



Muestreo en el campo de los sumideros de carbono vegetal en ecosistemas costeros

CONSIDERACIONES GENERALES

Un sumidero de carbono azul vegetal se compone de tres elementos distintos:

- La biomasa aérea viva dominada por la masa de plantas herbáceas (en el caso de los pastos marinos y las marismas) y leñosas (en el caso de los manglares). Esta biomasa también puede incluir a organismos epífitos (por ejemplo, algas y microbios que viven en las plantas) y raíces aéreas (neumatóforos).
- La biomasa subterránea viva dominada por raíces y rizomas.
- La biomasa aérea muerta, que incluye detritos formados principalmente por hojarasca (en los tres ecosistemas), algas o madera muerta o caída en manglares.

Los protocolos que se utilizan para determinar la cantidad de carbono de cada sumidero (en cada ecosistema) varían en función de la densidad y del tipo de vegetación. Las ecuaciones alométricas se utilizan para describir la relación entre los “parámetros medibles” (altura, ancho, circunferencia, etc.) y la biomasa total. Estas ecuaciones se utilizan a menudo para determinar la biomasa de materiales cuando resulta poco práctico, destructivo en exceso o imprudente llevar una muestra entera de vuelta al laboratorio (por ejemplo, árboles y arbustos grandes). Existen muchas ecuaciones alométricas bien establecidas en la literatura científica (muchas de las cuales se utilizan en este capítulo). Se recomienda utilizar ecuaciones que se hayan establecido para especies vegetales y sitios similares a los del sitio de estudio donde se realiza la investigación.

En todos los casos, el sumidero de carbono para cada tipo de vegetación se determina multiplicando la biomasa de cada tipo de material vegetal (por ejemplo, madera, hojarasca, raíces, etc.) por el factor de conversión de carbono correspondiente. El factor de conversión de carbono representa la fracción de la vegetación que está compuesta por carbono. Por ejemplo, si se determinó que la madera aérea viva está compuesta por un 45 % de carbono, el factor de conversión de carbono es 0.45. El factor de conversión de carbono se multiplica luego por la biomasa total del sumidero aéreo de la madera de esa parcela para establecer la cantidad de carbono en el sumidero aéreo de la madera en un área determinada.

El objetivo del Capítulo 4 es aplicar técnicas específicas a cada ecosistema para determinar la biomasa y el contenido de carbono orgánico (% C_{org}) para cada sumidero de carbono azul en cuestión. Una vez establecido el contenido de carbono de todos los sumideros, estos se suman para determinar el contenido de carbono de la biomasa por unidad de área de un sistema determinado (MgC/hectárea). Este valor se agrega luego al sumidero de carbono del suelo para una determinada profundidad de carbono del suelo (Capítulo 3) y así establecer cuál es la existencia de carbono total (MgC/hectárea–profundidad) de un ecosistema de carbono azul.

MANGLARES

Los ecosistemas de manglares albergan árboles, arbustos y otras plantas halófilas que crecen en aguas salobres a salinas sujetas al régimen de las mareas a lo largo de las costas tropicales y subtropicales (Mitsch & Gosselink 2007). Por lo general, los manglares se limitan a la zona intermareal desde aproximadamente el nivel medio del mar hasta la línea máxima de pleamar.

Los manglares se clasifican en cuatro asociaciones principales en función de distintas estructuras vegetales que corresponden a características físicas, climáticas e hidrológicas del ambiente en el que se encuentran: (1) manglares de borde en costas oceánicas, (2) manglares ribereños o de estuarios, (3) manglares de cuencas y (4) manglares enanos o arbustivos (o chaparros) (Cintrón *et al.* 1978; Mitsch & Gosselink 2007) (**Fig. 4.1**). Estas clasificaciones corresponden a biomasa aérea que oscila desde más de 500 MgC/ha en manglares ribereños

y de borde (como en las regiones de Asia y el Pacífico) hasta aproximadamente 8 MgC/ha para manglares enanos (Kauffman & Cole 2010; Kauffman *et al.* 2011).



Figura 4.1 Clasificación de manglares. (A) Manglares de borde en costas oceánicas (© Enrico Marone, CI). (B) Manglares ribereños o de estuarios (© Ginny Farmer, CI). (C) Manglares de cuencas (© Colin Foster, CI). (D) Manglares enanos o arbustivos (© Catherine Lovelock, UQ)

Los regímenes de inundación a través de los hábitats del manglar generan ambientes de humedales costeros salinos o salobres que a menudo están compuestos por sedimentos anóxicos (con niveles bajos de oxígeno). Como tales, los manglares poseen una diversidad de adaptaciones que permiten su supervivencia en estos ambientes únicos. Especialmente, esto incluye raíces aéreas (por ejemplo, sus características raíces fúlcreas y neumatóforos), que permiten el intercambio gaseoso para los tejidos radiculares subterráneos. La vegetación también varía en gran medida en estructura (altura de los árboles, densidad y composición de especies) y función, debido a diferencias en la temperatura, la precipitación, la hidrología y el sustrato (Saenger & Snedaker 1993). Los manglares maduros pueden presentarse como vegetación arbustiva de menos de 1 m de altura, hasta grandes árboles con fustes >1 m de diámetro.



Figura 4.2 Diferencias de altura entre la vegetación de un manglar. (A) Pequeños manglares enanos <2 metros de altura (© C.I. Feller, SERC). (B) Manglares de mayor tamaño de varios metros de altura (© Andreas Hutahaeen, KKP)

A pesar de las numerosas similitudes, los manglares difieren bastante de los bosques de tierras altas tanto en composición como en estructura. Los manglares tienen raíces fúlcreas y neumatóforos y no suelen tener mucha vegetación en el sotobosque ni una capa de detritos bien desarrollada, ya que los cangrejos, por lo general, son consumidores extremadamente eficientes de hojarasca, y los detritos son arrastrados lejos por las mareas. Debido a estas y otras diferencias entre la estructura y el ambiente de los manglares y los bosques de tierras altas, también difieren los enfoques para cuantificar su composición, estructura, existencias de carbono y estado. No obstante, es posible que algunos de los enfoques del muestreo de bosques de tierras altas puedan brindar orientación a la hora de diseñar e implementar un proyecto. Pueden encontrarse ejemplos destacados en la literatura científica (Pearson *et al.* 2005; Pearson *et al.* 2007; GOFC-GOLD 2009).

