

MANUAL PARA EL MONITOREO DEL CICLO DEL CARBONO EN BOSQUES AMAZÓNICOS

Eurídice N. Honorio C.
Timothy R. Baker



Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos

Eurídice N. Honorio C.
Timothy R. Baker

E. N. Honorio Coronado & T. R. Baker. 2010. Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana / Universidad de Leeds. Lima, 54 p.

© Autores

Eurídice N. Honorio Coronado, Investigadora, Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, Iquitos, Perú

Timothy R. Baker, Investigador, School of Geography, University of Leeds, United Kingdom

Editora: E. N. Honorio Coronado

Dirección postal: IIAP, Av. José A. Quiñones km 2,5 - Apartado Postal 784, Iquitos - Perú

Telf. (51-65) 265515, e-mail: eurihc@yahoo.com

Primera edición: Octubre 2010

Tiraje: 250 ejemplares

Diseño y diagramación: ESERGRAF - Nilton Zelada Minaya

Fotos: E. N. Honorio Coronado

Publicación financiada por Natural Environment Research Council (NERC), Economic and Social Research Council (ESRC), Department for International Development (DfID)

Impresión: ESERGRAF 426 7147 / mig5548@yahoo.com

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS	5
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1: EL CICLO DEL CARBONO EN UN BOSQUE TROPICAL	11
CAPÍTULO 2: INVENTARIOS DEL CICLO DEL CARBONO	17
1. ¿Cuál es el tamaño de mi área de estudio?	17
2. ¿Qué componente del ciclo del carbono deseo estimar?	18
3. ¿Qué diseño de inventario debo usar?	18
4. ¿Cómo debo realizar las estimaciones o mediciones?	23
CAPÍTULO 3: CÁLCULOS DEL STOCK Y FLUJOS DE CARBONO	33
1. Hojas del dosel	33
2. Fustes y ramas	34
3. Raíces	37
4. Madera muerta	40
5. Hojarasca y detrito fino	42
6. Suelo	44
BIBLIOGRAFÍA	49

Agradecimientos

El material que se muestra en este manual está basado en las presentaciones y discusiones desarrolladas en dos talleres realizados en la ciudad de Iquitos, Perú en el año 2009. Agradecemos a los participantes quienes compartieron sus experiencias y motivaciones durante el desarrollo de los talleres: “Análisis estadístico para apoyar el diseño de los inventarios de carbono”, 15 al 17 de mayo, y “Mediciones integradas de los flujos de carbono en la Amazonia”, 23 al 31 de agosto. En particular, agradecemos a las personas que contribuyeron con la enseñanza: Javier Silva Espejo, Walter Huaraca y Liliana Durand, y con la organización: Dennis del Castillo, Nelly Varela, Pedro Icomedes, Ricardo Farroñay, Ingrid Guillén, Olivia Rendón, Edwin Gatica, Susana Barbarán y Teresa Del Águila.

También, agradecemos a las fuentes de financiamiento de los proyectos que estuvieron involucrados, como el Programa de Investigación en Manejo Integral del Bosque y Servicios Ambientales (PROBOSQUE) del Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, el proyecto “Fortalecimiento de Capacidades para Pagos por Servicios Ambientales (carbono y biodiversidad) en la Amazonía Peruana” de la Universidad de Leeds, Reino Unido, financiado por NERC/ESRC/DFID, y el proyecto “Red Amazónica de Inventarios Forestales – Monitoreo Intensivo de Carbono en la Amazonía” de la Universidad de Leeds y la Universidad de Oxford, Reino Unido, financiado por The Gordon and Betty Moore Foundation. Agradecemos a Rosa María Román Cuesta por su contribución con las metodologías de percepción remota para la estimación del stock y flujo de carbono, Carlos Quesada por su contribución con las metodologías de monitoreo del stock y flujos del carbono en el suelo y a Oliver Phillips por sus comentarios en la edición de este manual.

Introducción

Existe un gran interés por monitorear el ciclo del carbono en los bosques tropicales. Por un lado, se busca entender el papel de estos bosques en el ciclo del carbono a nivel global y los posibles impactos causados por el cambio climático. Por otro lado, se requiere implementar sistemas de monitoreo de carbono como parte de los proyectos que buscan recibir financiamiento para aumentar el stock de carbono en el paisaje (p.e. proyectos de agroforestería, plantaciones) o reducir la tasa de emisiones de dióxido de carbono (p.e. proyectos de deforestación y degradación evitada - REDD). Como resultado de esto, entender el diseño de los inventarios de carbono no es sólo de interés de los científicos, sino también de ONGs y gobiernos nacionales y regionales interesados en implementar proyectos de pagos por servicios ambientales basados en carbono para promover el desarrollo sostenible de los bosques.

Los bosques tropicales juegan un rol importante en el ciclo del carbono global porque contribuyen a regular la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y, por lo tanto, la tasa del cambio climático. Se estima que las emisiones de carbono debido a la deforestación tropical representan aproximadamente 20% de las emisiones totales generadas por las acciones humanas (1.6 Gt C a^{-1} ; Denman *et al.*, 2007). En contraparte, resultados de parcelas permanentes en bosques tropicales en América y África muestran que los bosques intactos han funcionado como sumideros de carbono en las últimas décadas, presentando un aumento en la biomasa de una magnitud casi similar a las emisiones por deforestación (aprox. $0.6 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ en bosques amazónicos, Phillips *et al.* 1998, Baker *et al.*, 2004a, o 1.3 Gt C a^{-1} considerando todos los bosques tropicales intactos, Lewis *et al.*, 2009). En términos generales debemos recalcar que los bosques tropicales intactos han ayudado a reducir el aumento de dióxido de carbono en la atmósfera en las últimas décadas.

Nuevos estudios basados en modelos climáticos predicen una reducción en la cantidad de lluvias en la Amazonía (Malhi *et al.*, 2008), que podría reducir el potencial de los bosques amazónicos de funcionar como sumideros de carbono. Por ejemplo, durante la sequía del 2005, la Red Amazónica de Inventarios Forestales (RAINFOR) registró un aumento en la tasa de

mortalidad de los árboles en los bosques amazónicos que redujo el stock de biomasa viva (Phillips *et al.*, 2009a). Entonces, un aumento en la frecuencia de las sequías podría reducir la cantidad de carbono almacenado en los bosques amazónicos. Por lo tanto, es de mucha importancia contar con programas de monitoreo del ciclo de carbono a largo plazo en los diferentes tipos de bosques de la Amazonía para cuantificar estos posibles cambios.

Por otro lado, existe el interés en desarrollar sistemas de pago relacionados al almacenamiento de carbono. La preocupación por estabilizar las concentraciones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera motivó la firma de acuerdos internacionales que buscan la adaptación y mitigación al cambio climático a través de mecanismos económicos (Stern, 2007). Los programas de reducción de emisiones causadas por la deforestación y degradación de los bosques (REDD) y los mecanismos de desarrollo limpio (MDL) forestal son buenos ejemplos. En el caso de los proyectos REDD se busca reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera debido a la deforestación tropical y el punto clave de estos proyectos es que deben demostrar reducciones reales y medibles en las emisiones de dióxido de carbono que no habrían ocurrido sin la ejecución del proyecto (Rendón *et al.*, 2009). En el caso de los proyectos MDL forestal, se busca fijar parte del dióxido de carbono de la atmósfera en la biomasa de los árboles a través de la reforestación y aforestación de áreas degradadas y el punto clave es la estimación de la cantidad de carbono fijado con la presencia de una plantación (Pearson *et al.*, 2005). En ambos casos, la medición y monitoreo del carbono es muy importante.

En la última década, diversos manuales han sido elaborados para la medición (p.e. Schlegel *et al.*, 2001; Aguirre & Aguirre, 2004; Pearson *et al.*, 2005; Rüginitz *et al.*, 2009) y el monitoreo del carbono en los bosques tropicales (p.e. Phillips *et al.*, 2009a; 2009b). Sin embargo, pocos manuales ofrecen un entendimiento de los procesos y las preguntas claves que son importantes entender cuando deseamos ajustar las metodologías a las necesidades de nuestro proyecto, en vez de sólo seguir 'una receta'. Tener este nivel de entendimiento es importante para los investigadores quienes están entrando al tema del ciclo de carbono, y para las organizaciones que vienen implementando proyectos de carbono. A la vez, pocos manuales ofrecen detalles de los cálculos necesarios para estimar las variables claves. En vista a esta necesidad, el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana y la Universidad de Leeds se propusieron desarrollar este manual, cuyo contenido está basado en dos talleres realizados en Iquitos, Perú, durante los meses de mayo y agosto del 2009.

El enfoque de este manual es introducir la importancia del ciclo de carbono, las técnicas de campo y los cálculos necesarios para el monitoreo del ciclo de carbono en los bosques amazónicos. Sin embargo, deseamos recordarles que existe un gran rango de documentos que se pueden usar para obtener más información sobre estos temas. En particular, si el enfoque del estudio es la estimación del stock de carbono para apoyar un proyecto de pagos por servicios ambientales, como REDD, debemos también consultar los documentos detallados sobre los diferentes niveles de precisión, requisitos y métodos empleados en estos proyectos, como GOF-C-GOLD (2008) y Pearson et al. (2005). Si el enfoque del estudio es entender los factores que controlan patrones espaciales o temporales en los stocks o flujos de carbono en los bosques tropicales, las publicaciones relacionadas a este tema están disponibles en la página web del proyecto Red Amazónica de Inventarios Forestales (RAINFOR) http://www.geog.leeds.ac.uk/projects/rainfor/pages/publicaciones_esp.html. Además, RAINFOR tiene una serie de manuales sobre las técnicas de campo usadas para la medición de los árboles en parcelas permanentes, las hojas, las raíces, la madera muerta, el suelo, entre otras variables de interés (http://www.geog.leeds.ac.uk/projects/rainfor/pages/manuales_esp.html).

1 | El ciclo del carbono en un bosque tropical

El ciclo de carbono está determinado por el almacenamiento y la transferencia entre la atmósfera, biósfera, litósfera y océanos de moléculas constituidas por el elemento carbono. Si queremos estudiar este ciclo, lo más importante que debemos entender, es la diferencia entre un stock y un flujo de carbono. En un bosque tropical, el stock de carbono es todo aquello que se encuentra almacenado en los diferentes componentes (Figura 1: las cajas negras), y los flujos son todos aquellos procesos que afectan el stock (Figura 1: las flechas). Cuando cuantificamos el stock de un bosque, muestreamos: a) la biomasa viva almacenada en las hojas, las ramas, el fuste y las raíces; b) la necromasa almacenada en la hojarasca y la madera muerta; y c) el carbono en la materia orgánica del suelo. Cuando cuantificamos los flujos del carbono en el bosque muestreamos: a) la fotosíntesis de las hojas, b) la respiración autotrófica (p.e. árbol) y heterotrófica (p.e. hojarasca, madera muerta, suelo); c) la mortalidad de troncos, ramas, hojas y raíces; y d) la descomposición de la madera y la hojarasca causada por los organismos degradadores. El incremento neto en la biomasa debido a la fotosíntesis, excluyendo el carbono utilizado en la respiración se denomina productividad primaria neta (PPN; Figura 1: barras horizontales de color verde), y se cuantifica midiendo el crecimiento del fuste y la producción de ramas, hojas y raíces.

Un método para diferenciar los stocks de los flujos de carbono es considerar las unidades de medida utilizadas. Los stocks de carbono se expresan en términos de peso por unidad de área (p.e. Mg ha^{-1}), mientras los valores de los flujos siempre incluyen la variable tiempo y cuantifican la cantidad de carbono que entra o sale de un componente del stock de carbono en el tiempo (p.e. $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Por ejemplo, la biomasa total del bosque es un stock, expresado normalmente en Mg ha^{-1} e incluye el carbono almacenado en los fustes, ramas, hojas, raíces, madera muerta, hojarasca y en el suelo del bosque. Sin embargo, la productividad primaria neta, la respiración, la mortalidad, la descomposición y la fotosíntesis son flujos que normalmente

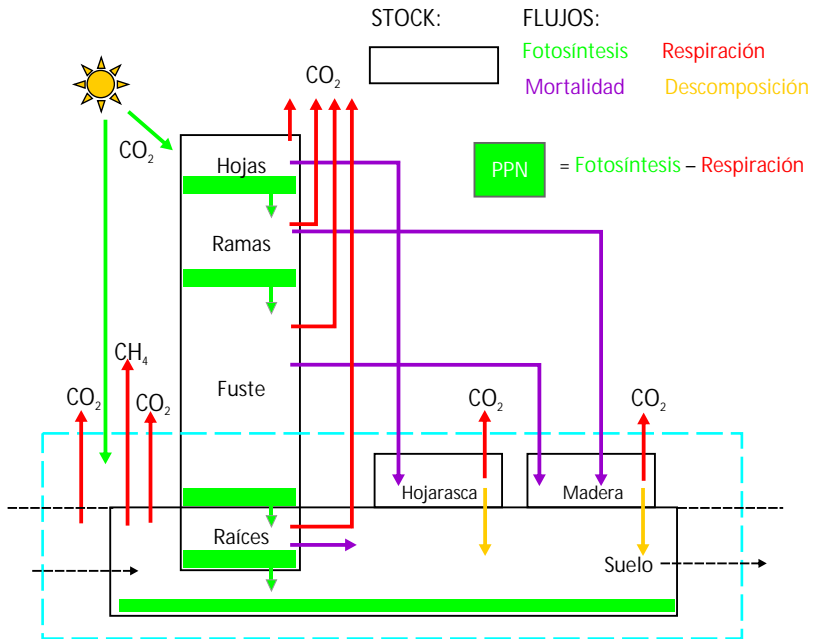


Figura 1. Diagrama de los stocks y flujos de carbono en un bosque tropical que podría estar estacionalmente inundado.

se expresan en $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Debemos recordar que podemos estimar la cantidad de carbono de un componente del bosque determinando su peso seco. Existe una pequeña variación en la relación entre el peso seco y la cantidad de carbono de las diferentes especies tropicales (Elias y Potvin, 2003), sin embargo, está aceptado asumir que el 50% del peso seco es carbono (p.e. Pearson *et al.*, 2005).

