasa total y en la mayoría de sus componentes no existen diferencias significativas entre el bosque inundable y el bosque de tierra firme. Sin embargo, si existe diferencia significativa entre la necromasa de los dos tipos de bosques, siendo mayor en el bosque de tierra firme. En cuanto a la distribución de la biomasa, la porción que contribuye con mayor cantidad de carbono es la parte aérea con un promedio de 74% y 72%, seguido de la biomasa subterránea con 20% y 19% y la necromasa con el 6% y 9% en el bosque inundable y de tierra firme respectivamente. Si estos bosques son deforestados la cantidad de CO<sub>2</sub> que se emitiría a la atmósfera es de  $687.93 \pm 43.66$  Mg ha<sup>-1</sup> para los bosques de tierra firme y  $634.08 \pm 54.24$  Mg ha<sup>-1</sup> para los bosques inundables. En conclusión, los estudios integrales de la biomasa del bosque son importantes ya que la porción de biomasa subterránea y la necromasa no se logra detectar con otros métodos como la detección remoto por satélites y los inventarios forestales comerciales. Por lo tanto, el presente trabajo aporta información primaria que puede ser utilizada en inventarios de carbono a mayor escala y menor detalle.

**Palabras clave:** Amazonia, bosques, carbono, biomasa, necromasa, raíces.

**Astract:** The biomass production is described and compared for two types of lowland Amazonian rain forest in eastern Pando, Bolivia: non-inundated forest (terra firme or altura) and inundated forest (várzea or bajío). Six one-hectare permanent forest plots

were installed in this study: three in terra firme and three in várzea. In each plot the necromass (fallen and standing trees) and the above- and below-ground biomass were evaluated. The terra firme forest stored 187.5 ( $\pm 11.9$ ) Mg ha<sup>-1</sup> of carbon in 374.9 ( $\pm 23.8$ ) Mg ha<sup>-1</sup> of biomass, and the várzea forest 172.8 Mg ha<sup>-1</sup> of carbon in 345.6 Mg ha<sup>-1</sup> of biomass. There were no significant differences between the várzea and terra firme forests in terms of total biomass and the majority of its components. Nevertheless, there was significant difference regarding necromass as the contribution to the total biomass, with necromass proportions higher in the terra firme than in the várzea forest plots. In terms of distribution of biomass, the above-ground component contributed the majority averaging 74% y 72%, followed by the below-ground component averaging 20% and 19%, with the necromass averaging 6% and 9% in the várzea and terra firme forests respectively. The quantity of CO<sub>2</sub> emitted to the atmosphere would be 687.9 ( $\pm 43.7$ ) Mg ha<sup>-1</sup> for the terra firme and 634.1 ( $\pm 54.2$ ) Mg ha<sup>-1</sup> for the várzea if these forests were deforested. In conclusion, integral biomass studies of the kind presented are of great importance as they allow detection of below-ground biomass and necromass contributions, which are not detectable with other methods such as remote sensing using satellite images or commercial forestry inventories. The present study therefore provides primary data which may be applied in both large- and small-scale carbon inventories.

**Key words:** Amazonia, forests, carbon, biomass, necromass, roots

## INTRODUCCIÓN

La biomasa es el resultado de la producción primaria neta que la planta destina a sus estructuras, es decir que se acumula. Entonces, en una comunidad de plantas es la masa seca total. La biomasa puede dividirse en masa viva (biomasa) y masa muerta (necromasa). Asimismo, estas pueden separarse en aérea (tallos, ramas, gajos, hojas, flores y frutos) y subterránea (raíces gruesas y finas, rizomas y tallos subterráneos). La biomasa viva constituye la mayor porción de la biomasa total y la necromasa constituye una porción menor de la biomasa total y es de mucha importancia en el ciclo de los nutrientes del ecosistema (Baker *et al.*, 2007; Chao *et al.*, 2009; Clark *et al.*, 2002). Por lo tanto, la biomasa y la necromasa en los bosques amazónicos son componentes importantes en el ciclo global de carbono. Por consiguiente, existe un gran interés por estudiar las reservas de carbono en los bosques tropicales para comprender el papel que desempeñan en el ciclo global de este elemento.

En el presente estudio se presentan datos sobre las cantidades de biomasa aérea y subterránea, además de datos de la necromasa en dos principales formaciones boscosas de la Amazonia boliviana, el bosque de tierra firme (altura) y el bosque inundable o várzea (bajío). Los objetivos del estudio son: (1) hacer una evaluación y comparación entre la biomasa y necromasa del bosque de altura o “tierra firme” y el bosque inundable (bajío o várzea), que en superficie o cobertura son los principales tipos de bosque en el oeste de Pando y (2) obtener datos sobre la distribución de los componentes de la biomasa y carbono en estos bosques.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende los bosques amazónicos del noroeste de Pando, según Navarro & Ferreira (2009) se encuentra dentro de la Amazonia del Acre-Madre de Dios (Figura 1). En este sector se distinguen bosques inundables (bajíos) de aguas blancas (turbias), de aguas negras (verdosas o cristalinas), bosques de tierra firme (o que no se inundan) y palmares de pantanos (bajíos pantanosos permanentes o semipermanentes). En estos bosques de tierra firme el suelo está por encima del nivel máximo de las aguas, que nunca o muy rara vez se inundan (Araujo-Murakami *et al.*, 2011). Los bosques inundables de aguas blancas o várzea se encuentran detrás de las barreras ribereñas de los ríos de aguas blancas o turbias cargadas de sedimentos minerales, donde frecuentemente el relieve desciende formando áreas anegables periódicamente (Araujo-Murakami *et al.*, 2011).

Datos históricos (1970-2005) del clima proporcionados por SENAMHI (2012) de Pando, muestran que la temperatura es relativamente uniforme, registrando un promedio anual de 24 a 27 °C. Por otro lado, la precipitación promedio anual presenta gradientes que van de norte (2000 mm) a sur (1800) y de este (2000) a oeste (1800). Toda el área de estudio presenta un clima estacional que permite distinguir dos estaciones, una seca y esporádicamente fría (mayo a septiembre), otra húmeda y calurosa (octubre a abril). Según el estudio de Quesada *et al.* (2012) los suelos dominantes en la parte oeste (Sector Acre-Madre de Dios) de la Amazonia en Pando están clasificados como acrisoles y cambisoles. Así también, toda la Amazonia presenta inclusiones de pluvisoles en las llanuras aluviales.