Consideraciones para el muestreo en el campo

Los ecosistemas de manglares a menudo son ambientes que presentan dificultades extremas para realizar evaluaciones de campo y muestreos. Los árboles suelen tener densidades extremadamente altas de tallos con abundantes raíces fúlcreas o neumatóforos. Las áreas del proyecto a menudo están atravesadas por canales de marea difíciles de atravesar. Es posible que todo el ecosistema esté inundado, especialmente durante las pleamareas. Estos y otros peligros limitan la movilidad y dan lugar a inquietudes en torno a la seguridad. La mayoría de los manglares, además, están sujetos a ciclos de mareas semidiurnas y pueden muestrearse únicamente durante las bajamareas, lo que limita tanto la elección del momento oportuno como la duración del muestreo, especialmente para los componentes del piso del bosque. En los manglares con la elevación más baja, es posible que el muestreo se limite a bajamareas de tan solo 3 a 4 horas. Este pequeño margen de tiempo requiere de un plan de muestreo eficiente.

En el Capítulo 2 describimos los enfoques para determinar la cantidad y la ubicación de las parcelas de muestreo dentro de un área o estratos del proyecto. Dado que los distintos sumideros de carbono en los manglares requieren de escalas y niveles de esfuerzo claramente distintos para el muestreo, suele ser necesario evaluar distintos componentes con muestras de área diferente. La biomasa de árboles, arbustos, herbáceas, lianas y palmeras, junto con la vegetación muerta como la hojarasca y la madera caída debe determinarse por separado y muestrearse a las escalas apropiadas (**Fig. 4.3**). Por ejemplo, para obtener una muestra representativa de árboles, es posible que el área de la muestra deba ser grande (por ejemplo, 50 m x 50 m), pero si luego desea recolectar la hojarasca, no es ni práctico ni necesario recolectar toda la hojarasca en un área tan grande. Por lo tanto, es más apropiado una subparcela más pequeña (por ejemplo, 2 m x 2 m).

Una vez determinados el tamaño y la ubicación, hay que decidir si las parcelas de muestreo serán permanentes o temporales. Las parcelas permanentes se utilizan cuando el mismo sitio será evaluado en el futuro para determinar los cambios. Las parcelas temporales se utilizan cuando el muestreo se realizará solo una vez o cuando no sea posible utilizar parcelas permanentes. En el Capítulo 2 brindamos orientación sobre el establecimiento de parcelas permanentes de muestreo versus parcelas temporales. Para obtener más información sobre el establecimiento de parcelas permanentes y métodos de muestreo, recomendamos consultar los sitios web de la Red Amazónica de Inventarios Forestales (www.rainfor.org/) y del Center for Tropical Forest Science (www.ctfs.si.edu/group/Resources/Methods).

Una vez determinados el tamaño, la escala y el tipo de parcela, el próximo paso es evaluar el contenido de carbono de cada sumidero de carbono que sea relevante.

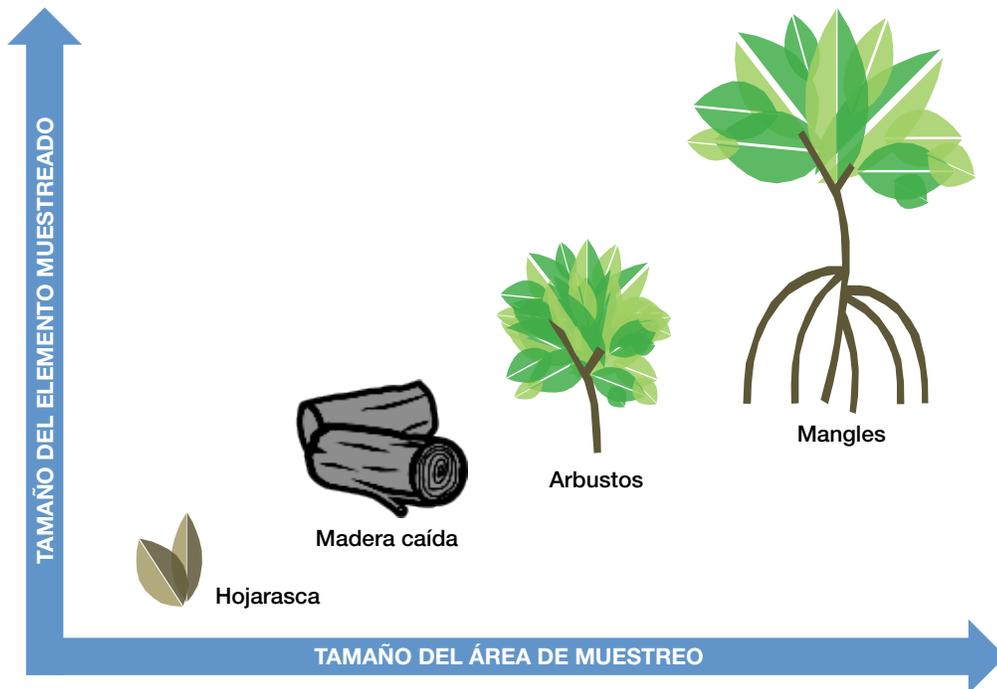


Figura 4.3 La escala de la parcela depende del componente que se analiza. Los árboles de gran tamaño requieren de un área lo suficientemente grande como para permitir un muestreo representativo. Los árboles más pequeños requieren de un área menor para obtener una muestra representativa, mientras que la hojarasca, las lianas, la madera muerta y los neumatóforos son componentes tan pequeños y numerosos que un área relativamente pequeña es adecuada para el muestreo (Kauffman & Donato 2011)

Estimaciones de biomasa

Esta sección brinda orientación sobre cómo medir la biomasa aérea en una diversidad de tipos de vegetación que es probable encontrar en el campo. Se requiere introducir algunas diferencias en los procedimientos de muestreo para tener en cuenta las diferencias en las formas de crecimiento.

ÁRBOLES VIVOS

Los árboles dominan el sumidero de carbono aéreo en manglares, y tanto su presencia como su condición son indicadores del cambio en el uso de la tierra y de su condición ecológica. Es fundamental medir los árboles en forma exacta y exhaustiva. Los datos básicos que se deben registrar para cada uno de los mangles de una parcela son:

- Especie (por lo general hay pocas especies en los manglares, las especies pueden identificarse habitualmente con capacitación en el terreno).
- Diámetro del tallo principal a la altura del pecho (dap).
- Altura del árbol, de ser posible.
- Ubicación e identificación.

Se recomienda muestrear y registrar todos los árboles vivos en toda el área de la parcela, en especial en parcelas permanentes donde se monitorean las tendencias en el carbono. No obstante, esto difiere de los muestreos en bosques de tierras altas, donde solo se miden los árboles con dap mayor que 10 cm para estandarizar los métodos (GOFC-GOLD 2009). Los árboles más pequeños se omiten en los cálculos de carbono porque a menudo representan una proporción relativamente insignificante de la existencia de carbono total del bosque de tierras altas (Cummings *et al.* 2002). En muchos manglares, no obstante, los árboles más pequeños pueden dominar la composición del rodal y, por lo

tanto, deben incluirse (Lovelock *et al.* 2005; Kauffman & Cole 2010). Un árbol se incluye en el muestreo si al menos el 50 % del tallo principal está enraizado dentro del perímetro de la parcela.