Si entendemos la diferencia entre un stock y un flujo de carbono, podemos considerar el significado de los términos sumidero y fuente de carbono. Un área determinada de bosque es considerada como un sumidero de carbono, si la cantidad almacenada de carbono aumenta con el tiempo. Es decir, si el cambio en el stock de carbono es positivo. En un bosque, esto ocurre si los flujos que agregan carbono al stock, como el crecimiento, son más altos que los flujos que disminuyen el stock, como la mortalidad, por un periodo dado.

Por otro lado, un área de bosque es considerada como una fuente de carbono cuando el stock de carbono disminuye con el tiempo. En general, el punto clave, es que los cambios en el stock de carbono ocurren debido al balance entre todos los flujos que entran o salen del componente. Entonces, es importante estudiar los stocks y los flujos de carbono para tener una idea completa del ciclo de carbono de un bosque.

Con esta información, estamos listos para comprender en más detalle el ciclo de carbono en los bosques tropicales. Estos ecosistemas juegan un rol importante en el ciclo del carbono global debido a la gran cantidad de stock total de carbono que almacenan (aprox. 424 Pg C incluyendo los suelos, o 37% del carbono almacenado en los ecosistemas boscosos; Dixon *et al.*, 1994) y a los grandes flujos de carbono que estos bosques procesan cada año (fijan aprox. 46 Pg C a⁻¹, o 33% de la productividad primaria neta terrestre global; del Grosso *et al.*, 2008). La Amazonía, con sus 6 millones de km², es el bosque tropical más grande del mundo, y alberga aprox. 86 Pg C, excluyendo el carbono en el suelo (Saatchi *et al.*, 2007). La mayoría de este carbono está almacenado en la biomasa viva; la necromasa contribuye aprox. 9.6 Pg C (Chao *et al.*, 2009). El carbono en el suelo es un componente importante del stock de carbono total y puede contribuir aprox. 50-70 % del carbono almacenado en los otros componentes del bosque (Malhi *et al.*, 2009).

Los stocks y los flujos de carbono no presentan valores similares en cualquier parte de la Amazonía. Para analizar el ciclo de carbono en diferentes lugares, debemos también tener en cuenta la variación de las condiciones ambientales que presenta la zona de estudio. Por ejemplo, la fertilidad de los suelos en la Amazonía es un factor importante para el almacenamiento y procesamiento del carbono. Existe un gran contraste en las regiones del este amazónico (Guyana y Brasil), zonas que son geológicamente más antiguas y presentan suelos pobres, con las áreas del oeste amazónico (Ecuador, Colombia, Perú, Bolivia) donde los sedimentos de los Andes fueron depositados más recientemente. La variable que afecta los valores de biomasa en esta gradiente es la densidad de la madera. Los bosques amazónicos del este suelen ser dominados por especies de las familias Lecythidaceae y Sapotaceae que presentan densidades de la madera de 0.72 g cm⁻³ y 0.77 g cm⁻³, respectivamente. Estos valores son mayores a los reportados para las especies dominantes del oeste amazónico, Moraceae con una densidad de 0.61 g cm⁻³ y Myristicaceae de 0.50 g cm⁻³ (Zanne *et al.*, 2009). Por lo tanto, los valores del stock de carbono son mayores en las zonas del este amazónico y menores hacia el oeste debido a este patrón (Baker *et al.*, 2004b).

Las unidades de medida utilizadas en los stocks de carbono se expresan en términos de peso de carbono por unidad de área (Mg C ha^{-1}) y los valores de los flujos siempre incluyen la variable tiempo ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Por ejemplo, $150 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ se lee "Ciento cincuenta megagramos de carbono por hectárea al año". Es importante entender la relación entre las diferentes unidades usadas en los resultados de los estudios del ciclo de carbono, tales como:

1 Megagramo (Mg) = 1,000 Kilogramos (kg) = 1 Tonelada (t)

1 Petagramo (Pg) = 1,000,000,000 Mg = 1 Gigatonelada (Gt)

1 Hectárea (ha) = $10,000 \text{ m}^2$

A cada valor promedio de stock o flujo de carbono, o parámetro de interés, se le debe cuantificar su incertidumbre. La incertidumbre se calcula a través de la replicación de las mediciones del mismo parámetro y dependerá de la calidad de las mediciones o error de medición y de la variación actual del parámetro en el paisaje o error de muestreo. Es importante minimizar la incertidumbre del parámetro en estudio para poder diferenciar los valores de, por ejemplo, diferentes localidades o tipos de bosque, o los valores de otras mediciones realizadas durante el tiempo. El error de medición se puede minimizar usando metodologías estándares e instrumentos de precisión, mientras el error de muestreo puede minimizarse muestreando el parámetro de interés adecuadamente, es decir, con un número y tamaño adecuado de muestras (ver casilla 2). La incertidumbre del valor promedio del parámetro de interés se puede expresar de diferentes maneras. Por ejemplo, donde X_i es cada observación, n es el número de observaciones de X y t es el valor de t de Student asociado a una probabilidad () de 0.05 o 5%:

$$\text{Promedio} \pm \text{desviación estándar (DE)} = \text{Promedio} \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \text{Promedio})^2}$$

$$\text{Promedio} \pm \text{error estándar (EE)} = \text{Promedio} \pm \frac{\text{DE}}{\sqrt{n}}$$

$$\text{Promedio} \pm \text{coeficiente de variación (CV)} = \text{Promedio} \pm \frac{\text{DE}}{\text{Promedio}}$$

$$\text{Promedio} \pm \text{intervalo de confianza al 95\% (IC)} = \text{Promedio} \pm (\text{EE} * t_a)$$

El valor de incertidumbre más útil es el representado por "promedio \pm intervalo de confianza al 95%". El rango dado por este intervalo significa que si el estudio fuera repetido reiterativamente, en el 95% de los casos se obtendría un valor promedio dentro del valor mínimo y máximo de este rango. El intervalo de confianza también puede expresarse como un porcentaje del promedio tal como:

$$\text{Error (\%)} = \frac{\text{IC}}{\text{Promedio}} \times 100$$

Por ejemplo, en las publicaciones sobre la medición del stock de carbono, se dice que es aceptable tener un 'error' de 10-20%. Entonces, si un estudio tiene un promedio de stock de 150 Mg C ha^{-1} y un error de 10%, significa que si las mediciones fueran repetidas, 95% de las veces el promedio de cada repetición estaría dentro de un rango de 135 y 165 Mg C ha^{-1} .

Los flujos de carbono, como la productividad y la mortalidad de los fustes, siguen un patrón opuesto al del stock de carbono en la Amazonía. Se estima que la productividad y la mortalidad de los fustes en los bosques del oeste tienen valores mayores a los del este Amazónico debido a la variación en la fertilidad del suelo, especialmente por la cantidad de fósforo disponible (Phillips *et al.*, 2004; Quesada *et al.*, 2009). En general, esta variación en la productividad de los fustes, está relacionada con los mismos patrones en otros componentes de la productividad primaria neta, como hojas y raíces (Aragão *et al.*, 2009).

Los estudios mencionados nos ofrecen información sobre los diferentes componentes del ciclo de carbono y los factores que controlan estos patrones. Sin embargo, aún existen muchos vacíos de información. En la Amazonía hay tipos de bosque, como los aguajales y picales, que presentan poca información sobre los flujos de carbono y también existen procesos que poco fueron estudiados. Por ejemplo, en cuanto a la descomposición de la necromasa, existen muy pocos datos reportados especialmente para la Amazonía. En un estudio realizado al sur de Perú, se estimó que la tasa de descomposición de la madera muerta fue de 0.2 (Baker *et al.*, 2007), permaneciendo la madera en el bosque por 5 a 6 años. Valores similares fueron reportados en Brasil (0.19, Chambers *et al.*, 2000; 0.34, Martius, 1997) pero la variación en los métodos utilizados para su estimación no permite comparar estos valores, y por lo tanto, más estudios comparativos son necesarios realizar.

2 | Inventarios del ciclo del carbono

Los inventarios del ciclo del carbono en los bosques tropicales son importantes para una gran variedad de estudios. Por ejemplo, un paso importante al inicio del desarrollo de un proyecto REDD, es el inventario del stock de carbono del área del proyecto, o cuando deseamos entender los posibles efectos del cambio climático en el stock de carbono de los bosques tropicales, pensamos en medir los diferentes flujos de carbono a largo plazo. En este capítulo daremos algunas pautas y herramientas estadísticas básicas que nos permitan seleccionar y utilizar las metodologías en función a los diferentes enfoques de los proyectos de carbono que estemos trabajando. Para esto hemos formulado cuatro preguntas donde se discuten temas relacionados a la escala del estudio, las preguntas de interés, el diseño de muestreo y las mediciones que deseamos realizar.

1. ¿CUÁL ES EL TAMAÑO DE MI ÁREA DE ESTUDIO?

La escala es sumamente importante para definir el diseño de un estudio y los factores que pueden afectar el ciclo de carbono. Generalmente los estudios de carbono se desarrollan en un área definida que puede cubrir una gran área geográfica como los trópicos (escala global), intermedia como la Amazonía del oeste o un país (escala regional), o puntual como una localidad (escala paisaje). La escala del estudio define cuáles son los factores ambientales más importantes que deben ser tomados en cuenta durante el diseño del estudio. Para ser representativa el área, es importante tomar muestras de todas las unidades ambientales presentes en la zona. Por ejemplo, un estudio a escala regional en la Amazonía deberá tener en cuenta la variación ambiental como la lluvia, la temperatura y el suelo. Dentro de una localidad, como Jenaro Herrera en el departamento de Loreto, un estudio del carbono deberá considerar las variaciones del paisaje causadas por variables ambientales como el suelo, tipo de drenaje y periodo de inundación. A una escala de paisaje, algunos factores como la lluvia no presentan variación importante dentro del área y por lo tanto no tendrán gran efecto sobre las variables evaluadas. La escala del estudio también afecta su diseño. Por ejemplo, a la escala de la Amazonía, es difícil establecer un diseño de muestreo totalmente aleatorio, debido a consideraciones de accesibilidad, pero un diseño

aleatorio será más factible, si el interés se enfoca por ejemplo a la escala de una reserva nacional (Tabla 1).

2. ¿QUÉ COMPONENTE DEL CICLO DEL CARBONO DESEO ESTIMAR?

Los inventarios de carbono deben siempre estar enfocados en las necesidades del proyecto y en las preguntas que deseamos contestar. Para esto debemos recordar los conceptos relacionados al ciclo del carbono en los bosques tropicales, especialmente la diferencia entre el stock y los flujos de carbono. El stock de carbono de un bosque está dado por el carbono almacenado en el suelo, en la biomasa sobre y debajo del suelo, y en la necromasa (madera muerta, hojarasca y detrito). Los flujos de carbono están dados por todos aquellos procesos (fotosíntesis, respiración, mortalidad y descomposición) que afectan el stock de un bosque permitiendo una asignación o incremento de carbono en los diferentes componentes (productividad). Tanto el stock y los flujos pueden ser medidos o estimados para los diferentes componentes del bosque (en adelante también denominados variables de interés), pudiéndose dividir en: 1) stock y flujos sobre y debajo del suelo; 2) stock y flujos de diferentes formas de vida, como árboles, arbustos, lianas, palmeras; 3) stock y flujos de diferentes componentes de las plantas, como hojas, ramas, troncos, o raíces, o 4) stock y flujos de materia viva y materia muerta.

Con estos conceptos en mente debemos definir nuestras necesidades o preguntas a contestar. Por ejemplo, en el caso de los proyectos REDD que están en proceso de implementación en la Amazonía (p.e. Parque Nacional Tambopata, Concesión para la Conservación Río Los Amigos, P.N. Cordillera Azul, Perú; P.N. Noel Kempff, Bolivia) existe una prioridad de estimar el stock de carbono. En el caso de otros proyectos de investigación como RAINFOR en la Amazonía, no solo están interesados en calcular el stock de carbono sino también en entender el impacto de los factores ambientales en los flujos de carbono y en monitorear los cambios en el stock y los flujos de carbono en el tiempo (Malhi *et al.*, 2002).

3. ¿QUÉ DISEÑO DE INVENTARIO DEBO USAR?