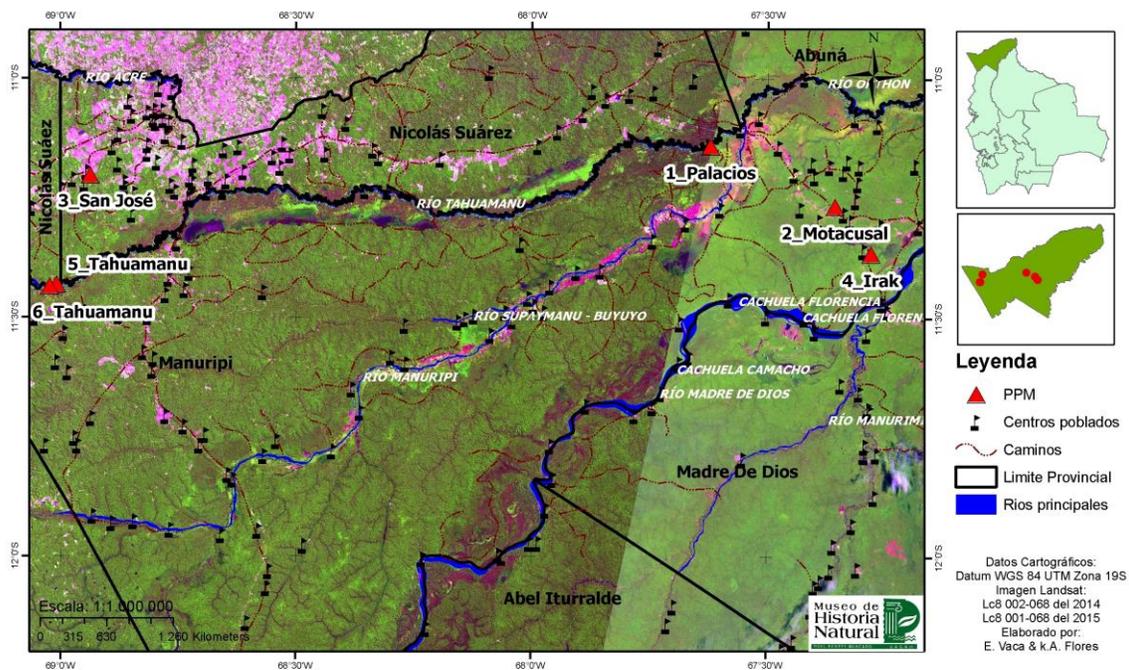


Figura 1. Ubicación de las parcelas permanentes de muestreo (PPM) en el oeste de Pando.

## MÉTODOS

### Toma de datos

Se evaluaron seis parcelas de una hectárea (100\*100 m), tres parcelas en los bosques amazónicos de tierra firme y tres en los bosques amazónicos inundables de aguas blancas (Figura 1). En las parcelas, cada individuo ha sido codificado, medido e identificado hasta nivel de especie en la medida de lo posible o en su defecto se lo asignó a una morfoespecie para su identificación en el herbario USZ. En detalle, en cada parcela se tomó datos según los protocolos de RAINFOR (Phillips *et al.*, 2009, <http://www.rainfor.org/es/manuales>) de los siguientes componentes:

**Inventario de la biomasa aérea gruesa:** La biomasa de árboles vivos con DAP (diámetro a la altura del pecho)  $\geq 10$  cm se la evaluó dentro de una superficie de 100\*100 m, dividida en 25 subparcelas de 20\*20 m, donde se codificó cada árbol, se midió el DAP, se estimó la altura de los individuos y se los identificó taxonómicamente para asignar la densidad de la madera.

**Inventario de la biomasa aérea menuda:** La biomasa de árboles vivos con DAP  $< 10$  cm se la evaluó en una superficie de 20\*20 m (subparcela) dentro de la parcela de 100\*100 m. Para este propósito se midió el diámetro y la altura de los individuos y se los identificó taxonómicamente para asignar la densidad de la madera.

**Inventario de raíces gruesas:** Para el inventario de la biomasa de raíces gruesas se midió el DAP en todos los árboles inventariados. Es decir, en base al diámetro de cada individuo presente en la parcela se calculó este valor.

**Biomasa de raíces finas:** Se obtuvo mediante el cavado de 16 muestras de 30 o más cm de profundidad por 15 cm de diámetro, donde se sacó todas raíces del suelo por 40 minutos en 4 períodos de 10 minutos. Posteriormente, se seleccionó las raíces de cada período (10 minutos) y se empaquetó por separado para su posterior limpieza. Estas muestras de raíces se secaron en estufas (a 70 °C) y se pesaron hasta encontrar un peso estable, aproximadamente 72 horas. Es decir, cada sobre correspondiente a cada serie de tiempo (10 minutos) de cada muestra de raíces se dividió en categorías de tamaño ( $< 2$  mm, 2-5mm y  $> 5$ mm) y se pesó en seco. Finalmente, los valores de peso seco constituye la biomasa de las raíces finas.

**Inventario de madera muerta en pie:** Para la evaluación de madera muerta en pie, se realizó en una hectárea (100\*100 metros) para los árboles muertos con DAP  $\geq 10$  cm y en 400 m<sup>2</sup> (20\*20 m) o una subparcela para árboles con DAP  $< 10$  cm. En ambas categorías de tamaño se mide el DAP y la altura del árbol y se anota la categoría de descomposición (Tabla 1). Así también, se registra la longitud y diámetro de las ramas que persisten en el árbol muerto en pie y finalmente se le asigna una categoría de descomposición.

**Inventario de madera muerta sobre el suelo:** Para el inventario de la necromasa de tallos, ramas y gajos con diámetro  $\geq 2$  cm de grosor, se realizó dentro de cuatro transectas de 1 m de ancho por 100 m de largo (400 m<sup>2</sup>). Se midió el largo, el diámetro inicial y diámetro final de cualquier tronco, gajo o rama que cabe dentro de la transecta. Además, se registró las clases de descomposición del 1 al 5 (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de la descomposición de la madera muerta

| Descripción de la madera  | Categorías | Hojas | Gajos finos | Corteza entera | Madera firme | Descompuesta | Muy podrida |
|---|------------|-------|-------------|----------------|--------------|--------------|-------------|
| Intacto: Más del 75% de la madera intacta y/o dura, con ramitas y hojas adjuntas.   | 1          | Si    | Si          | Si             | Si           | No           | No          |
| Ligeramente dañado: Con ramitas, la corteza algo dañada, pero la madera todavía está dura.                                  | 2          | No    | No          | Si             | Si           | No           | No          |
| Dañado y en mala condición: El tronco con alguna decadencia y corteza desprendida en gran parte.                            | 3          | No    | No          | No             | Si           | No           | No          |
| Algo descompuesto: Parte de la madera es friable o desmenuzable.  | 4          | No    | No          | No             | No           | Si           | No          |
| Descompuesto: Más del 75% de la madera blanda y podrida, se penetra con facilidad y la madera se derrumba si se la presiona | 5          | No    | No          | No             | No           | No           | Si          |

### Análisis de datos

**Biomasa aérea:** La biomasa aérea gruesa (AGB, Mg ha<sup>-1</sup>) de los árboles fue estimada utilizando las ecuaciones de Chambers *et al.* (2001) que se basa en el diámetro (DAP), ajustadas por Baker *et al.* (2004B) que incorpora la densidad ( $\rho$ ) de madera en éste modelo. Por otro lado, para las lianas se utilizó el modelo de Orrego & Del Valle (2003) y para las palmeras el modelo de Restrepo (2003) que utiliza datos de altura y diámetro de las diferentes especies (Tabla 2).