En aras de la eficiencia, los árboles que tienen menor diámetro pueden medirse en subparcelas para reducir la cantidad de mediciones necesarias. Por ejemplo, Kauffman y Cole (2010) midieron todos los árboles con dap >5 cm en toda el área de la parcela, mientras que los árboles con dap <5 cm se midieron en áreas secundarias más pequeñas de tamaño conocido. El número total de árboles pequeños pudo estimarse entonces asumiendo una densidad constante en toda el área de la parcela.

En caso de que haya una presencia importante de plántulas, estas podrán registrarse como una suma simple de individuos en un área secundaria. Para nuestros propósitos, definimos plántula como una planta leñosa con una altura entre 10 cm y 30 cm (Esquivel *et al.* 2008). Para determinar el contenido de carbono asociado a las plántulas, se debe recolectar para el análisis una muestra al azar fuera del área de la parcela (solo es necesario recolectar fuera de la parcela cuando se trabaje con parcelas permanentes; la idea es incluir plántulas en el análisis, pero dejarlas en la parcela de modo que puedan monitorearse a través del tiempo). El contenido de carbono puede determinarse secando las plántulas para determinar la biomasa, seguido del análisis de laboratorio con un analizador de elementos (Capítulo 3), pero en muchos casos es posible encontrar publicado un factor de conversión de carbono para especies de árboles específicas. El contenido de carbono promedio se multiplica luego por la densidad (plántulas por área de la unidad) para determinar su contribución a la biomasa de la parcela y de los estratos.

Para determinar la biomasa de los mangles, se aplican ecuaciones alométricas ya existentes (Chave *et al.* 2005). Las ecuaciones alométricas presentan relaciones establecidas entre la biomasa de árboles enteros (o sus partes) y parámetros fáciles de medir. Es importante identificar con exactitud la especie ya que permite seleccionar la ecuación alométrica más apropiada para cada mangle que se mide. Entre los parámetros estándar, se incluyen el diámetro del árbol, la densidad de la madera (**Tabla 4.2**) y la altura del árbol.

Diámetro a la altura del pecho (dap): El diámetro del árbol se utiliza, por lo general, para calcular el volumen del árbol. El diámetro del tallo principal del árbol se mide habitualmente a 1.3 m por encima del suelo y también se denomina dap. Estas mediciones se suelen realizar con una cinta diamétrica (cuando se requieren varias mediciones) o forcípulas (una única medición para una evaluación rápida). Este no siempre es un proceso sencillo a causa de anomalías en la estructura del tallo. **La Fig. 4.4** presenta una reseña de los puntos de medición para una diversidad de configuraciones arbóreas.

- Si el árbol está relativamente derecho y tiene un tronco alto, el dap puede medirse desde el piso paralelamente al tronco (**Fig. 4.4A**).
- Si el árbol está en una pendiente, mida siempre en el lado que está pendiente arriba (**Fig. 4.4B**).
- Si el árbol está inclinado, el dap se mide de acuerdo con la altura natural del árbol paralelamente al tronco (**Fig. 4.4C**).
- Si el árbol tiene ramificaciones a 1.3 m o por debajo, medir apenas por debajo de la ramificación (**Fig. 4.4D**).
- Si la ramificación está muy cerca del suelo, medir como si se tratara de dos árboles (**Fig. 4.4E**).
- En el caso de árboles con contrafuertes altos que superan 1.3 m por encima del nivel del suelo, el diámetro del tallo se mide, por lo general, justo por encima del contrafuerte (**Fig. 4.4F**).
- En el caso de especies con raíces fúlcreas (por ejemplo, *Rhizophora* spp.), el diámetro del tallo se mide a menudo desde la parte superior de la raíz más alta (**Fig. 4.4G**). En algunos árboles con raíces fúlcreas que surgen bien entradas en el dosel, no es necesario, práctico ni exacto medir por

encima de la raíz fúlcrea más alta y, por lo general, el diámetro del árbol se mide por encima de las raíces fúlcreas donde existe un tallo principal verdadero.

En parcelas permanentes, es muy importante marcar el punto de medición cuando no se encuentra a 1.3 m por encima del nivel del suelo para que se puedan repetir las mediciones en el mismo lugar. Esto se logra colocando marcas en los árboles o pintando un anillo en el punto exacto de medición.

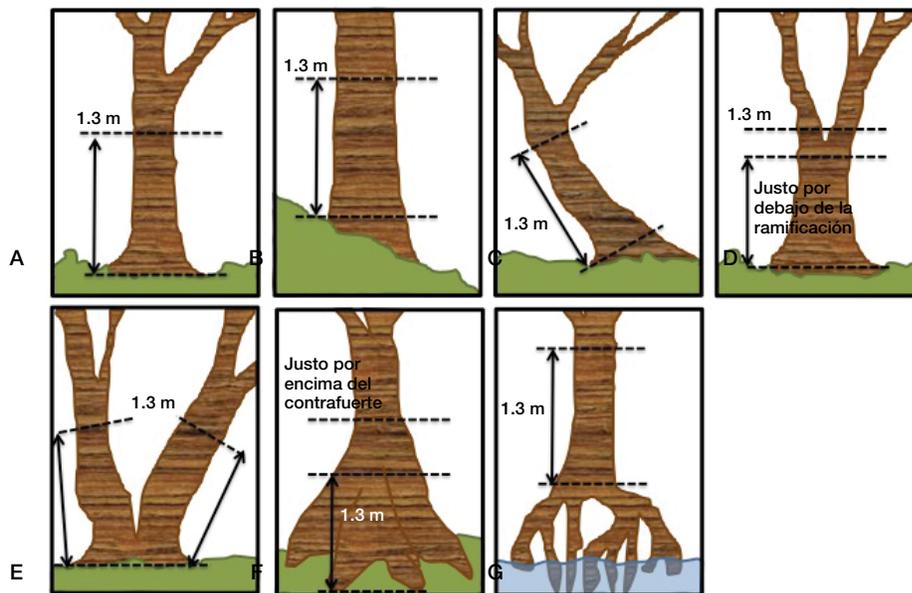


Figura 4.4 Estimación del diámetro a la altura del pecho para manglares de forma irregular (modificado de Pearson, *et al.* 2005)

En algunos estudios, el punto de medición se marca con un tornillo de acero inoxidable. Sin embargo, cuando se utilizan clavos, los árboles tienden a desarrollar heridas en la madera (protuberancias) donde la madera fue dañada por estos. Esto puede hacer que se sobrestime el crecimiento del árbol, por lo que no es recomendable.