Existen diferentes diseños de inventario para estimar el stock y los flujos de carbono, sin embargo debemos tener en cuenta que el diseño que elaboremos o seleccionemos debe ajustarse a la escala del estudio y debe ser adecuado para responder a las preguntas planteadas. En este sentido debemos tener en claro que al aplicar el diseño del inventario en campo debemos al menos representar la variación natural de la variable de interés. Antes de dar ejemplos sobre diseños de inventarios, daremos algunos conceptos básicos referentes al cálculo del tamaño y número de las unidades de muestreo a aplicar.

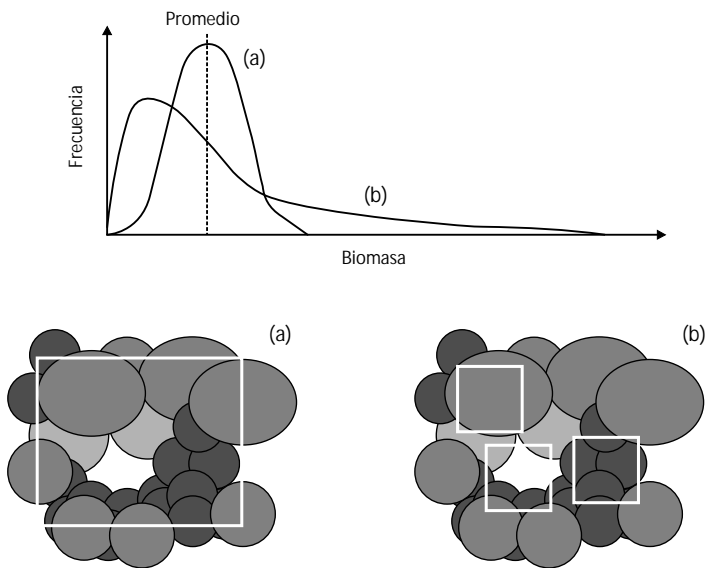
Tabla 1. Diseños de inventarios de carbono arbóreo realizados en bosques neotropicales, clasificados por la escala del estudio. Paisaje (P): aprox. $10 \cdot 10^4$ ha; regional (R): aprox. $10^5 - 10^9$ ha; global (G): $> 10^{10}$ ha.

Escala	Pregunta	Muestreo	Tamaño (ha) ¹	Tipos de bosque	Nº de parcelas	Lugar	Diámetro o altura mínima	País	Referencia
P	¿Cuál es el stock de carbono del área protegida?	Aleatorio, estratificado				Noel Kempff			
P	¿Cuál es el stock de carbono del área protegida?	Aleatorio, estratificado	0.13	3	104	Yuracyacu	5 cm	Perú	AIDER (2008) (2000)
P	¿Cuál es el stock de carbono del área protegida?	Aleatorio, estratificado	0.13	3	32	ACCA	1.3 m alt	Perú	Winrock (2006)
P	¿Cómo cambia la biomasa del área protegida?	agrupado	0.5	3	18	La Selva	10 cm	Costa Rica	Clark (2004)
P	¿Cómo varía la biomasa con los factores edáficos?	Aleatorio, estratificado	1	Por altitud	72	Res. Ducke	1 cm	Brasil	Castilho et al. (2006)
R	¿Cuál es el stock de carbono en la Amazonia brasilera?	Aleatorio, estratificado	1	>100	>1000	Amazonia brasilera	31.8 cm	Brasil	RADAMBRASIL citado en Houghton et al. (2001)
R	¿Cuál es el stock de carbono en los bosques de San Martín?	Aleatorio, estratificado	0.5	12	165	San Martín	3 cm	Perú	CEDISA (2009)
R	¿Qué factores controlan los patrones en la biomasa de la Amazonia?	Representativo agrupado	1	-	56	Amazonia	10 cm	Amz.	Baker et al. (2004b)
G	¿Cómo cambia la biomasa de los bosques tropicales?	Representativo	16-52	-	10	América, África, Asia	1 cm	-	Chave et al. (2008)

¹ En varios casos, los estudios usan un diseño anidado para muestrear los diferentes componentes del stock de carbono. Aquí, solo incluimos el tamaño de la parcela más grande.

3.1 Estimación del tamaño de la unidad de muestreo

Como primer paso en el diseño del muestreo, es importante considerar el efecto del tamaño de la unidad de muestreo (p.e. parcela) en la distribución de los datos o valores de la variable de interés. El tamaño de la unidad de muestreo debe ser suficientemente grande para incluir la variación de la variable de interés a una escala local, por lo tanto, dependerá de la variable que estemos estudiando. Por ejemplo, en estudios del stock de carbono es importante que la unidad mínima de muestreo (p.e. 0.5 ha; Chave et al., 2003) considere la variación en la estructura del bosque como presencia de árboles pequeños, árboles grandes y claros naturales (Fig. 2).



(a) Distribución normal de los datos con la mayor frecuencia de valores cerca al promedio. Se obtiene cuando el tamaño de la muestra es suficientemente grande para incorporar la variación estructural del bosque a una escala pequeña.

(b) Distribución no normal de los datos, con la mayor frecuencia de valores hacia un lado del promedio. Se obtiene cuando el tamaño de la muestra es muy pequeño para incluir la variación del bosque. Esto ocurre debido a la presencia de árboles grandes y de claros.

Figura 2. Efecto del tamaño de la unidad de muestreo en la distribución de los datos obtenidos. Es importante notar que el tamaño de muestra no cambia el promedio pero si afecta el rango o la incertidumbre de los valores obtenidos debido a la diferencia que se genera en la variabilidad en los datos.

Para el monitoreo del flujo de carbono debido a la mortalidad de los árboles, requeriremos un tamaño mínimo de parcela de mayor magnitud que el utilizado para la medición del stock, porque la caída de los árboles grandes causan gran variación espacial y temporal en este flujo (Clark & Clark, 1996). Entonces, un adecuado tamaño de la unidad de muestreo debe permitirnos obtener una distribución normal de los datos y por ende el uso de estadísticas paramétricas convencionales como el promedio, la desviación estándar y el ANOVA.

3.2 Estimación del número de unidades de muestreo

Después de definir el tamaño adecuado de la unidad de muestreo, y asumiendo que obtendremos una distribución aproximadamente normal de los datos, podemos calcular el número de unidades que necesitamos para obtener la precisión que queremos (Casilla 2). El número de unidades de muestreo dependerá de la variación que se encuentre en los datos (el coeficiente de variación se puede calcular o estimar con datos previos tomados en campo) y el nivel de precisión o error que queremos obtener. Por ejemplo, para los estudios del stock de carbono, se considera adecuado el uso de un error de 10 a 20% (Pearson *et al.*, 2005).

El número de unidades de muestreo está dado por la fórmula:

$$n = \frac{(t^2 \times CV^2)}{E^2}$$

Donde n es el número de unidades de muestreo, t es el valor estadístico de t de Student a una probabilidad dada (normalmente = 0.05), E es el error deseado (porcentaje del promedio, 10-20%) y CV es el coeficiente de variación de los datos dado por:

$$CV = \frac{\text{desviación estándar}}{\text{Promedio}} \times 100$$

3.3 Diseño de inventario

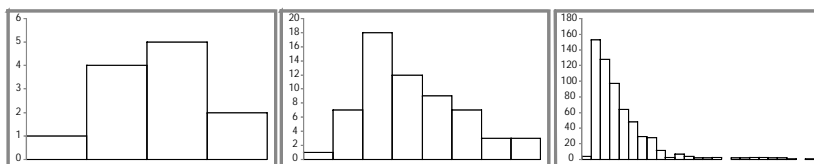
El objetivo de cualquier diseño de inventario es obtener valores representativos de las diferentes variables de interés en el área de estudio (Casilla 3). En muchos casos, se usa un tamaño de unidad de muestreo diferente para cada componente del ciclo de carbono, como por ejemplo parcelas pequeñas para árboles del sotobosque y parcelas grandes para los árboles de dosel. En este caso, se puede usar un diseño de parcelas anidadas con diferentes tamaños de unidad de muestreo para los diferentes componentes del stock de carbono. Considerando el área de las diferentes parcelas, se puede calcular el promedio y error total de muestreo (Casilla 4).

Casilla 2 Determinación del tamaño y número de las unidades de muestreo

Utilizando datos preliminares del inventario de biomasa viva sobre el suelo en bosques estacionalmente inundados de Jenaro Herrera (Loreto, Perú) se determinó el tamaño y número de unidades de muestreo necesarias para evaluar la biomasa con un error del 10%. Los individuos con diámetro igual o mayor a 10 cm fueron medidos en 12 parcelas de 0.5 ha (50 x 100 m). Para ver el efecto del tamaño de las unidades de muestreo, se calculó la biomasa en subparcelas más pequeñas (10 x 100 m y 10 x 10 m)

Parcela	Biomasa (kg)		
	50 x 100 m	10 x 100 m	10 x 10 m
1	137 668	25 001	1 044
2	180 749	22 749	1 588
...
12	132 383	21 602	4 874
...
60		16 133	1 374
...	
600			0

Tamaño de unidad de muestreo	50 x 100	10 x 100	10 x 10	m
Área de parcela	0.5	0.1	0.01	ha
Número de parcelas	12	60	600	parcelas
Promedio de biomasa	118 206	23 641	2 364	kg
Desviación estándar	29 776	8 573	2 627	kg
Coefficiente de variación (CV)	25.2	36.3	111.1	%
Distribuido normalmente?	SI	(SI)	NO	



t de Student (t)	2.20	2.00	1.96	
Error (E)	10	10	10	%
Nº unidades de muestreo (n)	31	53	476	parcelas
$n = (t^2 * CV^2) / E^2$				
Área total de muestreo	15.4	5.3	4.8	ha

El tamaño de parcela que muestra una distribución normal es de 0.5 ha y el número de parcelas a establecer para obtener un valor de biomasa con un error al 10% es de 31.

Otro aspecto importante del diseño, es la ubicación espacial de las diferentes unidades de muestreo. Existen diversos métodos para ubicar las unidades en el área de estudio como por ejemplo, el muestreo aleatorio y el muestreo sistemático. Los muestreos aleatorios evitan cualquier sesgo en los resultados, y pueden ser estratificados cuando contamos con diferentes tipos de bosque. Si los diferentes tipos de bosque tienen valores distintos en las variables de interés, un diseño de inventario estratificado será más eficiente que un diseño completamente aleatorio. Por ejemplo, en el caso de los proyectos REDD que se mencionaron anteriormente, se usan un gran número de parcelas pequeñas y un sistema de muestreo aleatorio y estratificado para los diferentes tipos de bosque (cf. Pearson *et al.*, 2005). A una mayor escala, un país o una región, es difícil implementar un estudio aleatoriamente estratificado para todos los tipos de bosque (sin embargo, el proyecto RADAMBRASIL es una excepción importante, Tabla 1). Otra opción es ubicar las parcelas en los tipos de bosque más representativos (p.e. Baker *et al.*, 2004a) y después los resultados pueden ser extrapolados a una escala más grande usando mapas de tipos de bosque o análisis de imágenes de satélite (p.e. Anderson *et al.*, 2009). Es importante elegir una estratificación que sea apropiada para captar la variabilidad de la variable de interés en el paisaje. Por ejemplo, en el caso de la estimación de la biomasa aérea a la escala del paisaje, los valores variarían con el nivel de perturbación y, posiblemente, con el tipo de bosque. En este caso, la fórmula para calcular el número de parcelas para cada estrato en un diseño estratificado puede calcularse usando el formato en Excel desarrollado por Winrock International (Pearson *et al.*, 2005): http://www.winrock.org/ecosystems/files/Winrock_Sampling_Calculator.xls

4. ¿CÓMO DEBO REALIZAR LAS ESTIMACIONES O MEDICIONES?

Diferentes instituciones y grupos de trabajo han desarrollado una variedad de metodologías para medir y estimar el stock y los flujos de carbono en bosques tropicales. Debemos tener en cuenta que no existe una receta única, por lo tanto, debemos primero conocer las metodologías que están disponibles y evaluar cuáles de ellas necesitamos para contestar nuestras preguntas de interés.

4.1 Metodologías para el muestreo del stock de carbono

Muestreo destructivo: Esta metodología está basada en el peso directo de los diferentes componentes de un bosque usando una balanza. Se aplica generalmente para los componentes menores como el peso de arbustos, hierbas, árboles con diámetro menor a 3 cm, madera muerta con diámetro menor a 10 cm, hojarasca y raíces finas (ver capítulo 3). En el caso de los

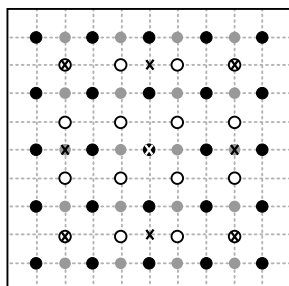
Casilla 3 Ejemplos de diseños de inventario del ciclo de carbono

The center for Tropical Forest Science (CTFS)

CTFS es una red internacional establecida para estudiar la diversidad y las funciones de los bosques templados y tropicales a una escala global y a largo tiempo. Su estrategia de inventario está basada en un muestreo representativo y el establecimiento de parcelas de 25 a 50 hectáreas en bosques intactos. Dentro de cada parcela todos los individuos con diámetro mayor a 1 cm son marcados y evaluados bajo el uso de metodologías estándares (<http://www.ctfs.si.edu/>). Actualmente, vienen implementando una iniciativa para monitorear el stock y los flujos de carbono dentro de sus parcelas, donde los diferentes componentes son monitoreados a diferentes intervalos de tiempo (Muller-Landau, 2008).