Tabla 2. Ecuaciones alométricas usadas para estimar la biomasa aérea en los bosques de tierra firme y várzea en Pando. AGB = biomasa aérea de los árboles en kg, DAP= diámetro en cm a 1.3 m del suelo, Ln = logaritmo neperiano, H= altura total en metros,  $\rho$ = densidad de la madera en unidades de masa sobre volumen y L es el largo de la palmera en metros.

| Modelo   | Ecuación   | Variables    | DAP Mínimo | Sitio              | Referencia                    |
|----------|--|--------------|------------|--------------------|-------------------------------|
| Arboles  |  |              |            |                    |                               |
| 1        | AGB =<br>$\exp(0.33 \cdot \ln(\text{DAP}) + 0.933 \cdot (\ln(\text{DAP}))^2 - 0.122 \cdot (\ln(\text{DAP}))^3 - 0.37)$                   | DAP          | ≥ 5 cm     | Brasil             | Chambers <i>et al.</i> , 2001 |
| 2        | AGB =<br>$\exp(0.33 \cdot \ln(\text{DAP}) + 0.933 \cdot (\ln(\text{DAP}))^2 - 0.122 \cdot (\ln(\text{DAP}))^3 - 0.37) \cdot \rho / 0.67$ | $\rho$ , DAP | ≥ 5 cm     | Brasil             | Baker <i>et al.</i> , 2004B   |
| Palmeras |  |              |            |                    |                               |
| 4        | AGB = $-2.249 + 0.861 \cdot \ln(\text{DAP}^2 \cdot L)$   | DAP, L       |            | Colombia           | Restrepo, 2003                |
| Lianas   |  |              |            |                    |                               |
| 5        | AGB = $\exp(0.028 + 1.841 \cdot \ln(\text{DAP}))$  | DAP          | ≥ 5 cm     | Bosques tropicales | Orrego y del Valle, 2003      |

La densidad de la madera se obtiene en función a cada individuo, árbol, liana o hemi-epífita, es decir se utiliza la densidad de la especie a la que corresponde cada individuo. Es así, que en los casos que faltaban datos de densidad de especies se utilizó el promedio de densidad por género o por familia. Para los árboles no identificados se utilizó el promedio de la densidad de madera de todos los árboles en la parcela. Las densidades de madera de árboles vivos de las especies presente en este estudio se obtuvo de la base de datos de RAINFOR (Peacock *et al.*, 2007) y la base de datos de densidad de madera de especies de Baker *et al.* (2004A) y Chave *et al.* (2005).

**Necromasa:** Varios estudios indican que las diferencias en la densidad de madera entre las clases de descomposición de madera muerta son pequeñas (Chao *et al.*, 2008) o no significativas (Palace *et al.*, 2008), y para facilitar el análisis y poder calcular las densidades se utilizó las fórmulas de Chao *et al.* (2009). Las cinco clases obtenidas en un primer momento fueron agrupadas en tres clases: (I) juntando la clase 1 con la clase 2; (II) la clase 3 y (III) juntando la clase 4 con la clase 5. Para calcular la necromasa de la madera muerta en el suelo de cada sección de árbol caído, rama o gajo se multiplicó el promedio del área de los extremos del tronco o gajo ( $A_1$ ,  $A_2$ , calculada a partir de los diámetros  $D_1$  y  $D_2$ ) por la longitud ( $h$ ) y la densidad ( $\rho_d$ ). Luego, se sumó la biomasa de todas las secciones de árboles, gajos y ramas medidas y se obtuvo la biomasa muerta o necromasa de las 4 transectas (=400 m<sup>2</sup> superficie).

$$A_x = \pi D_x^2 / 4$$

y

$$\text{Necromasa del trozo o pedazo} = \{(A_1 + A_2) / 2\} * h * \rho_d$$

Para el cálculo del volumen de madera muerta en pie se utilizó la fórmula de Chambers *et al.* (2001) de volumen de troncos, que se expresa:

$$V = 0.0011 * D_b^{1.8516} * H^{0.9053} * ((2H^{0.118}) - H^{0.118})$$

Donde  $V$  es el volumen en m<sup>3</sup>,  $D_b$  es el diámetro en cm medido a 1.3 m sobre el suelo,  $H$  es la altura total del árbol en pie o parado expresado en m.

Los valores de densidades de las clases de descomposición ( $\rho_d$ , g cm<sup>-3</sup>) son específicos de cada sitio, pero están altamente relacionado con la densidad de madera de los árboles vivos a nivel de parcela (Chao *et al.*, 2008). Así, la densidad ( $\rho_d$ ) fue estimada como una función de la densidad promedio de los árboles vivos de la parcela, según la ecuación de Chao *et al.* (2008), que se expresa:

$$\rho_{d=1} = 1.17 [\rho_{BAj}] - 0.21$$

y

$$\rho_{d=2} = 1.17 [\rho_{BAj}] - 0.31$$

Donde  $\rho_{d=1}$  y  $\rho_{d=2}$  representan las densidades de necromasa en clases de deterioro (d) I y II respectivamente, y  $\rho_{BAj}$  (g cm<sup>-3</sup>) es la densidad media de la madera de árboles vivos de la parcela  $j$ . Para la necromasa en clase de deterioro III, se utilizó el valor medio de la densidad por detritus en “clase de deterioro tres” de estudios publicados de bosques neotropicales húmedos de las tierras bajas (0.29 g cm<sup>-3</sup>), como sugirió Chao *et al.* (2008).