Densidad de la madera: La densidad de la madera describe la relación entre el peso de la madera seca (g) y el volumen de la madera (cm^3). La parte de la planta (ramas, tallo principal, corteza, etc.) que se recolecte para determinar la densidad de la madera depende de qué tan práctico sea obtener muestras y del nivel de exactitud deseado. Para conocer la densidad de la madera hay que medir tanto el volumen de las muestras frescas como el de la masa secada al horno de varias muestras de madera (lo ideal es $n > 25$ por tipo de muestra). Las muestras a menudo se obtienen tomando pequeñas porciones de la corteza, cortando segmentos de ramas (~ 2.5 cm) y con la ayuda de una barrena de Pressler en el tallo principal (tomadas a una altura constante). A modo general, cada pieza recolectada para análisis debería tener una masa entre ~ 0.5 g y 50 g.

El volumen se obtiene determinando la masa sumergida de cada muestra fresca. En una balanza digital, coloque un recipiente de tamaño suficiente como para sumergir cada muestra. Agregue agua en el recipiente a una altura que permita que el agua se desplace sin desbordar por los costados del recipiente (no hasta el tope). Cada muestra se conecta a una aguja a su vez conectada a un soporte anular colocado por encima de la balanza. Luego se sumerge la muestra (sin tocar el fondo ni los costados del recipiente) y se registra el cambio en la masa. El cambio en la masa (g) dividido por la densidad del agua (g/cm^3) da como resultado el volumen de la muestra. La densidad del agua es de $1 \text{ g}/\text{cm}^3$; por lo tanto, el aumento resultante en la masa que se muestra en la balanza equivale al volumen desplazado por la muestra.

El peso seco se obtiene secando las muestras de madera en un horno bien ventilado a 100 °C hasta que la masa sea constante (por lo general, entre 24 y 72 horas, pero el tiempo dependerá del tamaño de la muestra). Recomendamos secar a 100 °C porque el agua en el interior de la pared celular solo puede secarse a estas temperaturas. Para cada muestra, calcule la densidad de la madera aplicando la siguiente ecuación y determine el promedio para cada tipo de muestra.

- Densidad de la madera (g/cm^3) = Peso seco (g)/volumen de madera fresca (cm^3).

Las densidades de la madera en árboles vivos (que pueden diferir de las densidades de los restos de madera caída) se requieren para determinadas ecuaciones alométricas de biomasa, incluidas las ecuaciones generales para manglares (ver la próxima sección). Se ha observado que las densidades entre individuos de la misma especie varían en gran medida entre sitios. Por lo tanto, es preferible aplicar las densidades de madera específicas del sitio estimadas mediante análisis en laboratorio de muestras obtenidas en el campo. En caso de que esto no sea viable, es posible que las agencias forestales locales conozcan las densidades de la madera de algunas especies. Entre otras fuentes generales donde obtener datos de densidad de la madera se encuentran la base de datos agroforestal mundial (World Agroforestry Database; World Agroforestry Center 2001) y las publicaciones del Departamento de Agricultura de los EE. UU. (Hidayat & Simpson 1994). En la **Tabla 4.1** encontrará ejemplos de densidades de la madera para especies estándar de los manglares.

Ecuaciones alométricas para determinar la biomasa de mangles: Varias referencias reportan ecuaciones alométricas para determinar la biomasa en manglares (Saenger 2002; Chave *et al.* 2005; Smith III & Whelan 2006; Komiyama *et al.* 2008; Kauffman & Cole 2010; Kauffman & Donato 2011). Encontrará ejemplos compilados por Kauffman y Donato (2011) en la **Tabla 4.2** (para ecuaciones con parámetros de dap y densidad de madera) y en la **Tabla 4.3** (para ecuaciones con parámetros de dap, densidad de madera y altura del árbol). Antes de decidir qué ecuación alométrica utilizar, considere el origen geográfico y las especies que dieron lugar al conjunto de datos a partir del cual se obtuvo la ecuación. Lo ideal es utilizar una ecuación específica a la especie y desarrollada en la región donde se vaya a muestrear. Dadas las diferencias en la estructura y la densidad de la madera entre especies, es de esperar que las ecuaciones específicas a cada especie arrojen resultados más exactos que las ecuaciones generales. También es fundamental tener en cuenta el diámetro máximo del que se derivó la ecuación. Aplicar la ecuación a árboles que exceden el diámetro máximo ($D_{\text{máx.}}$) puede hacer que se sobrestime significativamente la biomasa en términos estadísticos. En situaciones en las que la cantidad de datos sea muy pobre, se pueden aplicar ecuaciones alométricas generales para los manglares, pero la incertidumbre será relativamente alta.

Tabla 4.1. Densidad de madera para especies de mangles ($1 \text{ Mg/m}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$) (Saenger 2002; Komiyama *et al.* 2005; Donato *et al.* 2012; World Agroforestry Center 2001).

ESPECIE	n	DENSIDAD PROMEDIO DE LA MADERA (MG/m ³)	ERROR ESTÁNDAR
<i>Avicennia germinans</i>	5	0.72	0.04
<i>Avicennia marina</i>	6	0.62	0.06
<i>Avicennia officinalis</i>	3	0.63	0.02
<i>Brugueria gymnorrhiza</i>	8	0.81	0.07
<i>Ceriops decandra</i>	2	0.87	0.10
<i>Ceriops tagal</i>	7	0.85	0.04
<i>Excoecaria agallocha</i>	7	0.41	0.02
<i>Heritiera fomes</i>	3	0.86	0.14
<i>Heritiera littoralis</i>	6	0.84	0.05
<i>Laguncularia racemosa</i>	3	0.60	0.01
<i>Rhizophora apiculata</i>	4	0.87	0.06
<i>Rhizophora mangle</i>	7	0.87	0.02
<i>Rhizophora mucronata</i>	9	0.83	0.05
<i>Sonneratia alba</i>	6	0.47	0.12
<i>Sonneratia apetala</i>	2	0.50	0.01
<i>Xylocarpus granatum</i>	7	0.61	0.04
Promedio		0.71	0.02

Tabla 4.2. Ecuaciones alométricas para el cálculo de la biomasa de mangles utilizando únicamente los parámetros de diámetro (dap) y densidad de la madera. Las ecuaciones generales incluyen toda la biomasa aérea. Las ecuaciones para especies en particular se desglosaron por componente. B = Biomasa (kg), D = Diámetro a la altura del pecho (cm), ρ = Densidad de la madera (g/cm³), D_{máx.} = Diámetro máximo de los árboles muestreados (cm) (Modificado de Kauffman y Donato, 2011).