Red Amazónica de Inventarios Forestales (RAINFOR)

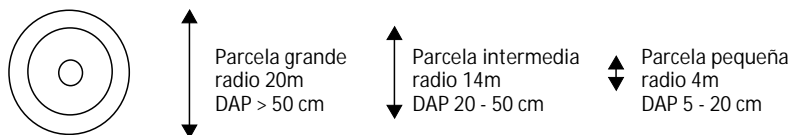
RAINFOR es una red internacional establecida para entender los stocks y flujos de carbono de los bosques amazónicos. Desde el año 2000 han establecido un marco sistemático para monitorear esta región a largo plazo a través del uso de metodologías estándares. La estrategia de inventario está basada en un muestreo representativo del paisaje y el uso de parcelas de monitoreo permanente que cubren una hectárea de bosque, generalmente de 100 x 100 m. (<http://www.geog.leeds.ac.uk/projects/rainfor/>). Dentro de esta parcela, los diferentes componentes son evaluados y monitoreados en el tiempo (Phillips *et al.*, 2009b; Metcalfe *et al.*, 2009).



- Árboles grandes (DAP >10cm)
- Caida de hojas
- Raíces (Ingrowth cores)
- Respiración del suelo, H%, T°C y LAI
- ✱ Raíces (Rhizotrones), hojarasca, suelos

Winrock International

WINROCK es una organización sin fines de lucro que trabaja a nivel mundial para fortalecer las desventajas, incrementar las oportunidades económicas y sostener los recursos naturales. En el Perú, desarrolla proyectos de stock de carbono a nivel de paisaje (p.e. Los Amigos, Cordillera Azul) a través de una estrategia de inventario estratificado y el uso de parcelas anidadas circulares de 20 m de radio o rectangulares de 20 x 50 m. (<http://www.winrock.org/publications.asp>)



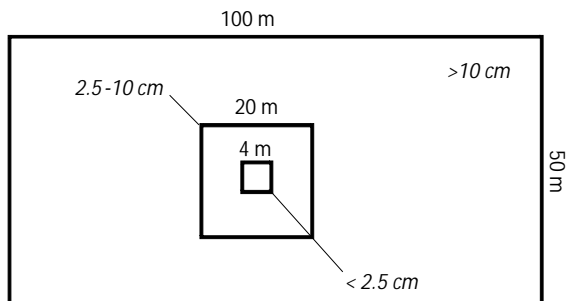
árboles de mayor tamaño, esta metodología se utiliza para obtener o verificar ecuaciones alométricas que relacionan la biomasa del árbol con variables medibles en el bosque como el diámetro del árbol. En este caso, se prueba estadísticamente cuál de las variables medidas está más relacionada con la biomasa. A pesar que existen algunos estudios de muestreo destructivo de árboles y palmeras en la Amazonía (p.e. Nascimento & Laurance, 2002; Chave *et al.*, 2005; Freitas *et al.*, 2006), estos cuentan con poca representatividad de toda la variación en el tamaño de los individuos, especialmente de aquellos individuos grandes. Por lo tanto, aún existe una gran necesidad por seguir produciendo ecuaciones alométricas que representen adecuadamente la variabilidad de los bosques amazónicos.

Muestreo no destructivo: Esta metodología nos permite hacer estimaciones indirectas de la biomasa usando ecuaciones alométricas. El diámetro del árbol es una variable relativamente fácil de medir en campo y estima muy bien la biomasa (Chave *et al.*, 2005); sin embargo, para hacer comparaciones de stock de carbono entre diferentes lugares o tipos de bosque es necesario considerar otras variables como la altura de los individuos y la densidad de la madera. Debemos tomar en cuenta que la variable que estima mejor la biomasa en los individuos arbóreos no siempre es la misma, por ejemplo en el caso de las palmeras como *Mauritia flexuosa*, la altura es la variable más importante para estimar la biomasa, mientras el diámetro es generalmente constante en los individuos adultos y por lo tanto no presenta relación alguna con la biomasa. Entonces, en este caso, la altura debe ser correctamente medida en todos aquellos individuos presentes en las parcelas de muestreo.

La variable altura es poco estudiada en los bosques tropicales debido a que su medición puede ser complicada y difícil de realizar. En el caso de estudios del ciclo de carbono, se sugiere al menos generar una ecuación por tipo de bosque que relacione la altura con el diámetro de los individuos. Para desarrollar esta ecuación, debemos representar equitativamente la variación en el tamaño de los individuos del bosque, por ejemplo, podemos tomar 10 individuos por clase diamétrica en intervalos de 10 cm. En campo, el diámetro y la altura de estos individuos serán medidos con instrumentos de precisión como por ejemplo usando la cinta diamétrica y el clinómetro. Usando esta ecuación, la altura puede ser estimada para cada árbol en las parcelas de muestreo. La variable densidad de la madera puede obtenerse de las bases de datos de especies tropicales disponibles en Internet (p.e. Zanne *et al.*, 2009). Si contamos con datos confiables de densidad colectados en la zona de estudio, estos deberán ser aplicados en los cálculos de la biomasa para todos los individuos y las especies presentes. Podemos consultar también la metodología desarrollada por Chave (2005) para obtener valores de densidad promedio por parcela.

Casilla 4 Cálculo del error de muestreo con un diseño anidado

Para un bosque estacionalmente inundado de Jenaro Herrera en Loreto, Perú se determinó que era necesario establecer parcelas de al menos 0.5 ha para estimar la biomasa de los individuos con DAP ≥ 10 cm con una distribución normal de los datos, parcelas de 20 x 20 m para la medición de individuos de 2.5 - 10 cm, y parcelas de 4 x 4 m para individuos con DAP < 2.5 cm.



Para calcular el número total de parcelas en un diseño anidado debemos enfocarnos en el número de parcelas necesarias para muestrear el componente más importante de la biomasa ($n = 31$ parcelas y $E = 10\%$, árboles grandes) y aceptar un error mayor en los componentes menos importantes porque contribuyen menos a la biomasa total (13% para las parcelas de 20 x 20 m y 14% para aquellas de 4 x 4 m). Por lo tanto, para calcular el error total del muestreo de este diseño debemos tener en cuenta que:

Intervalo de confianza (IC) = Error x Promedio

Si multiplicamos el promedio (x) por una constante, multiplicamos el intervalo de confianza por la misma constante: $U = ax$; $IC(U) = a[IC(x)]$

Si sumamos los promedios (x e y): $U = x + y$; $IC(U) = \sqrt{IC(x)^2 + IC(y)^2}$

Diámetro (cm)	Área (ha)	Mg por parcela (promedio)	Error (%)	Intervalo de confianza (IC)	Biomasa total (Mg ha ⁻¹)	Intervalo de confianza por ha (IC)
>10	0.5	118	10	11.8	236	23.6
2.5 - 10	0.04	0.4	13	0.052	10	1.3
<2.5	0.016	0.002	14	0.0003	0.12	0.017
TOTAL					246.12	23.6

$$\text{Biomasa total} = \text{Total}_{>10} + \text{Total}_{2.5-10} + \text{Total}_{<2.5} = 246,12 \text{ Mg ha}^{-1}$$

$$\text{Intervalo de confianza total} = \sqrt{IC_{>10}^2 + IC_{2.5-10}^2 + IC_{<2.5}^2} = 23.6$$

$$\text{Error total de muestreo} = \frac{23.6}{246.12} \times 100 = 9.6\%$$

El número de parcelas debe ser calculado para el componente de biomasa más importante: los errores asociados con los componentes pequeños no afectan el error total.

Percepción remota: Las técnicas de teledetección son empleadas también en la evaluación de stocks aéreos de carbono en forma remota usando satélites ópticos y no ópticos. Los satélites ópticos presentan ciertas limitaciones en los cálculos de stock de carbono porque sólo ofrecen información espectral sobre la interacción de la luz con las diferentes cubiertas del suelo (p.e. bosques, suelo, agua, zonas urbanas, etc.). Esta información espectral nos informa del contenido de clorofila de los bosques, pero este valor no tiene una relación directa con el stock de carbono. Usando técnicas texturales (p.e. segmentación; Anderson *et al.*, 2009), que se centran en diferenciar las características estructurales (sombras versus luz), se ha obtenido información sobre la estructura del bosque en función de sus copas y se ha utilizado con éxito en caracterización espacial de bosques amazónicos mediante análisis de lacunaridad (Malhi and Roman-Cuesta, 2008). Sin embargo, el traspaso de la lacunaridad a cantidad de carbono está todavía en fase de estudio. Los satélites no ópticos como el radar y el lidar son satélites activos que emiten sus propias fuentes de energía (a diferencia del óptico que utiliza la energía del sol). Estos satélites son capaces de atravesar los bosques y ofrecer información sobre la estructura del bosque más allá de sus copas. La información final resultante permite tener una idea de la altura del bosque, sus características estructurales (p.e. cantidad de ramas, densidad de fustes debajo de las copas). Esta información es mucho más sencilla de relacionar con stocks de carbono y por lo tanto ofrece información más útil que los satélites ópticos. Las imágenes de estos satélites activos (lidar y radar) son, sin embargo, más costosas que las imágenes ópticas y es necesario solicitar vuelos especiales para regiones concretas, lo que encarece mucho el costo si la superficie a evaluar es grande. Debemos remarcar, sin embargo, que el uso de la percepción remota requiere de datos tomados en campo para calibrar los resultados (Gibbs *et al.*, 2007; Asner, 2010).

4.2 Metodologías para el muestreo de los flujos de carbono

Parcelas permanentes: Las parcelas permanentes son usadas para medir los flujos de carbono en áreas de muestreo definidas. Las mediciones son repetidas en el tiempo con el fin de calcular la fijación o pérdida de carbono debido a la productividad, mortalidad y respiración. El crecimiento o productividad suele estimarse midiendo los parámetros directamente, por ejemplo, el crecimiento de los árboles se estima midiendo el diámetro, la producción de hojas se estima recolectando las hojas que caen del dosel, la producción de raíces colectando las raíces en volúmenes determinados de suelo, etc. La mortalidad se estima con la pérdida de árboles en la parcela, la caída de ramas, hojas, entre otros. La respiración de los diferentes

componentes del bosque se puede medir tomando una muestra de aire por un tiempo definido, y analizando la concentración de CO₂ en la muestra. La muestra de aire se toma aislando el proceso de respiración del componente de interés con una cámara cerrada. Por ejemplo, la respiración del suelo se toma colocando una cámara cerrada en un volumen conocido que podría estar determinado por un tubo de plástico colocado a 5 cm de profundidad en el suelo. Existen varios equipos diseñados para medir CO₂ en el aire tanto en laboratorio como en campo. Por ejemplo, el analizador de gases infrarrojo EGM-4 es un equipo portátil que puede llevarse a campo, y es muy utilizado a nivel internacional por su bajo costo y flexibilidad de uso en zonas tropicales. La medición del intercambio de gases entre el bosque y la atmósfera puede también realizarse desde torres altas ubicadas dentro del bosque. En este caso, el método de 'eddy-covariance' es usado para calcular la productividad total y la sensibilidad de la fotosíntesis a la variación climática. Los valores de la productividad primaria neta medida de esta manera, pueden ser comparados con mediciones directas tomadas en parcelas permanentes (p.e. Malhi *et al.* 2009).

Percepción remota: Los satélites ópticos ofrecen información espectral sobre la interacción de la luz con la vegetación, y podemos usar esta información para conocer el contenido de clorofila y la productividad de los bosques, a través del cálculo de parámetros como el NDVI (Normalised Difference Vegetation Index). Estudios de este tipo han sido usados para estudiar patrones estacionales en la productividad de bosques tropicales (p.e. Huete *et al.* 2006), sin embargo, como en la medición de stocks de carbono, es importante que los datos tomados en campo sean utilizados para calibrar los resultados, particularmente de la reflectancia de hojas de diferentes especies bajo diferentes condiciones (Toomey *et al.*, 2009). Los satélites ópticos, debido a que son más baratos y de mayor disponibilidad temporal, han tenido mucho éxito en el monitoreo de cambios de uso del suelo (p.e. uso forestal a pastizal o cultivos o viceversa) y en la determinación de los flujos de carbono en el paisaje a lo largo del tiempo. Las características espectrales de cubiertas del suelo contrastadas (p.e. pasto versus bosque) es grande, y por lo tanto es relativamente sencillo identificar correctamente grandes usos del suelo. Las dificultades se centran cuando el bosque se degrada pero no cambia de uso forestal. En estas condiciones hay que recurrir a satélites ópticos de gran nivel de detalle como IKONOS (Asner *et al.*, 2005) o recurrir nuevamente a los satélites activos como el radar. Para los usos del suelo más contrastados (bosques, cultivos, pastos, humedales y zonas urbanas), la teledetección nos permite evaluar a lo largo del tiempo qué superficies han cambiado de uso. Esta información de área se utiliza en conjunto con datos de stock de carbono calculados en el campo (o con técnicas de teledetección validadas en el campo), para cuantificar a grosso

modo, las emisiones de carbono asociadas a los cambios de uso del suelo, para cierto periodo (Asner, 2009). Se puede obtener información detallada sobre el empleo de la percepción remota en el monitoreo y verificación de carbono en GOF-C-GOLD (2008) y Goetz *et al.* (2009).