**Biomasa subterránea:** La biomasa de raíces gruesas ( $BR_g$ ) se calculó mediante el uso de relaciones matemáticas, cuya variable independiente es el DAP. Para estimar la

biomasa de este componente se utilizó la ecuación estimada por Sierra (2001) que resulta en kg y requiere datos de los diámetros en cm.

$$\text{Ln BRg} = -4.273 + 2.633 * \text{Ln DAP}$$

La biomasa de las **raíces finas** se calculó con una ecuación logarítmica (Metcalf *et al.*, 2007) en base a los pesos secos acumulados en cada muestra, y se proyectó con la ecuación obtenida de la curva logarítmica para el período de tiempo de 120 minutos: tiempo necesario para extraer la totalidad de raíces de una muestra de suelo según Metcalfe *et al.* (2007) y se tomó este último valor de peso como la biomasa de raíces finas de la muestra.

$$R_t = a \text{ Ln } (t) + b$$

Donde  $R_t$  = masa de raíces finas extraídas en un tiempo (t) expresada en gramos, a =: constante de la curva; Ln = Logaritmo natural; t = tiempo de estimación; b = pendiente.

En la mayoría de los estudios sobre almacenamiento de carbono en la biomasa de los bosques tropicales se asume que la biomasa de los árboles vivos contiene aproximadamente 50% de carbono (Malhi *et al.*, 2004; Aragão *et al.*, 2009). Por tanto, se usa el factor de 0.5 para transformar la biomasa a carbono, siendo este factor la fracción de carbono (%) en la biomasa seca de la madera. Esto se debe a que aproximadamente 50% del peso seco de cualquier organismo lo constituye el carbono. Sin embargo, es importante enfatizar que la fracción de carbono en la madera puede variar entre especies (Elias & Potvin, 2003).

$$C = BA \times 0.5$$

Donde: C es el carbono almacenado en la biomasa total es expresado en ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) y BA es la biomasa total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ).

El **dióxido de carbono equivalente** ( $\text{CO}_2\text{e}$ ), corresponde a la medida métrica utilizada para comparar las emisiones de varios gases de efecto invernadero (GEI), siendo el resultado de la multiplicación de las toneladas emitidas de GEI por su potencial de calentamiento global (Yepes *et al.*, 2011). Para convertir la cantidad de carbono (almacenada o emitida) por los ecosistemas forestales, se recomienda emplear el factor de  $44/12 \approx 3.67$ ; este factor resulta de dividir el peso atómico de una molécula de dióxido de carbono, por el peso específico del carbono (IPCC 2003, Pacheco *et al.*, 2007). Es decir, se multiplicó la cantidad de toneladas de carbono que almacenan los bosques por 3.67, el cálculo se realizó de la siguiente manera:

$$\text{CO}_2 \text{ fijado} = C \times (44/12)$$

Dónde:  $\text{CO}_2 \text{ fijado}$  son los Mg o tn de dióxido fijado o almacenado, C es el carbono en la biomasa del bosque y 44/12 es una constante equivalente al peso molecular del  $\text{CO}_2/\text{C}$ .

Para cada parcela y tipo de bosque se calculó el promedio, la desviación estándar y el error. Luego, todos estos parámetros fueron comparados entre tipos de bosques (várzea vs. tierra firme) mediante un comparador de medias (prueba de t) utilizando el paquete estadístico IBM-SPSS v.21. Previa confirmación de normalidad e igualdad de varianza (prueba de Levene).

## RESULTADOS

El bosque amazónico inundable (bajío o várzea) registró en promedio  $345.55 \pm 29.59$  Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa (equivalentes en carbono a  $187.45 \pm 11.90$  Mg ha<sup>-1</sup> y en CO<sub>2</sub> a  $687.93 \pm 43.66$  Mg ha<sup>-1</sup> secuestrados) y el bosque amazónico de tierra firme registró  $374.89 \pm 23.79$  Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa (equivalentes en carbono a  $172.77 \pm 14.78$  Mg ha<sup>-1</sup> y en CO<sub>2</sub> a  $634.08 \pm 54.24$  Mg ha<sup>-1</sup> secuestrados). Esta biomasa se encontró en tres componentes: 1) biomasa aérea con  $256.33 \pm 27.97$  Mg ha<sup>-1</sup> en el bosque inundable y  $268.61 \pm 17.76$  Mg ha<sup>-1</sup> en el bosque de tierra firme; 2) biomasa subterránea o de raíces con  $70.49 \pm 4.99$  Mg ha<sup>-1</sup> en el bosque inundable y  $71.03 \pm 9.48$  Mg ha<sup>-1</sup> en el bosque de tierra firme; y 3) necromasa o madera muerta con  $18.73 \pm 2.15$  Mg ha<sup>-1</sup> en el bosque inundable y  $35.25 \pm 8.23$  Mg ha<sup>-1</sup> en el bosque de tierra firme (Tabla 3).

Tabla 3. Biomasa, carbono y CO<sub>2</sub> (en Mg o tn ha<sup>-1</sup>) en dos tipos de bosques amazónicos en el oeste de Pando, Bolivia

| Bosque         | Parcelas | Biomasa       |              |              | Biomasa Total | Carbono       | CO <sub>2</sub> equivalente |
|----------------|----------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|-----------------------------|
|                |          | Biomasa Aérea | Sub terránea | Necromasa    |               |               |                             |
| Tierra firme   | PPM 02   | 249.41        | 54.56        | 27.67        | 331.64        | 165.8         | 608.55                      |
| Tierra firme   | PPM 03   | 256.50        | 71.14        | 51.70        | 379.34        | 189.7         | 696.08                      |
| Tierra firme   | PPM 04   | 299.93        | 87.39        | 26.38        | 413.70        | 206.9         | 759.14                      |
| Promedio       |          | <b>268.61</b> | <b>71.03</b> | <b>35.25</b> | <b>374.89</b> | <b>187.45</b> | <b>687.93</b>               |
| Error estándar |          | <b>15.79</b>  | <b>9.48</b>  | <b>8.23</b>  | <b>23.79</b>  | <b>11.90</b>  | <b>43.66</b>                |
| Inundable      | PPM 01   | 208.30        | 62.27        | 18.79        | 289.36        | 144.7         | 530.98                      |
| Inundable      | PPM 05   | 297.47        | 69.68        | 22.42        | 389.56        | 194.8         | 714.85                      |
| Inundable      | PPM 06   | 263.22        | 79.51        | 14.98        | 357.71        | 178.9         | 656.39                      |
| Promedio       |          | <b>256.33</b> | <b>70.49</b> | <b>18.73</b> | <b>345.55</b> | <b>172.77</b> | <b>634.08</b>               |
| Error estándar |          | <b>25.97</b>  | <b>4.99</b>  | <b>2.15</b>  | <b>29.56</b>  | <b>14.78</b>  | <b>54.24</b>                |

El bosque de tierra firme presentó valores de biomasa total y biomasa aérea mayor que la várzea. Sin embargo, solo en lo que respecta a la biomasa del sotobosque o biomasa de los árboles < 10 cm de DAP presentó diferencia significativa (Tabla 4). En cuanto, a la biomasa subterránea no hubo diferencia significativa entre bosque de tierra firme y várzea. No obstante, el bosque de tierra firme fue mayor en cuanto a biomasa de raíces gruesa y la várzea en cuanto a raíces fines. Por otro lado, el bosque de tierra firme presentó valores de necromasa (total, en pie y sobre el suelo) superiores respecto a la várzea y solo existió diferencia significativa en lo que respecta a la necromasa total y necromasa en pie (Tabla 5, Figura 2).