GRUPO DE ESPECIES	N	D _{máx.}	UBICACIÓN	ECUACIÓN DE BIOMASA	R ²
Ecuación general	84	42	América	$B = 0.168 * \rho * (D)^{2.471}$	0.99
Ecuación general	104	49	Asia	$B = 0.251 * \rho * (D)^{2.46}$	0.98
<i>Avicennia germinans</i>	25	42	Guinea Francesa	$B = 0.14 * D^{2.4}$	0.97
<i>Avicennia germinans</i>	8	21.5	Florida, EE. UU.	$B = 0.403 * D^{1.934}$	0.95
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i> (hoja)	17	24	Australia	$B = 0.0679 * D^{1.4914}$	0.85
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i> (madera)	326	132	Micronesia	$B = 0.0754 * \rho * D^{2.505}$	0.91
<i>Laguncularia racemosa</i>	70	10	Guinea Francesa	$B = 103.3 * D^{2.5}$	0.97
<i>Laguncularia racemosa</i>	10	18	Florida, EE. UU.	$B = 0.362 * D^{1.930}$	0.98
<i>Rhizophora apiculata</i>	20	30	Malasia	$B = 0.1709 * D^{2.516}$	0.98
<i>Rhizophora apiculata</i> (madera)	191	60	Micronesia	$B = 0.0695 * \rho * D^{2.644}$	0.89
<i>Rhizophora apiculata stylosa</i> (hoja)	23	23	Australia	$B = 0.0139 * D^{2.1072}$	0.86
<i>Rhizophora apiculata stylosa</i> (raíces fúlcreas)	23	23	Australia	$B = 0.0068 * D^{3.1353}$	0.97
<i>Rhizophora mangle</i>	14	20	Florida, EE. UU.	$B = 0.722 * D^{1.731}$	0.94
<i>Rhizophora spp.</i> (<i>racemosa</i> y <i>mangle</i>)	9	32	Guinea Francesa	$B = 0.1282 * D^{2.6}$	0.92
<i>Sonneratia alba</i> (madera)	346	323	Micronesia	$B = 0.3841 * \rho * D^{2.101}$	0.92

Tabla 4.3. Ecuaciones alométricas para el cálculo de la biomasa de mangles cuando los parámetros de diámetro (dap) y altura se utilizan para ecuaciones específicas a cada especie, y el diámetro y la densidad de la madera se utilizan para la ecuación general. Las ecuaciones generales incluyen toda la biomasa aérea. Las ecuaciones para especies en particular representan la masa de madera y no incluyen hojas ni raíces. B = Biomasa (kg), H = Altura (m), D = Diámetro a la altura del pecho (cm), ρ = Densidad de la madera (g/cm³), D_{máx.} = diámetro máximo de los árboles muestreados (cm), H_{máx.} = altura máxima de los árboles muestreados (Modificado de Kauffman y Donato, 2011).

GRUPO DE ESPECIES	N	D _{máx.}	H _{máx.}	ECUACIÓN DE BIOMASA	R ²
Ecuación general	84	42		$B = 0.0509 \cdot \rho \cdot (D)^{2.2} \cdot H$	
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	325	132	34	$B = 0.0464 \cdot (D^2 H)^{0.94275} \cdot \rho$	0.96
<i>Lumnitzera littorea</i>	20	70.6	19	$B = 0.0214 \cdot (D^2 H)^{1.05655} \cdot \rho$	0.93
<i>Rhizophora apiculata</i>	193	60	35	$B = 0.0444 \cdot (D^2 H)^{0.96842} \cdot \rho$	0.96
<i>Rhizophora mucronata</i>	73	39.5	21	$B = 0.0311 \cdot (D^2 H)^{1.00741} \cdot \rho$	0.95
<i>Rhizophora</i> spp.	265	60	35	$B = 0.0375 \cdot (D^2 H)^{0.98626} \cdot \rho$	0.95
<i>Sonneratia alba</i>	345	323	42	$B = 0.0825 \cdot (D^2 H)^{0.89966} \cdot \rho$	0.95
<i>Xylocarpus granatum</i>	115	128.5	31	$B = 0.0830 \cdot (D^2 H)^{0.89806} \cdot \rho$	0.95

Varianza de las ecuaciones alométricas: Hay mucha variación en la densidad de la madera, la morfología y las relaciones altura-diámetro entre sitios, lo que puede afectar la exactitud y la utilidad de cualquier ecuación alométrica. Distintas ecuaciones pueden arrojar diferencias muy importantes en las predicciones de biomasa. En la **Fig. 4.5** se muestran predicciones generadas a partir de distintas ecuaciones alométricas utilizando el mismo conjunto de datos para un manglar en Yap, Estados Federados de Micronesia (Kauffman *et al.* 2011). La predicción de biomasa del ejemplar más grande de *Bruguiera* en este manglar (69 cm dap) fue de 2588 kg con la ecuación de Kauffman y Cole (2010) y de 7014 kg con la ecuación general de Komiyama *et al.* (2008). De forma similar, la estimación de