4.3 Resumen de protocolos de campo

La mayoría de protocolos usan diferentes tamaños de parcelas para medir el stock de carbono en el bosque. Por ejemplo, parcelas de 0.5 a 50 hectáreas son utilizadas para los individuos vivos o muertos con diámetro mayor a 10 cm y parcelas de 0.04 a 1 ha para individuos con diámetro menor a 10 cm. Parcelas de menor tamaño o transectos son utilizados en la evaluación de los otros componentes. Hay que recordar que cuando se trabaja en zonas de alta pendiente, el área de la parcela debe ser corregida cuando sea necesario.

Hojas del dosel: La medición del stock de carbono de este componente se puede estimar utilizando imágenes digitales del dosel tomadas con un lente hemisférico (“ojo de pez”) y que son procesadas en la computadora para calcular el índice de área foliar (LAI; m² de hojas por m² de suelo). A través de una colección de hojas se calcula el área y peso de las mismas para obtener el peso seco de hojas por unidad de área (LMA; gr de hojas por m² de hojas). La multiplicación del LAI y del LMA nos permite obtener el peso seco de hojas en el dosel.

Fustes y ramas: El stock de carbono en los árboles y ramas se estima usualmente usando ecuaciones alométricas y midiendo el diámetro de todos los individuos a la altura del pecho (DAP, a 1.3 m de altura). Es posible considerar la contribución de los individuos por clases de diámetro en diferentes tamaños de parcelas, por ejemplo, individuos con DAP > 10 cm en parcelas de 100 x 100 m, individuos con DAP de 2.5 a 10 cm en parcelas de 20 x 20 m, etc. En el caso de la medición de los árboles con aletas se recomienda utilizar una escalera para medir arriba de las mismas y en general no olvidar usar un protocolo estándar para medir los casos raros (p.e. Phillips *et al.*, 2009b). La ecuación alométrica debe ser escogida en función al tipo de bosque que deseamos estudiar (p.e. Nascimento & Laurance, 2002; Chave *et al.*, 2005; Freitas *et al.*, 2006) y se recomienda usar valores de altura y densidad de la madera en las ecuaciones. El crecimiento de los troncos (productividad primaria neta de fustes) a largo plazo (>1 año) se estima con remediciones del diámetro de árboles marcados y a corto plazo (<1 año) con mediciones de incrementos obtenidas usando bandas dendrométricas. La calidad de las mediciones es de alta importancia, por lo tanto, cuando hacemos mediciones a largo plazo usamos cintas diamétricas y a corto plazo usamos un vernier digital.

Raíces: Existen pocos estudios sobre el stock de carbono total en las raíces porque es un componente difícil de medir, sin embargo, existen metodologías que enfocan los esfuerzos en la medición de las raíces finas. A través de la colecta de estas raíces en un volumen determinado de suelo en intervalos de tiempos definidos se puede estimar la cantidad de carbono almacenado en este componente y su productividad. El stock de carbono en las raíces gruesas (>2cm) puede estimar indirectamente usando una ecuación basada en pocas muestras destructivas que relaciona la cantidad de biomasa sobre el suelo con la biomasa debajo del suelo (Cairns *et al.*, 1997). La productividad de raíces puede ser estimada a través de los experimentos denominados ingrowth cores y rhizotrons que tienen por objetivo estimar el crecimiento y producción de raíces finas en tiempos determinados.

Madera muerta: El stock de este componente de la necromasa se puede inventariar midiendo (DAP \geq 10 cm) o pesando (DAP 2-10 cm) los trozos de madera muerta en un área definida. En el caso de los árboles muertos en pie deben ser incluidos en el inventario de la parcela de mayor tamaño, a estos se les mide el diámetro a 1.3 m o en la base (altura menor a 1.3 m) y la altura total. Los pedazos menores son pesados directamente. Cada pieza de madera muerta se clasifica por su estado de descomposición y se colectan muestras para calibrar esta escala y corregir el porcentaje de espacio vacío de la madera. La productividad de ramas y troncos se monitorea en transectos o área donde todos los pedazos de madera muerta han sido marcados (DAP \geq 10 cm) o removidos (DAP <10 cm). Una metodología adicional basada en transectos lineales también es utilizada en inventarios rápidos de stock de madera muerta en el suelo (p.e. Baker *et al.*, 2007; Chao *et al.*, 2008).

Hojarasca y detrito fino: El stock de este componente de la necromasa se colecta de la superficie del suelo usando cuadrantes típicamente de 50 x 50 cm, las muestras se llevan al horno para ser secadas y calcular su peso. Este componente está conformado por la materia orgánica muerta que está sobre la superficie del suelo inorgánico, es decir, incluye hojarasca y detrito fino como ramas de diámetro menor a 2 cm, flores, frutos y materia descompuesta. Asumiendo que el bosque está en equilibrio, podemos medir el flujo de producción de hojas y detrito fino mediante la captura de los mismos en colectores de un área de malla de 50 x 50 cm, secado y pesado.

Suelo: Las muestras del suelo son tomadas usualmente a diferentes profundidades, siendo de 0 a 30 cm la profundidad más importante para el análisis del carbono. Para calcular el stock de carbono en este componente debemos recordar también tomar muestras de la densidad del suelo. La tasa de respiración de los diferentes componentes del suelo se puede medir

tomando una muestra de aire por un tiempo definido y analizando la concentración de CO₂ en la muestra con un equipo portátil (p.e. analizador de gases infrarrojo) o en el laboratorio.

4.4 Precisión de los instrumentos de campo

En campo esperamos obtener datos de calidad, por lo tanto, pensaremos no sólo en usar metodologías de estimación de carbono que nos permitan estandarizar las mediciones y reducir los errores humanos en la medición, sino también equipos que nos permitan obtener mayor precisión (Tabla 2). Entonces, por ejemplo, si estamos interesados en medir el stock de carbono en los fustes, el uso de la forcípula nos dará un error de instrumento de 0.5 cm, mientras una cinta diamétrica nos dará una precisión de 0.1 cm. De la misma manera, al estimar la productividad de los fustes, una cinta diamétrica podrá registrar incrementos de > 0.1 cm, mientras tal vez un vernier digital nos permitirá obtener variaciones más pequeñas desde 0.01 cm. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el incremento en diámetro de las especies arbóreas tropicales varía entre 0.1 y 3 cm al año, el estudio de la productividad de los fustes en un tiempo de 3-5 años deberá realizarse usando una cinta diamétrica y para registrar incrementos en intervalos de 1 a 3 meses preferiremos instalar bandas dendrométricas y hacer mediciones con un vernier digital. Debemos recordar que los valores mencionados corresponden al error del instrumento y no al posible error humano durante las mediciones.

Tabla 2. Lista de instrumentos usualmente utilizados en inventarios de carbono

Instrumentos	Precisión	Medida
Wincha métrica	1 cm	Distancia
Forcípula	0.5 cm	Diámetro
Cinta diamétrica	0.1 cm	Diámetro
Vernier mecánico/digital	0.02 mm	Diámetro
Balanza romana de 500 g	10 g	Peso
Balanza romana de 5 kg	50 g	Peso
Balanza romana de 10 kg	100 g	Peso
Balanza romana de 20 kg	200 g	Peso
Balanza romana de 35 - 50 kg	500 g	Peso
Balanza digital de 3 - 6 kg	0.1 g	Peso
Balanza digital de 3 - 6 kg	0.01 g	Peso

3 | Cálculos del stock y flujos de carbono

Para desarrollar esta sección, usamos la experiencia del proyecto Red Amazónica de Inventarios Forestales (RAINFOR) en los estudios del stock y flujos de carbono en Amazonía y las adaptaciones realizadas por el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP) para los experimentos desarrollados en Loreto, Perú. Los objetivos de estos estudios son: (1) Determinar el impacto de la variación en los factores ambientales debido a una variación en la estructura (biomasa de todos los componentes del bosque) y dinámica de los bosques amazónicos, y (2) Monitorear estos cambios a través del tiempo. Los árboles grandes ($DAP \geq 10$ cm) son el componente de la biomasa más importante en los bosques amazónicos, por lo que se escogió el uso de parcelas de una hectárea que es suficiente para capturar la variación en la estructura y dinámica del bosque debido a la caída de los árboles (Chave *et al.*, 2003). Otros componentes fueron medidos en parcelas anidadas de menor tamaño dentro de las parcelas de una hectárea. Debido a la gran escala de la pregunta, se escogió utilizar un sistema de muestreo representativo, con parcelas a lo largo de los gradientes ambientales de interés. Para este capítulo debemos, nuevamente, recordar que el 50% de la biomasa o necromasa seca es carbono, que el stock se expresa generalmente en Megagramos de carbono por hectárea ($Mg\ C\ ha^{-1}$) y que los flujos se expresan en Megagramos de carbono por hectárea al año ($Mg\ C\ ha^{-1}\ año^{-1}$).

1. HOJAS DEL DOSEL

1.1 Stock de carbono en hojas del dosel (Mg de peso seco de hojas ha^{-1})

Diseño: muestreo estratificado en 25 puntos equidistantes.

Materiales: Cámara digital, lente hemisférico, trípode, cinta métrica, bolsas de plástico, balanza, secador, programas Can-eye (http://147.100.66.194/can_eye/page3.htm) e Image-J (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>).

Datos: 25 fotos digitales del dosel y 25 muestras de hojas del dosel de cada punto de muestreo.

Cálculos:

- Analizar las fotos en el programa Can-eye para obtener el valor del índice de área foliar (LAI) expresado en m² de hojas por m² de suelo.
- Analizar las imágenes escaneadas de las hojas en Image-J para obtener el área foliar (m² hojas).
- Obtener el peso seco (gr hojas) de las hojas colectadas.
- Calcular el peso de hojas por unidad de área (LMA) expresado en gr de hojas por m² de hojas.
- Calcular la biomasa (LAI x LMA).

Ejemplo:

Calcular el valor de LAI, el área y el peso de las hojas

LAI promedio = 5 m² de hojas por m² de suelo

Peso promedio de muestra de hojas = 160 g

Calcular el LMA

LMA = Área x Peso = 80 g de hojas por m² de hojas

Calcular la biomasa de las hojas.

$$\text{Biomasa} = \frac{5 \text{ m}^2 \text{ hojas}}{\text{m}^2 \text{ suelo}} \times \frac{80 \text{ g hojas}}{\text{m}^2 \text{ hojas}} \times \frac{1 \text{ Mg}}{10^6 \text{ g}} \times \frac{10^4 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} = 4 \text{ Mg ha}^{-1}$$

Para estimar los cambios en la biomasa en hojas del dosel se debe tomar las fotos cada 1-2 meses.

2. FUSTES Y RAMAS

2.1 Stock de carbono en troncos y ramas (Mg de peso seco ha⁻¹)

Diseño: muestreo total para individuos con DAP > 10 cm en parcela de 100 x 100 m y muestreo sistemático para individuos con DAP 2.5-10 cm en parcelas de 20 x 20 m.

Materiales: wincha métrica de 50 m, brújula, tubos de PVC para demarcar la parcela, cinta diamétrica, escalera, placas y clavos de aluminio, martillo,

pintura, tijera telescópica, tijeras de podar, arnés, subidores de árboles, bolsas de colección, clinómetro, protocolo de inventario, programa Microsoft Excel.

Datos: Valores de diámetro e identificación de todos los individuos en la parcela y valores de diámetro y altura para una sub-muestra de individuos.

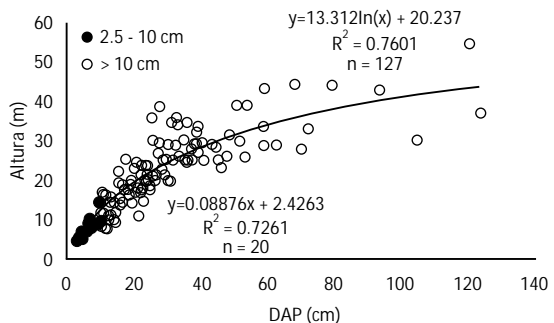
Cálculos:

- Generar una ecuación que relacione las variables altura y diámetro usando la submuestra de individuos tomada en campo.
- Estimar la altura de los individuos de la parcela usando la ecuación que relacione los valores de altura y diámetro.
- Obtener los valores de densidad de la madera para cada especie identificada usando la base de datos disponible en la web (<http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>; Zanne *et al.*, 2009).
- Calcular la biomasa de los individuos utilizando una ecuación alométrica que incluya la mayor cantidad de variables medidas y estimadas para la parcela.

Ejemplo:

Desarrollar ecuación que relacione la altura (h) y el diámetro (DAP) usando los datos de la muestra.