La mayor cantidad de biomasa aérea se registró en la PPM-04 (Irak) con  $299.93$  Mg ha<sup>-1</sup> en el bosque de tierra firme y la menor se registró en la PPM-01 (Palacios) con  $208.30$  Mg ha<sup>-1</sup> en el bosque amazónico inundable o várzea. Asimismo, la biomasa de raíces presentó valores relativamente superiores en el bosque de tierra firme (Tabla 4).



Figura 2. Comparación de la biomasa total y de sus componentes en el bosque amazónico de tierra firme e inundable (bajo o várzea).

Tabla 4. Biomasa aérea (en Mg o tn ha<sup>-1</sup>) en dos tipos de bosques amazónicos en el oeste de Pando, Bolivia

| Bosque    | Parcelas       | Biomasa aérea      |                    |             | Biomasa subterránea                 |                                       |              |                     |                                     |  |
|-----------|----------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------|-------------------------------------|--|
|           |                | Individuos < 10 cm | Individuos ≥ 10 cm | Aérea total | Relación Biomasa < 10cm/ ≥ 10cm (%) | Raíces gruesas de árboles ≥ 10 cm (%) | Raíces finas | Biomasa subterránea | Relación raíces finas / gruesas (%) | Relación biomasa subterránea / aérea (%) |
| T. firme  | PPM 02         | 17.85              | 231.56             | 249.41      | 7.71                                | 44.13                                 | 10.44        | 54.56               | 23.65                               | 9.48                                     |
| T. firme  | PPM 03         | 23.23              | 233.25             | 256.50      | 9.97                                | 55.01                                 | 16.13        | 71.14               | 29.33                               | 11.43                                    |
| T. firme  | PPM 04         | 16.94              | 282.99             | 299.93      | 5.99                                | 62.36                                 | 25.03        | 87.39               | 40.14                               | 13.38                                    |
|           | Promedio       | 19.35              | 249.27             | 268.61      | 7.89                                | 53.83                                 | 17.20        | 71.03               | 31.04                               | 11.43                                    |
|           | Error estándar | 1.97               | 16.87              | 15.79       | 1.15                                | 5.30                                  | 4.25         | 9.48                | 4.84                                | 1.13                                     |
| Inundable | PPM 01         | 22.81              | 185.49             | 208.30      | 12.30                               | 41.16                                 | 21.11        | 62.27               | 51.29                               | 24.62                                    |
| Inundable | PPM 05         | 22.48              | 274.98             | 297.47      | 8.18                                | 49.32                                 | 20.36        | 69.68               | 41.27                               | 13.87                                    |
| Inundable | PPM 06         | 29.56              | 233.66             | 263.22      | 12.65                               | 45.74                                 | 33.76        | 79.51               | 73.81                               | 28.04                                    |
|           | Promedio       | 24.95              | 231.38             | 256.33      | 11.04                               | 45.41                                 | 25.08        | 70.49               | 55.46                               | 22.18                                    |
|           | Error estándar | 2.31               | 25.86              | 25.97       | 1.44                                | 2.36                                  | 4.35         | 4.99                | 9.62                                | 4.27                                     |

La relación entre la biomasa aérea de los individuos < 10 cm de DAP y la biomasa de los árboles con DAP ≥ 10 cm fue de 7.89 ± 1.15 % en el bosque de tierra firme y de 11.04 ± 1.44 % en el bosque inundable. En cuanto a la relación entre la biomasa de raíces finas y raíces gruesa fue de 55.46 ± 9.62% en el bosque inundable y de 31.04 ± 4.84% en el bosque de tierra firme (Tabla 4). Asimismo, la relación entre la necromasa en pie o parada y la necromasa del suelo fue de 11.27 ± 0.80% en la várzea y de 59.35 ± 3.97% en la tierra firme (Tabla 5). Finalmente, la relación entre la necromasa y la biomasa aérea fue de 13.35 ± 3.47% en el bosque de tierra firme y de 7.42 ± 0.96% en el bosque inundable.

Tabla 5. Necromasa (en Mg o tn ha<sup>-1</sup>) en dos tipos de bosques amazónicos en el oeste de Pando, Bolivia

| Bosque         | Parcelas | En pie       | En el Suelo  | Necromasa total | Relación en pie / suelo (%) | Relación necromasa/ biomasa ≥ 10 cm (%) | Relación necromasa / biomasa aérea (%) |
|----------------|----------|--------------|--------------|-----------------|-----------------------------|---|--|
| Tierra firme   | PPM 02   | 10.72        | 16.95        | 27.67           | 63.22                       | 11.95                                   | 11.09                                  |
| Tierra firme   | PPM 03   | 20.06        | 31.63        | 51.70           | 63.42                       | 22.16                                   | 20.15                                  |
| Tierra firme   | PPM 04   | 8.96         | 17.42        | 26.38           | 51.41                       | 9.32                                    | 8.79                                   |
| Promedio       |          | <b>13.24</b> | <b>22.00</b> | <b>35.25</b>    | <b>59.35</b>                | <b>14.48</b>                            | <b>13.35</b>                           |
| Error estándar |          | <b>3.45</b>  | <b>4.82</b>  | <b>8.23</b>     | <b>3.97</b>                 | <b>3.92</b>                             | <b>3.47</b>                            |
| Inundable      | PPM 01   | 1.67         | 17.12        | 18.79           | 9.75                        | 10.13                                   | 9.02                                   |
| Inundable      | PPM 05   | 2.49         | 19.93        | 22.42           | 12.50                       | 8.15                                    | 7.54                                   |
| Inundable      | PPM 06   | 1.55         | 13.43        | 14.98           | 11.57                       | 6.41                                    | 5.69                                   |
| Promedio       |          | <b>1.90</b>  | <b>16.82</b> | <b>18.73</b>    | <b>11.27</b>                | <b>8.23</b>                             | <b>7.42</b>                            |
| Error estándar |          | <b>0.29</b>  | <b>1.88</b>  | <b>2.15</b>     | <b>0.80</b>                 | <b>1.07</b>                             | <b>0.96</b>                            |

La porción que contribuye con mayor cantidad de biomasa fue la parte aérea con un promedio de 74% y 72%, seguido de la biomasa subterránea con 20% y 19%, y la necromasa con el 6% y 9% en el bosque amazónico inundable y de tierra firme respectivamente (Figura 3). Es decir, la biomasa aérea constituye aproximadamente 3/4 partes de la biomasa total en los bosques amazónicos del oeste de Pando.