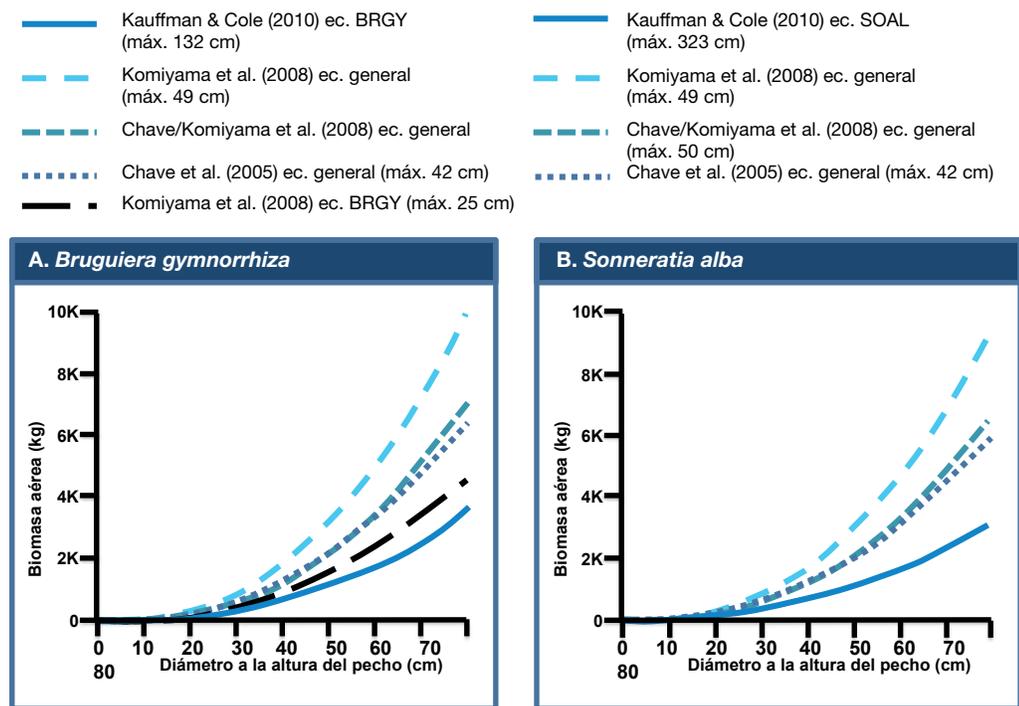


Figura 4.5 Comparación de estimaciones de biomasa de árboles para (A) *Bruguiera gymnorrhiza* y (B) *Sonneratia alba*. Los números en paréntesis son los diámetros máximos de los árboles utilizados para formular las ecuaciones (Chave *et al.* 2005; Komiyama *et al.* 2008; Kauffman & Cole 2010)

biomasa para un ejemplar de *Sonneratia alba* de 45 cm dap fue de 873 kg con la fórmula de Kauffman y Cole (2010) y >1500 kg con las demás ecuaciones. Para los árboles más grandes del conjunto las diferencias fueron aún más dramáticas. La estimación de biomasa para un árbol de 80 cm dap fue de 3034 kg con la ecuación de Kauffman y Cole (2010) pero fue más de tres veces más alta (9434 kg) con la ecuación general para manglares de Komiyama *et al.* (2008). Es importante considerar que solo las ecuaciones desarrolladas por Kauffman y Cole (2010) incluían todo el rango de diámetros del sitio de Yap, y las ecuaciones alométricas utilizadas solo dependían del diámetro (dap) y la densidad de la madera para calcular la biomasa de los manglares. Estas grandes diferencias destacan la importancia de utilizar las mismas ecuaciones para todos los árboles en el área de un proyecto, al comparar distintos manglares, y especialmente en parcelas permanentes a través del tiempo.

Determinación de la cantidad de carbono dentro del componente de árboles vivos (kg C/m²):

El componente de carbono de un árbol vivo se determina multiplicando la biomasa (kg) de cada árbol (calculada con una ecuación alométrica o por análisis de laboratorio) por el factor de conversión de carbono para especies de manglares específicas de esa región. Esto se realiza para cada árbol muestreado. Luego se suman todos los valores correspondientes al contenido de carbono de cada árbol en particular para determinar el contenido de carbono total de los árboles (kg C) para el tamaño de parcela en cuestión (m²). Los factores de conversión de carbono se basan en el porcentaje de biomasa formado por carbono orgánico. Esto puede determinarse mediante análisis de laboratorio con un analizador de elementos (Capítulo 3), pero en muchos casos es posible encontrar publicado un factor de conversión de carbono para especies de árboles específicas. Kauffman *et al.* (2011) reportaron que el contenido de carbono de *Bruguiera gymnorrhiza* era del 46.3 %, el de *Rhizophora apiculata*, del 45.9 %, y el de *Sonneratia alba*, del 47.1 %. Por lo tanto, en caso de que los valores locales o específicos de las especies no estén disponibles, la biomasa de estos y otros árboles puede multiplicarse por 0.46 a 0.5 para obtener el contenido de carbono.

EJEMPLO

- Contenido de carbono de cada árbol (kg C) = Biomasa del árbol (kg) * Factor de conversión del carbono (0.46–0.5).
- Carbono en el componente de árboles vivos (kg C/m²) = (Contenido de carbono del árbol 1 + contenido de carbono del árbol 2 + árbol n) / Área de la parcela (m²).

MANGLARES ARBUSTIVOS

Un elevado porcentaje de los manglares del mundo tienen una estructura aérea de pequeños árboles de unos pocos metros de altura y, a menudo, se los denomina manglares enanos, manglares arbustivos o manglares chaparros. Actualmente, hay pocas ecuaciones alométricas para determinar la biomasa aérea de estos tipos de manglares. Por lo tanto, es una necesidad importante de investigación. Las escasas ecuaciones existentes que se utilizan más a menudo son de mediciones de manglares enanos en el sur de Florida, EE. UU. (Ross *et al.* 2001; Coronado-Molina *et al.* 2004). Las ecuaciones en Ross *et al.* (2001) utilizan el diámetro del tallo principal a 30 cm por encima de la superficie del suelo y el volumen de la copa para predecir la biomasa aérea de manglares individuales. Coronado-Molina *et al.* (2004) desarrollaron ecuaciones alométricas utilizando el área de la copa y la cantidad de raíces fúlcreas. El método más exacto, no obstante, es desarrollar ecuaciones alométricas específicamente para la vegetación de su área de interés.

Para desarrollar una ecuación alométrica para un nuevo sitio, se deberían medir (habitualmente, diámetro de la corona, volumen de la corona, área de la corona, altura del árbol o diámetro del tallo principal a 30 cm por encima del nivel del suelo, **Fig. 4.6**) y tomar muestras de al menos entre 15 y 25 árboles de cada especie en cuestión, incluyendo el rango de tamaño desde las plántulas más

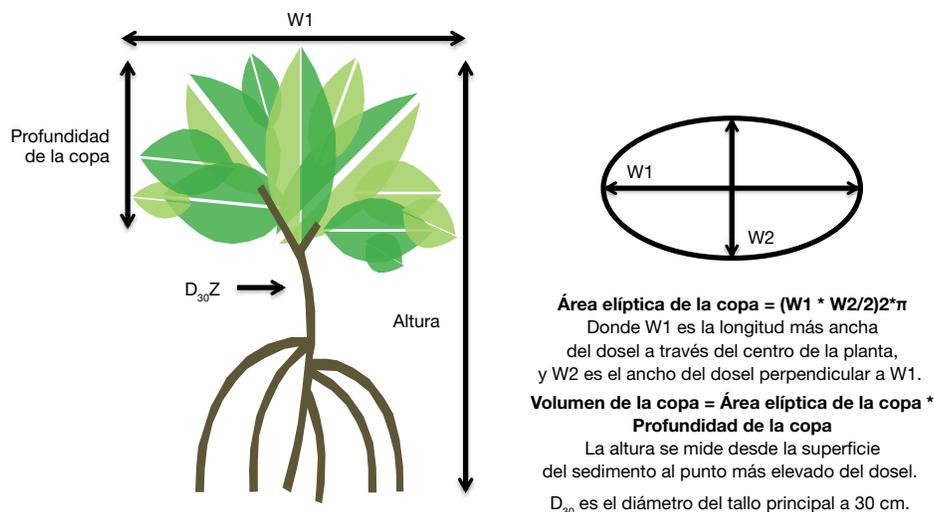


Figura 4.6 Técnicas de medición en campo para calcular el área elíptica y la profundidad de la copa, la altura y el diámetro a 30 cm de altura (D₃₀) en mangles enanos. La biomasa aérea de estos pequeños árboles se predice mejor a través de ecuaciones alométricas en las que la biomasa aérea es la variable dependiente y el área de la copa, y la altura y/o el volumen de la copa son las variables independientes (Ross *et al.* 2001)