DAP (cm)	Altura (m)
2.5	4.8
3.4	5.0
10.1	8.4
13.9	10.2
20.9	18.2
38.5	29.3
45.1	25.2
79.2	44.3
93.5	43.1
120.5	54.6
123.7	37.1
	(...)



$$\text{Altura}_{>10\text{cm}} = 13.312 \times \ln(\text{DAP}) - 20.237$$

$$\text{Altura}_{2.5-10\text{cm}} = 0.8876 \times \text{DAP} + 2.4263$$

Estimar la altura de los individuos y obtener valor de densidad de madera.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1				DAP	Altura	Densidad de madera (g cm ⁻³)				
2	N°	Familia	Género	Especie	(cm)	(m)	Fam.	Gén.	Esp.	Escogida
3	32	Arecaceae	Socratea	Socratea exorrhiza	17.1	17.6	0.46	#N/A	#N/A	0.46
4	33	Myristicaceae	Virola	Virola pavonis	43.0	29.8	0.50	0.48	0.59	0.59
5	34	Euphorbiaceae	Amanoa	Amanoa guyanensis	10.2	10.7	0.56	0.83	#N/A	0.83
6	35	Malpighiaceae	Malpighiaceae	Malpighiaceae sp. 2	5.5	7.3	#N/A	#N/A	#N/A	0.64
(...)										

$$\text{Altura}_{33} = 13.312 \times \ln(43.0) - 20.237 = 29.8 \text{ m}$$

$$\text{Altura}_{35} = 0.8876 \times 5.5 + 2.4263 = 7.3 \text{ m}$$

$$\text{Densidad}_{\text{Fam33}} = \text{BUSCARV}(B4, ('C:[GlobalWoodDensityDatabase.xls] \text{Especies}!A2:B1290,2,FALSE) = 0.5 \text{ (Ver Casilla 5).}$$

Seleccionar la(s) ecuación(es) alométrica(s) y calcular la biomasa.

$$\text{Biomasa (kg)}_{\text{DAP} > 5\text{cm}} = \exp(-2.977 + \ln(p \times \text{DAP}^2 \times H)); \text{Chave } et \text{ al. (2005)}$$

$$\text{Biomasa}_{33} = \exp(-2.977 + \ln(0.59 \times 43^2 \times 29.8)) = 1656 \text{ kg} \times \frac{1 \text{ Mg}}{1000 \text{ kg}} = 1.7 \text{ Mg}$$

$$\text{Biomasa (kg)}_{\text{DAP} 1-5 \text{ cm}} = \exp(-1.7689 + 2.377 \times \ln(\text{DAP})); \text{Nascimento \& Laurance (2002)}$$

$$\text{Biomasa}_{35} = \exp(-1.7689 + 2.377 \times \ln(5.5)) = 9.8 \text{ kg} \times \frac{1 \text{ Mg}}{1000 \text{ kg}} = 0.0098 \text{ Mg}$$

La biomasa total es la suma de la biomasa de todos los árboles en la parcela. En caso la parcela sea menor o mayor a un hectárea debemos corregir el valor para expresarlo por hectárea. Los cambios en la biomasa se pueden estimar realizando mediciones cada 3-5 años.

2.2 Productividad de fustes y ramas (Mg de peso seco ha⁻¹ año⁻¹)

Diseño: muestreo total para individuos con DAP 10 cm en parcela de 100 x 100 cm y muestreo sistemático para individuos con DAP 2.5-10 cm en parcelas de 20 x 20 m.

Materiales: zuncho de plástico, enzunchadora, grapas, resorte, tijera de corte, tijera de metal, cuchilla, vernier digital, cinta diamétrica, escalera, programa Microsoft Excel.

Datos: Valores de incremento de la circunferencia del diámetro tomados usando dendrómetros.

Cálculos:

- Convertir la medida del dendrómetro en incremento de diámetro.
- Estimar el diámetro final que incluye el incremento.
- Estimar la biomasa final y la productividad.

Ejemplo:

Nº	Familia	Especie	DAP (cm)	Altura (m)	Densidad ($g\ cm^{-3}$)	Biomasa (Mg)	Dend (cm)*	?Diam (cm)	D final (cm)	B final (Mg)
32	Arecaceae	<i>Socratea exorrhiza</i>	17.1	17.6	0.46	0.1206	0.078	0.025	17.125	0.1210
33	Myristicaceae	<i>Virola pavonis</i>	43	29.8	0.59	1.6562	3.570	1.136	44.136	1.7449
34	Euphorbiaceae	<i>Amanoa guyanensis</i>	10.2	10.7	0.83	0.0471	0.721	0.230	10.430	0.0492
(...)										

*El valor del dendrómetro está expresado como longitud de circunferencia ($L_c = D \times \pi$).

Para llenar la tabla se usaron las siguientes fórmulas:

$$\text{Incremento de diámetro (?Diam)} = \frac{\text{dendrómetro}}{\pi}$$

$$\text{Diámetro final (D}_{\text{final}}) = \text{DAP} + \text{Diam}$$

$$\text{Biomasa (kg)} = \exp(-2.977 + \ln(\pi \times \text{DAP}^2 \times H)); \text{Chave } et \text{ al. (2005)}$$

El incremento en diámetro de un árbol o productividad de fustes puede medirse cada 3 meses usando los dendrómetros.

$$\text{Productividad} = \frac{\text{SBiomasa final} - \text{Biomasa inicial}}{\text{tiempo}}$$

3 RAÍCES

3.1 Stock de carbono en raíces finas (Mg de peso seco ha^{-1})

Diseño: muestreo sistemático en 9 puntos equidistantes dentro de la parcela y colecta de raíces finas en intervalos de 10 minutos en volúmenes de suelo de 12 cm de diámetro y 30 cm de profundidad (*ingrowth cores*).

Materiales: wincha métrica, cavadora, plástico, reloj, bolsas plásticas, plumón indeleble, secador, balanza, programa Microsoft Excel.

Datos: Valores de peso seco de muestras de raíces finas.

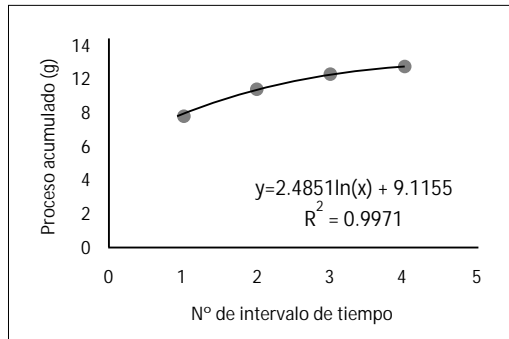
Cálculos:

- Desarrollar la curva de proyección del peso seco acumulado de raíces finas para cada punto de muestreo usando las cuatro colectas realizadas en intervalos de 10 minutos.
- Obtener los valores de peso acumulado con una proyección de 12 intervalos de tiempo.
- Estimar la biomasa por unidad de área muestreada.

Ejemplo:

Desarrollar la curva de proyección del peso seco acumulado y estimar los valores para los intervalos restantes.

Intervalo	Peso seco (g)	Peso acumul. (g)
1	9.08	9.08
2	1.79	10.87
3	1.07	11.94
4	0.53	12.47
5		13.12
6		13.57
7		13.95
8		14.28
9		14.58
10		14.84
11		15.07
12		15.29
1	9.40	9.40
		(...)



$$\text{Peso acumulado}_5 = 2.4851 \times \ln(5) + 9.1155 = 13.12 \text{ g}$$

$$\text{Peso acumulado}_6 = 2.4851 \times \ln(6) + 9.1155 = 13.57 \text{ g}$$

Estimar la biomasa teniendo en cuenta que el área muestreada tiene 12 cm de diámetro.

$$\text{Biomasa} = \frac{\text{Peso acumulado}_{\text{final}}}{\text{Área}} = \frac{15.29 \text{ g}}{\pi \times \left(\frac{12}{2}\right)^2 \text{ cm}^2} \times \frac{10^8 \text{ cm}^2}{1 \text{ ha}} \times \frac{1 \text{ Mg}}{10^6 \text{ g}} = 13.52 \text{ Mg ha}^{-1}$$

3.2 Productividad de raíces finas ($\text{Mg de peso seco ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

Diseño: muestreo sistemático en 9 puntos equidistantes dentro de la parcela y colecta de raíces finas en intervalos de 10 minutos en volúmenes de suelo de 12 cm de diámetro y 30 cm de profundidad cada 3 meses (*ingrowth cores*).

Materiales: malla para sacos con agujeros de 1 cm^2 , hilo de pescar, plástico, reloj, bolsas plásticas, plumón indeleble, secador, balanza, programa Microsoft Excel.

Datos: Valores de peso seco de muestras de raíces finas.

Cálculos:

- Realizar los mismos pasos descritos en los cálculos del stock de carbono de raíces finas para cada muestra tomada cada tres meses (biomasa ganada).
- Estimar la productividad de raíces finas.

Ejemplo:

Estimar la biomasa ganada en las muestras colectadas cada 3 meses.

Biomasa total o Stock (May-2007) = 5.08 Mg ha^{-1}

Biomasa ganada (Ago-2007) = 0.47 Mg ha^{-1}

Biomasa ganada (Nov-2007) = 0.23 Mg ha^{-1}

Biomasa ganada (Feb-2008) = 0.22 Mg ha^{-1}

Biomasa ganada (May-2008) = 0.43 Mg ha^{-1}

Estimar la productividad primaria neta para el periodo de evaluación.

$$\text{Productividad} = \text{Biomasa}_{\text{ganada en 1 año}} = 0.47 + 0.23 + 0.22 + 0.43 = 1.35 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$$

Calcular el tiempo de recambio en la producción de raíces finas.

$$\text{Tiempo} = \frac{\text{Stock}}{\text{Productividad}} = \frac{5.08 \text{ Mg ha}^{-1}}{1.35 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}} = 3.75 \text{ años}$$

Los *ingrowth cores* también permiten hacer otros cálculos como la estimación de la longitud, el área y el volumen de las raíces finas. Otras metodologías pueden también ser usadas para realizar cálculos similares (p.e. rhizotrons).

4. MADERA MUERTA

4.1 Stock de carbono en madera muerta (Mg de peso seco ha⁻¹)

Diseño: muestreo total en parcela de 100 x 100 m (madera en pie), muestreo estratificado en 4 fajas de 1 x 100 m equidistantes (madera en suelo, tipo I), muestreo estratificado en 4 líneas de 500 m para trozos de diámetro > 10 cm y 20 sublíneas de 10 m para trozos de diámetro < 10 cm (madera en suelo, tipo II).

Materiales: Wincha métrica, cinta diamétrica, bolsas de plástico, plumón indeleble, balanza romana, balanza de precisión, machete, serrucho, vernier (tipo II), secador, programa Microsoft Excel.

Datos: Valores de diámetro y altura de la madera en pie, peso directo de la madera en suelo en clases de diámetro de 2-5 cm y 5-10 cm, medición de diámetro y longitud de madera en suelo con diámetro >10 cm (tipo I), diámetro en punto de intersección de la madera en suelo con la línea (tipo II). Adicionalmente se habrá recogido en campo el 100% o 10% de cada trozo de madera para obtener la densidad por grado de descomposición (categorías del 1 al 5 o del 1 al 3).

Cálculos

- Calcular la densidad de la madera para cada categoría de descomposición.
- Calcular el peso seco o volumen de cada trozo.
- Calcular la biomasa total.

Ejemplo:

Calcular la densidad de cada categoría de descomposición.

Grado desc.	Peso seco (g)	Volumen (g cm ³)	Densidad (g cm ⁻³)
1	184.1	289.4	0.64
1	1272.8	1706.6	0.75
2	45.4	77.9	0.58
2	52.8	89.0	0.59
3	72.3	130.4	0.55
3	41.9	77.1	0.54
4	83.7	197.2	0.42
4	108.5	235.3	0.46
5	13.8	45.2	0.30
5	39.1	118.7	0.33

Densidad = Peso seco x Volumen

$$\text{Densidad promedio}_1 = \frac{\text{Densidad}_1}{n_1}$$

Densidad₁ = densidad con grado desc. 1

n₁ = número de muestras con grado desc. 1

*Valores tomados de Chao *et al.* (2008) (...)

Calcular el peso o volumen y biomasa de cada trozo de madera (tipo I).

Tamaño (cm)	Grado desc.	Peso seco (g)	D1 (cm)	D2 (cm)	Largo / altura (cm)	Volumen (cm ³)	Densidad (g cm ⁻³)	Biomasa (g)	Biomasa (Mgha ⁻¹)*
2 a 5	1	2085.9						2085.9	0.052
2 a 5	2	658.8						658.8	0.016
5 a 10	2	2739.7						2739.7	0.068
5 a 10	3	2005.5						2005.5	0.050
>10	3		12.6	12.1	180	21562	0.53	11428.1	0.286
>10	4		19	21	117	36757	0.41	15070.2	0.377
En pie	2		15.3	13.4	700	113231	0.57	64541.7	0.065
En pie	3		16.3	13.6	1200	210576	0.53	111605.1	0.112
									(...)

*Para calcular la biomasa en Mg ha⁻¹ no olvidar que 1 Mg = 1000000 g y que el área de la parcela es una hectárea (madera en pie) y de las fajas es 0.04 ha (4 fajas de 1 m x 100 m, madera en el suelo).