Figura 3. Distribución de la biomasa en bosques amazónicos de tierra firme e inundable (várzea).

## DISCUSIÓN

Según Clark *et al.* (2001), en promedio los bosques tropicales albergan entre 45–649 Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa. Siendo que, la biomasa del bosque amazónico de tierra firme (440.90±29.30 Mg ha<sup>-1</sup>) y del bosque inundable (396.02±31.37 Mg ha<sup>-1</sup>) del presente estudio se encuentra dentro de estos márgenes establecidos. De igual manera, los valores de biomasa aérea (Tabla 4) son relativamente similares a los reportados para bosques de Bolivia (Tabla 5) por Baker *et al.* (2004B) y Araujo-Murakami *et al.* (2006) y superiores a los valores publicados por Dauber *et al.* (2000) y Mostacedo *et al.* (2008); probablemente esto se deba a las diferencia en la estructura y composición florística de los diferentes sitios o por la aplicación de distintas ecuaciones y técnicas de levantamiento de muestras que generan valores diferentes.

Entonces, corroboramos los resultados del presente estudio con estudios similares en cuanto a técnicas de trabajo de campo y de análisis de los mismos. Siendo que, los valores reportados en este estudio están dentro de los márgenes reportados en otros estudios en sitios similares (Baker *et al.*, 2007; y Araujo-Murakami *et al.*, 2011) tanto en el componente de biomasa aérea gruesa como en la necromasa. Sin embargo, las observaciones de Baker *et al.* (2007), denotan que nuestros valores son relativamente bajos en comparación con los estudios de necromasa en bosques tropicales, con un valor extremo de 96 Mg ha<sup>-1</sup> (48 Mg C ha<sup>-1</sup>) reportado para Tapajós en el este de la Amazonia (Rice *et al.*, 2004). No obstante, en el presente estudio la mayor cantidad de necromasa se registró en la parcela (SJO-03) de San José instalada en tierra firme con un reporte 51.7 Mg ha<sup>-1</sup>.

Para los bosques de la Amazonia, se estima que la biomasa aérea constituye aproximadamente el 87% y la necromasa constituye 6.4 a 15.4% de la biomasa aérea  $\geq 10$ cm de DAP (Chao *et al.*, 2009). En el presente estudio se encontró que la necromasa en relación a la biomasa aérea gruesa o  $\geq 10$  cm de DAP es el 14.48±3.92% en el bosque de tierra firme y el 8.23±1.07 % en el bosque inundable. Asimismo, en el presente estudio se encontró que en los bosques inundables o de bajo existe una menor cantidad de necromasa que en los bosques de tierra firme o altura coincidiendo con los valores reportados para los bosques de tierra firme y várzea de Madre de Dios, Perú por Araujo-Murakami *et al.* (2011) y Baker *et al.* (2007). También, los niveles de necromasa reportados en el presente estudio concuerdan con el gradiente observado por Chao *et al.* (2009), quienes anotaron que las regiones del sur y el oeste de la Amazonia tienen valores más bajos de necromasa en comparación con el este y noreste de la Amazonia.

Tabla 6. Biomasa aérea en bosques de diferentes estudios en la Amazonia boliviana.

| Tipo de vegetación y localidad                  | Biomasa aérea (Mg ha <sup>-1</sup> ) | Referencia                           |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Bosques húmedos, La Chonta                      | 163                                  | Mostacedo <i>et al.</i> , 2008       |
| Bosques húmedos, La Chonta                      | 173                                  | Mostacedo <i>et al.</i> , 2008       |
| Bosques húmedos, Los fierros - Parque Noel KM   | 326                                  | Araujo-Murakami <i>et al.</i> , 2006 |
| Bosque Amazónico, La concesión SAGUSA           | 110 - 170                            | Mostacedo <i>et al.</i> , 2008       |
| Bosques de la Amazonia                          | 78 - 228                             | Dauber <i>et al.</i> , 2000          |
| Bosques en transición Andino – Amazónico        | 86 - 191                             | Dauber <i>et al.</i> , 2000          |
| Bosques de tierra firme, Chore 1                | 117 - 124                            | Baker <i>et al.</i> , 2004b          |
| Bosques de tierra firme, Los Fierros Bosque 1   | 221 – 239                            | Baker <i>et al.</i> , 2004b          |
| Bosques de tierra firme, Huanchaca 2, Parcela 1 | 245 – 249                            | Baker <i>et al.</i> , 2004b          |
| Bosques de tierra firme, Huanchaca 2, Parcela 2 | 263 – 270                            | Baker <i>et al.</i> , 2004b          |
| Bosques de tierra firme, Los Fierros Bosque 2   | 271 – 284                            | Baker <i>et al.</i> , 2004b          |

Tabla 7. Biomasa  $\geq 10$  cm de DAP y necromasa de seis sitios en Bolivia y 11 en el departamento de Madre de Dios Perú. AGB = Biomasa Aérea Gruesa (Mg ha<sup>-1</sup>);  $\rho_j$  = promedio de densidad de madera de parcela j (g cm<sup>-3</sup>); N = necromasa (Mg ha<sup>-1</sup>) usando los valores de densidad de madera en base del promedio de densidad de madera por parcela