pequeñas hasta los ejemplares más grandes. En el laboratorio, cada ejemplar se seca y se pesa para obtener la biomasa. Luego pueden desarrollarse mediante análisis de regresión relaciones entre la biomasa del árbol y las mediciones dasométricas (diámetro, área y volumen de la corona, diámetro del tallo principal a 30 cm).

Una vez establecidas las ecuaciones alométricas, se pueden aplicar a cada mangle arbustivo dentro de la parcela de muestreo. El tamaño de las parcelas es pequeño por lo general. No obstante, dado que los manglares arbustivos crecen en comunidades muy densas, las mediciones de campo pueden llevar mucho tiempo (**Fig. 4.2A**). Por ejemplo, el tamaño y la forma de una parcela típica sería una parcela en forma de semicírculo con 2 m de radio (área total 6.3 m²).

Determinación de la cantidad de carbono dentro del componente de manglar arbustivo (kg C/ m²): El componente de carbono de un manglar arbustivo se determina para cada árbol multiplicando la biomasa (kg), calculada con una ecuación alométrica, por el factor de conversión de carbono para manglares arbustivos específicos de esa región. Esto se debe realizar para cada mangle arbustivo dentro de la parcela. Luego se suman todos los valores correspondientes al contenido de carbono de cada árbol para determinar el contenido de carbono total de los mangles arbustivos (kg C) para el tamaño de parcela en cuestión (m²).

El factor de conversión de carbono para manglares arbustivos no está bien documentado en la literatura científica. Por lo tanto, se puede determinar mediante análisis de laboratorio con un analizador de elementos (Capítulo 3) o resulta justificable el uso del factor de conversión reportado para mangles altos (0.46 a 0.5; ver la sección anterior sobre mangles).

EJEMPLO

- Contenido de carbono de cada árbol (kg C) = Biomasa del árbol (kg) * Factor de conversión del carbono (0.46–0.5).
- Carbono en el componente de árboles vivos (kg C/m²) = (Contenido de carbono del árbol 1 + contenido de carbono del árbol 2 + árbol n) / Área de la parcela (m²).

ÁRBOLES MUERTOS EN PIE

Todos los árboles muertos en pie dentro de cada parcela de muestreo deben registrarse como tales y analizarse como un sumidero por separado. El grado de descomposición del árbol determinará cómo calcular su biomasa. El estado de descomposición se clasifica de la siguiente manera (Fig. 4.7):

- **Estado de descomposición 1:** Conserva pequeñas ramas y ramillas; se asemeja a un árbol vivo a excepción de la falta de hojas.



Figura 4.7 Ejemplos de estados de descomposición de árboles muertos. 1) Árboles recientemente muertos que conservan muchas ramas pequeñas y ramitas. 2) Árboles que han perdido las ramas pequeñas y las ramitas y una parte de las ramas grandes. 3) La mayoría de las ramas desaparecieron y sólo queda el tallo principal, a menudo deteriorado (Solochin 2009)

- **Estado de descomposición 2:** Sin ramas pequeñas o ramillas; es posible que haya perdido parte de las ramas grandes.
- **Estado de descomposición 3:** Pocas ramas o ninguna rama; solo queda el tallo; el tallo principal puede estar quebrado o desmochado.

La biomasa de los árboles muertos en pie se determina entonces según el estado de descomposición del árbol.

Estado de descomposición 1: La biomasa puede estimarse con ecuaciones para árboles vivos. La única diferencia es que deben restarse las hojas de la estimación de la biomasa. Esto puede lograrse o bien con una ecuación de biomasa de hojas para determinar la cantidad de hojas a restar (Clough & Scott 1989; Komiyama *et al.* 2005; Smith III & Whelan 2006) o restando una constante del 2.5 % de la estimación de la biomasa del árbol vivo.

Estado de descomposición 2: La biomasa puede calcularse restando una parte de la biomasa de las ecuaciones para árboles vivos. Debido a que han perdido algunas ramas además de las hojas, deben considerarse las pérdidas de la biomasa tanto de las hojas como de las ramas. Por lo general, se resta un total del 10 % al 20 % de la biomasa (teniendo en cuenta tanto las hojas como algunas ramas). Este monto puede ajustarse y adaptarse a condiciones específicas mediante observaciones en el campo.

Estado de descomposición 3: A menudo los árboles habrán perdido una parte importante de su volumen debido al deterioro avanzado. Por consiguiente, es difícil estimar la biomasa a partir de

las estimaciones de biomasa para árboles vivos. En su lugar, el volumen restante del árbol puede calcularse con la ecuación de un cono truncado. Para hacer esto, registre el diámetro de la base del árbol y la altura total del árbol con una herramienta láser o un clinómetro (herramienta usada para medir la altura de un mangle). El diámetro superior debe estimarse con una ecuación de conicidad.

Ecuación de conicidad para estimar el diámetro superior de un árbol seco quebrado o desmochado:

- Estimación del diámetro superior de un árbol muerto quebrado o desmochado (cm) = Diámetro de la base medido (cm) – {100 * Altura del árbol (m) * [Diámetro de la base medido (cm) – Diámetro a la altura del pecho (cm)/130]}.
 - $d_{\text{parte superior}} = d_{\text{base}} - \{100 * ht * [(d_{\text{base}} - dap)/130]\}$.
 - Si la ecuación de conicidad arroja un número negativo, use 0 para la siguiente ecuación.

Luego, el volumen del árbol muerto se determina suponiendo que el árbol es un cono truncado:

- Volumen del árbol muerto (cm³) = $\{\pi * [100 * \text{altura del árbol (m)} / 12] * [\text{Diámetro de la base (cm)}^2 + \text{Diámetro superior (cm)}^2 + (\text{Diámetro de la base (cm)} * \text{Diámetro superior (cm)})]\}$.
 - $\text{Volumen (cm}^3\text{)} = [\pi * (100 * ht) / 12] * (d_{\text{base}}^2 + d_{\text{parte superior}}^2 + (d_{\text{base}} * d_{\text{parte superior}}))$.