D1_{en suelo} = medida vertical y D2_{en suelo} = medida horizontal

D1_{en pie} = DAP

D2_{en pie} = D1_{en pie}; si la altura < 1500 cm

D2_{en pie} = 1.59 x D1_{en pie} x Altura^{-0.091}; si altura > 1500 cm (Chambers *et al.*, 2000)

$$\text{Volumen} = \frac{1}{4} \times \left(\frac{D_{ap1} + D_{ap2}}{2} \right)^2 \times \text{largo}$$

Biomasa_{2-5 cm y 5-10 cm} = peso seco

Biomasa_{>10 cm y en pie} = volumen x densidad

Calcular el volumen y biomasa de cada trozo de madera (tipo II).

Nº	Distancia (m)	Grado desc.	D1 (cm)	D2 (cm)	Diámetro (cm)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)*	Densidad (g cm ⁻³)	Biomasa (Mg ha ⁻¹)
12	2.0	3	40.0	42.0	41.0	2.07	0.53	1.097
13	3.9	1	35.0	28.0	31.3	0.24	0.61	0.146
14	5.3	4	12.1	1.7	4.5	0.13	0.53	0.069
15	9.4	2	10.8	6.8	8.6	0.45	0.41	0.185
16	18.4	5	15.0	12.0	13.4	0.22	0.30	0.066
17	44.8	1	12.0	11.0	11.5	0.16	0.61	0.098
								(...)

*Para calcular el volumen recordar que la longitud total de la línea (L) varía según el diámetro de la madera muerta, será de 1000 m para trozos con diámetro ≥ 10 cm (4 líneas de 500 m) y 200 m (20 sub-líneas de 10 m) para trozos con diámetro de 2-10 cm.

$$\text{Diámetro (D)} = \sqrt{D1 \times D2}$$

$$\text{Volumen (V)} = \frac{D^2 \times L}{8}$$

$$\text{Biomasa (Mg ha}^{-1}\text{)} = \text{Volumen} \times \text{Densidad}$$

Las unidades para realizar los cálculos deben estar: D en cm, L en m, V en m³ ha⁻¹ y densidad en g cm⁻³. Los cambios en la necromasa de madera muerta se pueden medir en periodos de tiempo definidos, p.e. cada 3 meses.

5. HOJARASCA Y DETRITO FINO

5.1 Stock de carbono en hojarasca y detrito fino del suelo (Mg de peso seco ha⁻¹)

Diseño: muestreo estratificado en 25 parcelas equidistantes y uso de parcelas de 50x50 cm.

Materiales: Varas de 50 cm, cinta métrica, bolsas de plástico, balanza, secador, programa Microsoft Excel.

Datos: 25 muestras de hojarasca del suelo de cada punto de muestreo.

Cálculos:

- Obtener el peso seco (gr) de las muestras de hojarasca.

- Calcular la necromasa.

Ejemplo:

Calcular el peso seco de hojarasca.

Peso de hojarasca promedio = 75.5 g

Área de parcela = 2500 cm²

Calcular la necromasa.

$$\text{Necromasa} = \frac{75.5 \text{ g}}{2500 \text{ cm}^2} \times \frac{10^8 \text{ cm}^2}{1 \text{ ha}} \times \frac{1 \text{ Mg}}{10^6 \text{ g}} = 3.02 \text{ Mg ha}^{-1}$$

Para estimar los cambios en la necromasa en hojarasca se debe tomar las fotos cada año.

5.2 Productividad de hojarasca y detrito fino (Mg de peso seco ha⁻¹ año⁻¹)

Diseño: muestreo estratificado en 25 puntos equidistantes y uso de colectores con área de 50 x 50 cm ubicados a un metro del suelo.

Materiales: Estructura de metal para sostener el colector, colector con malla de 50 x 50 cm, cinta métrica, bolsas de plástico, balanza, secador, programa Microsoft Excel.

Datos: 25 muestras de hojas caídas en cada punto de muestreo recolectadas cada 15 días.

Cálculos:

- Obtener el peso seco (gr) de las muestras de hojarasca.
- Calcular la productividad primaria neta de hojas.
- Calcular la tasa de recambio.

Ejemplo:

Peso de hojas promedio = 3 g

Área de parcela = 2500 cm²

Tiempo = 15 días

Calcular la productividad de hojarasca y detrito fino.

$$\text{Productividad}_{\text{hojas}} = \frac{3 \text{ g}}{2500 \text{ cm}^2 \cdot 15 \text{ días}} \times \frac{10^8 \text{ cm}^2}{1 \text{ ha}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \times \frac{1 \text{ Mg}}{10^6 \text{ g}} = 2.92 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$$

Calcular la tasa de recambio.

$$\text{Tasa de recambio} = \frac{3.02 \text{ Mg ha}^{-1}}{2.92 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}} = 1.03 \text{ años}$$

En este caso, se asume que el bosque está en equilibrio, por lo tanto, la producción de hojas en el dosel del bosque es igual a la mortalidad de hojas.

6. SUELO

6.1 Stock de carbono en el suelo (Mg C ha^{-1})

Diseño: muestreo estratificado con un barreno en 2-5 puntos dentro de la parcela a diferentes niveles de profundidad desde la capa orgánica hasta los 2 m de profundidad y muestreo representativo en un punto de la parcela usando una calicata desde capa orgánica hasta 2 m o 4 m si se adiciona también el uso de barreno.

Materiales: equipo de muestreo de suelo, cilindros de metal, laboratorio, programa Microsoft Excel.

Datos: características físicas y químicas de las muestras de suelo tomadas a diferentes profundidades.

Cálculos:

- Calcular la densidad del suelo a diferentes profundidades
- Calcular la concentración de carbono en las muestras de suelo
- Calcular el stock de carbono en el suelo.

Ejemplo:

Calcular la densidad del suelo considerando que el peso de masa seca de suelo se obtiene secando la muestra por 48 horas a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el volumen de suelo está representado por el volumen del cilindro donde se colectó la muestra.

$$\text{Densidad (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{peso de masa seca de suelo (g)}}{\text{volumen de suelo (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{Volumen} = \pi \times r^2 \times h, \text{ donde } r \text{ es el radio del cilindro y } h \text{ la altura}$$

Calcular la concentración de carbono en las muestras de suelo

Método 1: Usando un analizador automático donde el resultado es bastante preciso y genera no sólo el porcentaje de carbono sino también de nitrógeno en un volumen conocido de muestra. Una desventaja de este método es el alto costo de adquisición del equipo y de cada análisis.

Método 2: Usando el método de combustión húmeda de Walkey-Black (Walkey y Black, 1934) donde el valor obtenido debe ser afectado por un

factor de 1.32 debido a que sólo el 76% del carbono se oxida durante el análisis (Nelson y Sommers, 1996). A pesar que este método es muy usado, una desventaja es que el porcentaje de oxidación del carbono puede variar en función al tipo del suelo.

Otros métodos más sencillos podrían ser utilizados como pérdida de ignición o digestión con H_2O_2 ; sin embargo, si se requiere un mínimo de precisión, con estos métodos sólo se obtendrá una estimación vaga del porcentaje de carbono en el suelo.

Calcular el stock de C en el suelo:

Concentración de carbono_{0-5 cm} = 2.5 %

Densidad del suelo_{0-5 cm} = 0.85 g cm⁻³

Stock de carbono = Concentración x (Densidad x 100) x Profundidad en m

Stock de carbono_{0-5 cm} = 2.5 x (0.85 x 100) x 0.05 = 10.63 Mg C ha⁻¹

Para calcular el stock de carbono en capas más profundas (p.e. hasta 2 m) se debe hacer los cálculos para cada capa individualmente y sumar los valores. Tener en cuenta que la profundidad de la capa de suelo se debe expresar en metros (p.e. 0-10 cm es 0.1 m, 30-50 cm es 0.2 m, etc.)

6.2 Respiración total del suelo (CO₂ ha⁻¹ año⁻¹)

Diseño: muestreo estratificado en 25 puntos equidistantes dentro de la parcela de 100 x 100 m.

Materiales: tubos de PVC de 4" y 10 cm longitud, analizador de gases infrarrojo (PP-Systems EGM-4), cámara de respiración (SC-1 sistema IRGA), sensores de humedad y temperatura, programa Microsoft Excel.

Datos: valores de flujo de CO₂, temperatura, altura del tubo, área dentro de la cámara, volumen de la cámara.

Cálculos:

- Convertir las unidades de flujo de CO₂ de g CO₂ m⁻² h⁻¹ (Unidad 2) a μmol m² s⁻¹ (Unidad 1) y escoger aquellos que tienen un incremento lineal para obtener valores promedios.

Unidad 2 = Unidad 1 x 6.312

- Estimar el flujo de CO₂ (Ruc en g CO₂ m⁻² h⁻¹) usando el volumen de cámara establecido (Vd en cm³), los 10 últimos valores (C1 y C10) de tasa de incremento de CO₂ (ppm), sus respectivas unidades de tiempo en segundos (T1 y T10), presión atmosférica (P en milibares), temperatura (T en °C), y el área del tubo (A en m²).

$$RUC = \frac{C_{10} - C_1}{T_{10} - T_1} \times \frac{P}{1000} \times \frac{273}{T + 273} \times \frac{44.01}{22.41} \times \frac{Vd/A}{1000} \times 3600$$

- Corregir el flujo de CO₂ (Rc) agregando el volumen adicional del tubo (Va en m³) al volumen de cámara establecido (Vd).

$$Rc = RUC \times \frac{A}{Vd} \times \frac{Va + Vd}{A}$$

Ejemplo:

Estimar el flujo de CO₂ (Ruc en g CO₂ m⁻² h⁻¹) usando las variables tomadas en campo.

;EGM-4 Data

;Software Versión=1.05

;Plot	Rec No	CO ₂ Ref*	Input E**	Input F***	ATMP+	;Plot	Rec No	CO ₂ Ref*	Input E**	Input F***	ATMP+
8	1	409	0	0	968	8	15	440	67	0.36	968
8	2	416	4	0	968	8	16	442	72	0.36	968
8	3	419	9	0	968	8	17	443	76	0.35	968
8	4	421	14	0.71	968	8	18	446	81	0.35	967
8	5	423	19	0.62	967	8	19	447	86	0.35	968
8	6	424	24	0.53	968	8	20	448	91	0.35	968
8	7	426	28	0.48	968	8	21	451	96	0.35	967
8	8	428	33	0.44	968	8	22	452	100	0.34	968
8	9	430	38	0.42	968	8	23	453	105	0.34	968
8	10	431	43	0.4	968	8	24	455	110	0.34	968
8	11	434	48	0.4	967	8	25	457	115	0.34	968
8	12	435	52	0.38	968	8	26	458	120	0.34	968
8	13	436	57	0.37	968	8	27	460	124	0.34	968
8	14	438	62	0.37	968						

Otros datos:

Volumen de la cámara SRC-1 (Vd) = 0.001208 m³

Área del tubo dentro de la cámara = 0.0083 m²

Temperatura = 25°C

Altura del tubo conectado a la cámara = 3 cm ó 0.03 m

$$RUC = \frac{460 - 446}{124 - 81} \times \frac{968}{1000} \times \frac{273}{25 + 273} \times \frac{44.01}{22.41} \times \frac{0.001208/0.0083}{1000} \times 3600 = 0.30 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

Corregir el flujo de CO₂ considerando el volumen adicional del tubo.

$$V_d = 0.001208 \text{ m}^3$$

$$V_a = \text{Área}_{\text{tubo}} \times \text{Altura}_{\text{tubo}} = 0.0083 \text{ m}^2 \times 0.03 \text{ m} = 0.000249 \text{ m}^3$$

$$R_c = 0,30 \times \frac{0.0083}{0.001208} \times \frac{0.000249 + 0.01208}{0.0083} = 0.36 \text{ g CO}_2\text{m}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

Casilla 5 Uso de la función BUSCARV de Microsoft Excel

La función 'BUSCARV' de Microsoft Excel es una herramienta muy útil que nos permite obtener fácilmente los valores de densidad de madera utilizando una base de datos como la de Zanne *et al.* (2009).

'C:\[GlobalWoodDensityData base.xls]Familias'		'C:\[GlobalWoodDensityData base.xls]Generos'		'C:\[GlobalWoodDensityData base.xls]Especies'	
A	B	A	B	A	B
1 Familia	Densidad (g cm ⁻³)	1 Género	Densidad (g cm ⁻³)	1 Especie	Densidad (g cm ⁻³)
2 Acanthaceae	0.69	2 Abarema	0.59	2 <i>Abarema jupunba</i>	0.59
3 Adoxaceae	0.44	3 Abuta	0.45	3 <i>Abuta rufescens</i>	0.45
4 Anacardiaceae	0.64	4 Acacia	0.67	4 <i>Acacia albicorticata</i>	0.49
5 Anisophylleaceae	0.86	5 Acanthosyris	0.63	5 <i>Acacia aroma</i>	0.81
6 Annonaceae	0.59	6 Acmanthera	0.69	6 <i>Acacia caven</i>	0.78
7 Apocynaceae	0.65	7 Acosmium	0.76	7 <i>Acacia dealbata</i>	0.57
8 Aquifoliaceae	0.54	8 Actinostemon	0.91	8 <i>Acacia furcatispina</i>	0.87
9 Araliaceae	0.46	9 Adiscanthus	0.82	9 <i>Acacia macracantha</i>	0.73
10 Araucariaceae	0.54	10 Aegiphila	0.66	10 <i>Acacia melanoxylon</i>	0.57
11 Areaceae	0.46	11 Agonandra	0.82	11 <i>Acacia polyphylla</i>	0.63
	(...)		(...)		(...)