| País    | Tipo de Bosque | Código | AGB    | $\rho_j$ | Necromasa (N) | Fuente                         |
|---------|----------------|--------|--------|----------|---------------|--------------------------------|
| Perú    | Altura         | LAS-01 | 248.4  | 0.55     | 37.7          | Araujo-M. <i>et al.</i> , 2011 |
| Perú    | Altura         | MNU-03 | 226.5  | 0.51     | 23.6          | Araujo-M. <i>et al.</i> , 2011 |
| Perú    | Altura         | MNU-04 | 230.3  | 0.55     | 21.8          | Araujo-M. <i>et al.</i> , 2011 |
| Perú    | Altura         | TAM 05 | 215.2  | 0.61     | 25.6          | Baker <i>et al.</i> , (2007)   |
| Perú    | Altura         | TAM 07 | 223.6  | 0.58     | 33.1          | Baker <i>et al.</i> , (2007)   |
| Perú    | Altura         | TAM 08 | 188.8  | 0.6      | 34            | Baker <i>et al.</i> , (2007)   |
| Bolivia | Altura         | MOT-01 | 244.4  | 0.64     | 27.7          | Presente estudio               |
| Bolivia | Altura         | SJO-03 | 248.1  | 0.61     | 51.7          | Presente estudio               |
| Bolivia | Altura         | IRA-04 | 294.3  | 0.65     | 26.4          | Presente estudio               |
|         | Promedio       |        | 235.51 | 0.59     | 31.29         |                                |
| Perú    | Bajío          | LAS-02 | 240.2  | 0.52     | 18.2          | Araujo-M. <i>et al.</i> , 2011 |
| Perú    | Bajío          | MNU-05 | 299.5  | 0.54     | 20.3          | Araujo-M. <i>et al.</i> , 2011 |
| Perú    | Bajío          | MNU-06 | 272.3  | 0.52     | 20.3          | Araujo-M. <i>et al.</i> , 2011 |
| Perú    | Bajío          | TAM 01 | 201.9  | 0.53     | 21.5          | Baker <i>et al.</i> , (2007)   |
| Perú    | Bajío          | TAM 02 | 210.6  | 0.54     | 16.8          | Baker <i>et al.</i> , (2007)   |
| Bolivia | Bajío          | PAL-01 | 185.5  | 0.49     | 18.8          | Presente estudio               |
| Bolivia | Bajío          | EBT-05 | 275    | 0.62     | 22.4          | Presente estudio               |
| Bolivia | Bajío          | EBT-06 | 283    | 0.57     | 15            | Presente estudio               |
|         | Promedio       |        | 246.00 | 0.54     | 19.16         |                                |

## CONCLUSIÓN

El presente estudio constituye el primer reporte de la biomasa y carbono que incluye todos los componentes de la biomasa que albergan los bosques amazónicos de Bolivia. Asimismo, todos los resultados obtenidos se encuentran dentro de los márgenes establecidos por otros estudios realizados en la Amazonia, tanto en Brasil como en Perú. Entonces, se concluye que los bosques de tierra firme almacenan  $187.45 \pm 11.90 \text{ Mg ha}^{-1}$  de carbono y los bosques inundables (várzea) almacenan  $172.77 \pm 14.78 \text{ Mg ha}^{-1}$  de carbono. Siendo que, la porción que contribuye con mayor cantidad de carbono es la parte aérea con un promedio de 74% y 72%, seguido de la biomasa subterránea con 20% y 19% y la necromasa con el 6% y 9% en el bosque inundable y de tierra firme respectivamente. Es decir, cuando se deforesta o elimina la cobertura vegetal o biomasa se libera o emiten a la atmósfera  $634.08 \pm 54 \text{ Mg ha}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$  en el bosque inundable (várzea) y cuando se trata de bosque de tierra firme se libera a la atmósfera  $687,93 \pm 43.66 \text{ Mg ha}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$ .

## AGRADECIMIENTOS

A las instituciones (Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado, Royal Botanic Gardens, Kew), al proyecto Futuros del Bosques (KEW-USZ-Herencia) financiado por la Iniciativa Darwin del Reino Unido, a la Dirección General de Biodiversidad de Bolivia por la refrenda del proyecto, a los responsables de la Estación Biológica Tahuamanu y a las comunidades de Irak, Motacusal, Palacios y San José por la acogida en sus predios. Igualmente, agradecemos a Karen Amelia Flores y Elenir Vaca Zema por la elaboración del Mapa o figura 1. Finalmente, agradecemos a Ivan Igor Linneo Foronda y a José Daniel Soto por la revisión final del documento.

## BIBLIOGRAFIA

- ARAGÃO, L., Y. MALHI, D. METCALFE, J. SILVA-ESPEJO, E. JIMÉNEZ, D. NAVARRETE, S. ALMEIDA, A. COSTA, N. SALINAS, & O. PHILLIPS. 2009. Above-and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. *Biogeosciences* 6: 2759–2778.
- ARAUJO-MURAKAMI, A., L. ARROYO-PADILLA, T.J. KILLEEN & M. SALDIAS-PAZ. 2006. Dinámica del bosque, incorporación y almacenamiento de biomasa y carbono en el Parque Nacional Noel Kempff Mercado. *Ecología en Bolivia*, 41(1): 24–45.
- ARAUJO-MURAKAMI, A., A.G. PARADA, J.J. TERÁN, T. BAKER, T.R. FELDPAUSCH, O.L. PHILLIPS & R.J.W. BRIENEN. 2011. Necromasa de los bosques de Madre de Dios, Perú; una comparación entre bosques de tierra firme y de bajíos. *Revista Peruana de Biología* 18(1): 113–118.
- BAKER T.R., O.L. PHILLIPS, Y. MALHI, S. ALMEIDA, L. ARROYO, A. DI FIORE, T. ERWIN, T.J. KILLEEN, S.G. LAURANCE, W.F. LAURANCE, S.L. LEWIS, J. LLOYD, A. MONTEAGUDO, D.A. NEILL, S. PATINO, N.C.A. PITMAN, J.N.M. SILVA & R.V. MARTINEZ. 2004A. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biol.* 10: 545–562.

- BAKER, T.R., O.L. PHILLIPS, Y. MALHI, S. ALMEIDA, L. ARROYO, A. DI FIORE, T. ERWIN, N. HIGUCHI, T.J. KILLEEN & S.G. LAURANCE. 2004B. Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 359:353–365.
- BAKER T.R., E.N.H. CORONADO, O.L. PHILLIPS, J. MARTIN, G.M.F. VAN DER HEIJDEN, M. GARCIA & J.S. ESPEJO. 2007. Low stocks of coarse woody debris in a southwest Amazonian forest. *Oecología* 152: 495–504.
- CHAMBERS J.Q., J. DOS SANTOS, R.J. RIBEIRO & N. HIGUCHI. 2001. Tree damage, allometric relationships, and above-ground net primary production in central Amazon forest. *For. Ecol. Manag.* 152: 73–84.
- CHAO K.J., O.L. PHILLIPS & T.R. BAKER. 2008. Wood density and stocks of coarse woody debris in a northwestern Amazonian landscape. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 38: 795–805.
- CHAO K.J., O.L. PHILLIPS, T.R. BAKER, J. PEACOCK, G. LOPEZ-GONZALEZ, R.V. MARTINEZ, A. MONTEAGUDO & A. TORRES-LEZAMA. 2009. After trees die: quantities and determinants of necromass across Amazonia. *Biogeosciences*. 6: 1615–1626.
- CHAVE, J., C. ANDALO, S. BROWN, M. CAIRNS, J. CHAMBERS, D. EAMUS, H. FÖLSTER, F. FROMARD, N. HIGUCHI, & T. KIRA. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145:87–99.
- CLARK, D.A., S. BROWN, D. W. KICKLIGHTER, J.Q. CHAMBERS, J.R. THOMLINSON, & J. NI. 2001. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecological Applications* 11:356–370.
- CLARK, D.B., D.A. CLARK, S. BROWN, S.F. OBERBAUER & E. VELDKAMP. 2002. Stocks and flows of coarse woody debris across a tropical rain forest nutrient and topography gradient. *For. Ecol. Manag.* 164: 237–248.
- DAUBER, E., J. TERÁN & R. GUZMÁN. 2000. Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana* 1(1):1–10.
- ELIAS, M. & C. POTVIN. 2003. Assessing inter- and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species. *Can. J. For. Res.* 33: 6: 1039–1045.
- IPCC. 2003. Intergovernmental panel on climate change: Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Japan.
- MALHI Y., T.R. BAKER, O.L. PHILLIPS, S. ALMEIDA, E. ALVAREZ, L. ARROYO, J. CHAVE, C.I. CZIMCZIK, A. DI FIORE, N. HIGUCHI, T.J. KILLEEN, S.G. LAURANCE, W.F. LAURANCE, S.L. LEWIS, L.M.M. MONTOYA, A. MONTEAGUDO, D.A. NEILL, P.N. VARGAS, S. PATINO, N.C.A. PITMAN, C.A. QUESADA, R. SALOMAO, J.N.M. SILVA, A.T. LEZAMA, R.V. MARTINEZ, J. TERBORGH, B. VINCETI & J. LLOYD. 2004. The above-ground coarse wood productivity of 104 Neotropical forest plots. *Global Change Biol.* 10: 563–591.
- METCALFE, D. B., P. MEIR, L. E. O. C. ARAGÃO, Y. MALHI, A. C. L. DA COSTA, A. BRAGA, P. H. L. GONÇALVES, J. DE ATHAYDES, S. S. DE ALMEIDA,