Datos de campo...

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1				DAP	Altura	Densidad de madera (g cm ⁻³)			
2 Nº	Familia	Género	Especie	(cm)	(m)	Fam	Gén.	Esp.	Escogida
3 32	Areaceae	<i>Socratea</i>	<i>Socratea exorrhiza</i>	17.1	17.6	0.46	#N/A	#N/A	0.46
4 33	Myristicaceae	<i>Virola</i>	<i>Virola pavnis</i>	43.0	29.8	0.50	0.48	0.59	0.59
5 34	Euphorbiaceae	<i>Amanoa</i>	<i>Amanoa guyanensis</i>	10.2	10.7	0.56	0.83	#N/A	0.83
6 35	Malphiaceae	<i>Indet</i>	<i>Indet</i> sp2	5.5	7.3	#N/A	#N/A	#N/A	0.64

La función 'BUSCARV' nos permite buscar un valor (p.e. Areaceae ubicado en la celda B3) en una primera columna de una matriz (p.e. 'C:\[GlobalWoodDensityDatabase.xls] Familias'), una vez localizado nos muestra dentro de la misma fila el valor que contiene la columna que deseamos obtener (p.e. valor de densidad ubicado en la columna 2). En este caso, para obtener la densidad de la familia Areaceae, la estructura de la función que debemos escribir en la casilla G3 estará expresada como = BUSCARV (B3,'C:\[GlobalWoodDensityDatabase.xls]Familias'!\$A\$2:\$B\$950,2, FALSE).

Cuando el valor buscado no se encuentra en la matriz devuelve la expresión '#N/A'. Para escoger la densidad del individuo tendremos que poner prioridad sobre la densidad de la especie, sino tenemos este valor, escogeremos la densidad del género o de la familia. Este procedimiento puede facilitarse usando la función 'SI' de Excel. Cuando no tenemos ninguno de estos valores, debemos considerar el valor promedio de la parcela o un valor de referencia de 0.64. La estructura general de la función es BUSCARV (Valor que se desea buscar en la matriz; Matriz de datos donde buscar datos; Columna que se desea obtener dato; Ordenado).

Bibliografía

Aguirre, N. & Aguirre, Z. 2004 Guía para monitorear la biomasa y dinámica de carbono en ecosistemas forestales en el Ecuador, 38 p.

AIDER. 2008. Evaluación del carbono almacenado en la cuenca alta del Río Yuracyacu. Lima, 28 p.

Anderson, L., Malhi, Y., Ladle, R., Aragão, L., Shimabukuro, Y., Phillips, O., Baker, T., Costa, A. *et al.* 2009 Influence of landscape heterogeneity on spatial patterns of wood productivity, wood specific gravity and above ground biomass in Amazonia. *Biogeosciences* 6, 1883-1902.

Aragão, L., Malhi, Y., Metcalfe, D., Silva-Espejo, J., Jiménez, E., Navarrete, D., Almeida, S., Costa, A. *et al.* 2009 Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. *Biogeosciences* 6, 2759-2778.

Asner, G. 2009 Tropical forest carbon assessment: integrating satellite and airborne mapping approaches. *Environmental Research Letters* 4, doi:10.1088/1748-9326/4/3/034009.

Asner, G., Knapp, D., Broadbent, E., Oliveira, P., Keller, M. & Silva, J. 2005 Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science* 310, 480-482.

Asner, G., Powell, G., Mascaro, J., Knapp, D., Clark, J., Jacobson, J., Kennedy-Bowdoin, T., Balaji, A. *et al.* 2010. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *PNAS* 107, 16738-16742.

Baker, T.R., Phillips, O.L., Malhi, Y., Almeida, S., Arroyo, L., Di Fiore, A., Killeen, T., Laurance, S. 2004a Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B* 359, 353-365.

Baker, T.R., Phillips, O.L., Malhi, Y., Almeida, S., Arroyo, L., Di Fiore, A., Killeen, T., Laurance, S. *et al.* 2004b Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology* 10, 545-562.

- Baker, T.R., Honorio, E., Phillips, O.L., Martin, J., van der Heijden, G., Garcia, M. & Silva Espejo, J. 2007. Low stocks of coarse woody debris in a southwest Amazonian forest. *Oecologia* 152, 495-504.
- Brown, S., Burnham, M., Delaney, M., Powell, M. Vaca, R. & Moreno, A. 2000 Issues and challenges for forest-based carbon-offset projects: A case study of the Noel Kempff climate action project in Bolivia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 5, 99-12.
- Cairns, M., Brown, S., Helmer, E. & Baumgardner, G. 1997 Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111, 1-11.
- Castilho, C., Magnusson, W., Nazare, R., Luizao, R., Luizao, F., Lima, A. & Higuchi, N. 2006 Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian Forest: Effects of soil and topography. *Forest Ecology and Management* 234, 85-96.
- CEDISA. 2009 Potencial de almacenamiento de carbono en bosques naturales de áreas naturales protegidas, territorios comunales y concesiones forestales maderables para REDD en San Martin, Perú. CEDISA/WWF, Tarapoto, 100p.
- Chambers, J., Higuchi, N., Schimel, J., Ferreira, L. & Melack, J. 2000. Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon. *Oecologia* 122, 380-388.
- Chao, K.-J., Phillips, O., Baker, T., Peacock, J., Lopez-Gonzalez, G., Vasquez, R., Monteagudo, A. & Torres-Lezama, A. 2009 After trees die: quantities and determinants of necromass across Amazonia. *Biogeosciences* 6, 1615-1626.
- Chao, K.-J., Phillips, O. & Baker, T. 2008 Wood density and stocks of coarse woody debris in a northwestern Amazonian landscape. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 795-805.
- Chave, J. 2005. Measuring wood density for tropical forest trees. A field manual for the CTFs sites. 7 p.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F. *et al.* 2005 Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145, 87-99.
- Chave, J., Condit, R., Lao, S., Caspersen, J., Foster, R. & Hubbell, S. 2003 Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama. *Journal of Ecology* 91, 240-252.
- Chave J., Condit R., Muller-Landau H., Thomas S., Ashton P., Bunyavejchwin, S., Co, L., Dattaraja, H. *et al.* 2008 Assessing Evidence for a Pervasive Alteration in Tropical Tree Communities. *PLoS Biology* 6, doi:10.1371/journal.pbio.0060045

Clark, D. & Clark, D. 1996. Abundance, growth and mortality of very large trees in neotropical lowland rain forest. *Forest Ecology and Management* 80, 235-244.

Clark, D. 2004. "Sources or sinks? The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (Series B)* 359, 477-491.

Denman, K., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Dickinson, R., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E. *et al.* 2007. "Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry". En: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z and others (eds). *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, p 499-587.

del Grosso, S., Parton, W., Stohlgren, T., Zheng, D., Bachelet, D., Prince, S., Hibbard, K. & Olson, R. 2008. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature. *Ecology* 89, 2117-2126.

Dixon, R., Brown, S., Houghton, R., Solomon, A., Trexler, M. & Wisniewski, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263, 185-191.

Elias, M. & Potvin, C. 2003. Assessing inter- and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 1039-1045.

Freitas, L., Otarola, E., Del Castillo, D., Linares, C., Martínez, P. & Malca, G. 2006. Servicios ambientales de almacenamiento y secuestro de carbono del ecosistema aguajal en la Reserva Nacional Pacaya Samiria, Loreto – Perú. Documento técnico N° 29. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana, Iquitos.

Gibbs, H., Brown, S., Niles, J. & Foley, J. 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters* 2, doi: 10.1088/1748-9326/2/4/045023

Goetz, S., Baccini, A., Laporte, N., Johns, T., Walker, W., Keller, J., Houghton, R., & Sun, M. 2009 Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods. *Carbon Balance and Management* 4, doi:10.1186/1750-0680-4-2.

GOFC-GOLD. 2008. Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting. GOFC-GOLD Report version COP13-2, (GOFC-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada).

- Houghton, R., Lawrence, K., Hackler, J. & Brown, S. 2001. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Global Change Biology* 7, 731-746.
- Huete, A., Didan, K., Shimabukuro, Y., Ratana, P., Saleska, S., Hutyra, L., Yang, W., Nemani, R. & Myneni, R. 2006 Amazon rainforest green up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters* 33, doi:10.1029/2005GL025583.
- Lewis, S., Lopez-Gonzalez, G., Sonké, B., Affum-Baffoe, K., Baker, T., Ojo, L., Phillips, O., Reitsma, J. *et al.* 2009 Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature* 457, 1003-1006.
- Malhi, Y., Phillips, O., Baker, T., Almeida, S., Fredericksen, T., Grace, J., Higuchi, N., Killeen, T. *et al.* 2002 An international network to understand the biomass and dynamics of Amazonian forests (RAINFOR). *Journal of Vegetation Science* 13, 439-450.
- Malhi, Y., Roberts, T., Betts, R., Killeen, T., Li, W. & Nobre, C. 2008. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science* 319, 169-172.
- Malhi, Y. & Roman-Cuesta, R. 2008 Analysis of lacunarity and scales of spatial homogeneity in IKONOS images of Amazonian tropical forest canopies. *Remote Sensing of Environment* 112, 2074-2087.
- Malhi, Y., Aragão, L., Metcalfe, D., Paiva, R., Quesada, C., Almeida, S., Anderson, L., Brando, P. *et al.* 2009 Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology* 15, 1255-1274.
- Martius, C. 1997. Decomposition of wood. En: Junk WJ (ed). *The central Amazon floodplain. Ecology of a pulsing system*. Springer, Berlin, p 267-276.
- Metcalfe, D., Phillips, O., Baker, T., Brienen, R., Chao, K.-J., Silva, J. *et al.* 2009. Measuring tropical forest carbon allocation and cycling. RAINFOR Field Manual. 24 p.
- Muller-Landau, H. 2008. CTFs Global Forest Carbon Research Initiative. Overview of Planned Research. http://www.sigeo.si.edu/data/documents/CarbonInitiativeOverview_20080902.pdf
- Nascimento, H. & Laurance, W. 2002. Total aboveground biomass in central Amazonian rainforests: a landscape-scale study. *Forest Ecology and Management* 168, 311-321.
- Nelson, D.W. & Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. En: *Methods of Soil Analysis*, Part 2, 2nd ed., A.L. Page *et al.*, Ed. Agronomy. 9:961-1010. Am. Soc. of Agronomy, Inc. Madison, WI.

- Pearson, T., Walker, S. & Brown, S. 2005. Sourcebook for Land use, land-use change and forestry projects. Biocarbon Fund. Winrock International.
- Phillips, O., Malhi, Y., Higuchi, N., Laurance, W., Núñez, P., Vásquez, R., Laurance, S., Ferreira, L. *et al.* 1998. Changes in the Carbon Balance of Tropical Forests: Evidence from Long-Term Plots. *Science* 282, 439-442.
- Phillips, O., Baker, T., Arroyo, L., Higuchi, N., Killeen, T., Laurance, W., Lewis, S., Lloyd, J., Malhi, Y. *et al.* 2004 Pattern and process in Amazon tree turnover, 1976-2001. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B* 359, 381-407.
- Phillips, O., Aragão, L., Lewis, S., Fisher, J., Lloyd, J., López-González, G., Malhi, Y., Monteagudo, A. *et al.* 2009a Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. *Science* 5919, 1344-1347.
- Phillips, O., Baker, T., Feldpausch, T. & Brienens, P. 2009b. RAINFOR manual de campo para la remediación y establecimiento de parcelas, p 24.
- Quesada, A., Lloyd, J., Schwarz, M., Baker, T., Phillips, O., Patiño, S., Czimczik, C., Hodnett, M. *et al.* 2009. Regional and large-scale patterns in Amazon forest structure and function are mediated by variations in soil physical and chemical properties. *Biogeosciences Discussions* 6, 3993–4057.
- Rendón, O, Baker, T., Healey, J., del Castillo, D., Jones, J. & Román Cuesta, R. M. 2009. Criterios e indicadores para proyectos REDD. Proyecto 'Fortalecimiento de capacidades para pagos por servicios ambientales (carbono y biodiversidad) en la Amazonía Peruana'. Universidad de Leeds, Reino Unido, 35 p.
- Rügnitz, M. T., Chacón, M. & Porro R. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA), p 79. Lima, Perú.
- Saatchi, S., Halligan, K., Despain, D. & Crabtree, R. 2007. Estimation of forest fuel load from radar remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45, 1726-1740.
- Schlegel, B., Gayoso, J. & Guerra, J. 2001. *Manual de procedimientos: muestreos de biomasa forestal*. Universidad Austral de Chile, p 26.
- Stern, N. 2007. The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Toomey, M., Roberts, D. & Nelson, B. 2009. The influence of epiphylls on remote sensing of humid forests. *Remote Sensing of Environment* 113, 1787-1798.
- Walkley, A. & Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science* 63, 251-263.

Winrock. 2006. Carbon storage in the Los Amigos Conservation Concession, Madre de Dios, Peru. Turner Falls, 27 p.

Zanne, A.E., López-González, G., Coomes, D.A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S.L., Miller, R.B., Swenson, N.G., Wiemann, M.C. & Chave, J. 2009. Global wood density database. Dryad. Identifier.<http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>.