- & M. WILLIAMS. 2007. Factors controlling spatio-temporal variation in carbon dioxide efflux from surface litter, roots, and soil organic matter at four rain forest sites in the eastern Amazon, *J. Geophys. Res.*, 112, G04001, doi:10.1029/2007JG000443.
- MOSTACEDO, B., Z. VILLEGAS, J.C. LICONA, A. ALARCÓN, C. LEAÑO, M. PEÑA-CLAROS & L. POORTER. 2008. Dinámica de la Biomasa en Áreas de Manejo Forestal Sujetas a Diferentes Intensidades de Aprovechamiento. Documento Técnico # 3. Instituto Boliviano de Investigación Forestal, Santa Cruz de la Sierra.
- NAVARRO, G. & W. FERREIRA. 2009. Biogeografía de Bolivia. En: Libro Rojo de parientes silvestres de cultivos de Bolivia. Ministerio de Medio ambiente y Agua. Vice ministerio de Medio Ambiente, Biodiversidad y Cambio Climático. La Paz.
- ORREGO, S. & J. DEL VALLE. 2003. Existencias y tasas de incremento neto de la biomasa y del carbono en bosques primarios intervenidos y secundarios. En S.A. Orrego, J.I del Valle & F.H. Moreno (eds.) pp. 215-242. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: contribuciones para la mitigación del cambio climático. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín-Centro Andino para la Economía en el Medio Ambiente (CAEMA), Panamericana, Bogotá.
- PACHECO, E., F. ALDRETE, G.A. GÓMEZ, G.A. FIERROS, A.V. CETINA & H. VAQUERA. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Rev. Fitotec. Mex.* 30: 251–254.
- PALACE M., M. KELLER & H. SILVA. 2008. Necromass production: Studies in undisturbed and logged Amazon forests. *Ecol. Appl.* 18: 873–884.
- PEACOCK J., T.R. BAKER, S.L. LEWIS, G. LOPEZ-GONZALEZ & O.L. PHILLIPS. 2007. The RAINFOR database: monitoring forest biomass and dynamics. *J. Veg. Sci.* 18: 535–542.
- PHILLIPS, O., T. BAKER, T. FELDPAUSCH, & P. BRIENEN. 2009. manual de campo para la remediación y establecimiento de parcelas. RAINFOR. Accedido el 20 de abril de 2016. <https://www.forestplots.net/upload/es/ManualsES/RAINFOR%20manual%20de%20campo%20version%20Junio%202009%20ESP.pdf>
- QUESADA, C.A., O.L. PHILLIPS, M. SCHWARZ, C. CZIMCZIK, T.R. BAKER, S. PATIÑO, N.M. FYLLAS, M.G. HODNETT, R. HERRERA, S. ALMEIDA, E. ALVAREZ DÁVILA, A. ARNETH, L. ARROYO, K.J. CHAO, N. DEZZEO, T. ERWIN, A. DI FIORE, N. HIGUCHI, E. HONORIO CORONADO, E.M. JIMENEZ, T. KILLEEN, A.T. LEZAMA, G. LLOYD, G. LÓPEZ-GONZÁLEZ, F.J. LUIZÃO, Y. MALHI, A. MONTEAGUDO, D.A. NEILL, P. NÚÑEZ VARGAS, R. PAIVA, J. PEACOCK, M.C. PEÑUELA, A. PEÑA CRUZ, N. PITMAN, N. PRIANTE FILHO, A. PRIETO, H. RAMÍREZ, A. RUDAS, R. SALOMÃO, A.J.B. SANTOS, J. SCHMERLER, N. SILVA, M. SILVEIRA, I.R. VÁSQUEZ, I. VIEIRA, J. TERBORGH & J. LLOYD. 2012. Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. *Biogeosciences* 9: 2203–2246.
- RESTREPO, D.E. 2003. Biomasa de la comunidad de palmas en bosques primarios de la cuenca media del río Porce. Trabajo de grado Ingeniería Forestal, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

- RICE, A.H., E.H. PYLE, S.R. SALESKA, L. HUTYRA, M. PALACE, M. KELLER, P.B. DE CAMARGO, K. PORTILHO, D.F. MARQUES & S.C. WOFSEY. 2004. Carbon balance and vegetation dynamics in an old-growth Amazonian forest. *Ecol. Appl.* 14: S55–S71.
- SENAHAMI. 2012. Accedido el 20 de abril de 2012. <http://www.senamhi.gob.bo/meteorologia.php>.
- SIERRA, C. 2001. Biomasa de raíces en bosques primarios y secundarios del área de influencia de la Central Hidroeléctrica Porce II. Trabajo de grado ingeniero forestal. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- YEPES, A. P., NAVARRETE, D. A., DUQUE, A. J., PHILLIPS, J. F., CABRERA, K. R., ÁLVAREZ, E., & ORDOÑEZ, M. F. 2011. Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia. Accedido el 30 de mayo de 2016: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/022101/022101.htm>.