La biomasa del árbol muerto (kg) se determina luego multiplicando su volumen (cm³) por la densidad de la madera (g/cm³).

- Biomasa de árbol muerto con estado de descomposición 3 (kg) = Volumen del árbol seco (cm³) * Densidad de la madera (g/cm³) * (1 kg/1000 g).

Lo ideal es determinar la densidad de la madera de árboles muertos en pie en el laboratorio. No obstante, si eso no fuese práctico, puede utilizarse una lista de densidades estándar basadas en el tamaño (**Tabla 4.4**) para este cálculo. Es importante observar que la información de densidad de la **Tabla 4.4** se obtuvo a partir de madera caída con un nivel muy bajo o nulo de descomposición que fue medida después de un tifón. Los estudios han demostrado que existe una amplia gama de densidades para los diversos componentes (ramas pequeñas 0.350–0.628, ramas 0.60–0.284, raíces fúlcreas 0.276–0.511, y troncos 0.234–0.340), destacando la necesidad de contar con estimaciones específicas del sitio para la densidad de la madera siempre que sea posible (Robertson & Daniel 1989).

Tabla 4.4 Densidad de la madera y diámetro medio de las clases estándar de tamaño de los restos caídos de madera de mangle (*Rhizophora apiculata*, *Sonneratia alba* y *Bruguiera gymnorrhiza*) (Kauffman & Cole 2010).

CLASE DE TAMAÑO (DIÁMETRO EN cm)	DENSIDAD ± EE (g/cm ³)	TAMAÑO DE LA MUESTRA (n)
<0.64	0.48 ± 0.01	117
0.65 – 2.4	0.64 ± 0.02	31
2.54 – 7.6	0.71 ± 0.01	69
>7.6	0.69 ± 0.02	61

Determinación de la cantidad de carbono dentro del componente de los árboles muertos en pie (kg C/m²): El sumidero de carbono formado por los árboles muertos en pie se determina multiplicando la biomasa (kg), determinada por el estado de descomposición, de cada árbol en particular por un factor de conversión de carbono. Luego se suman todos los valores correspondientes al contenido de carbono de cada árbol en particular para determinar el contenido de carbono total de los árboles (kg C) para el tamaño de parcela en cuestión (m²).

El factor de conversión de carbono para árboles secos en pie se puede determinar mediante análisis de laboratorio con un analizador de elementos (Capítulo 3). Si esto no fuese práctico, la concentración

de carbono de la madera muerta por lo general es de alrededor del 50 % (Kauffman *et al.* 1995). Por lo tanto, la biomasa de estos árboles se multiplica habitualmente por 0.5 para obtener el valor de la existencia de carbono.

EJEMPLO

- Contenido de carbono de cada árbol (kg C) = Biomasa del árbol (kg) * Factor de conversión del carbono (0.46–0.5).
- Carbono en el componente de los árboles muertos en pie (kg C/m²) = (Contenido de carbono del árbol 1 + Contenido de carbono del árbol 2 + Árbol n) / Área de la parcela (m²).

LIANAS

Las lianas son enredaderas leñosas de largos tallos que se enraízan en el suelo del bosque y trepan hasta el dosel (**Fig. 4.8**). Varían desde enredaderas pequeñas y homogéneas que se enroscan alrededor de los troncos a grandes lianas de varios cm de diámetro que aparentan colgar en medio del bosque independientemente de los árboles. Es raro que haya lianas de gran tamaño en los manglares, pero si están presentes, se las puede medir igual que los árboles.

Todas las lianas en el área de muestra se deben medir si se incluyen en los cálculos. Hay algunas ecuaciones para determinar la biomasa de lianas (Schnitzer *et al.* 2006), pero para nuestros fines se puede estimar con la ecuación alométrica general:



Figura 4.8 Lianas. (A) Primer plano de una liana típica de los manglares (© IITA). (B) Imagen de la medida en que las lianas pueden aportar a la biomasa vegetal (© Mark Marathon, Wikimedia Commons)

- Biomasa de las lianas (kg) = [Diámetro a 130 cm de la superficie del suelo (cm)]^{2.657} * e^{0.968} * ln [Diámetro de 130 cm de la superficie del suelo (cm)].
 - B = D^{2.657} * e^{-0.968*}ln (D).

Determinación de la cantidad de carbono dentro del componente de las lianas (kg C/m²): Cuando hay lianas presentes en los manglares, el sumidero de carbono de estas se determina multiplicando la

biomasa (kg) de cada enredadera en forma individual por un factor de conversión de carbono. Luego se suman todos los valores correspondientes al contenido de carbono de cada liana en particular para determinar el contenido de carbono total de las enredaderas (kg C) para el tamaño de parcela en cuestión (m²).

El factor de conversión de carbono para lianas se puede determinar mediante análisis de laboratorio con un analizador de elementos (Capítulo 3). Si esto no fuese práctico, se ha reportado que la concentración de carbono (basada en el peso seco) de las lianas en el bosque de México es de ~46 % (Jaramillo *et al.* 2003). Por lo tanto, el valor predeterminado del factor de conversión de carbono aplicable a lianas es 0.46.

EJEMPLO

- Contenido de carbono de cada liana (kg C) = Biomasa de la liana (kg) * Factor de conversión del carbono (0.46).
- Carbono en el componente de lianas (kg C/m²) = (Contenido de carbono de la liana 1 + Contenido de carbono de la liana 2 + Liana n) / Área de la parcela (m²).

PALMERAS Y OTRA VEGETACIÓN NO ARBÓREA

La vegetación del sotobosque (por ejemplo, plántulas que no sean de mangles y herbáceas) es por lo general insignificante y no suele ser necesario medirla para determinar el tamaño de los sumideros de carbono del ecosistema (Snedaker & Lahmann 1988).

La excepción más notable es la palmera nipa (*Nypa fruticans*, **Fig. 4.9**) de la región de Asia y el Pacífico, donde en algunos lugares puede ser la especie dominante. Los enfoques para el muestreo de estos componentes de la vegetación dependerán de su densidad, estructura y distribución (Snedaker & Lahmann 1988). La biomasa de las palmeras nipa y la vegetación herbácea se puede determinar o bien mediante muestreo no destructivo o cosecha destructiva (que es la forma más común para la vegetación herbácea, como helechos, pastos marinos, pastos, juncos de las familias Cyperaceae y Juncaceae y herbáceas de hojas anchas). Los enfoques no destructivos son necesarios para parcelas que serán analizadas nuevamente a lo largo del tiempo, especialmente en especies perennes.

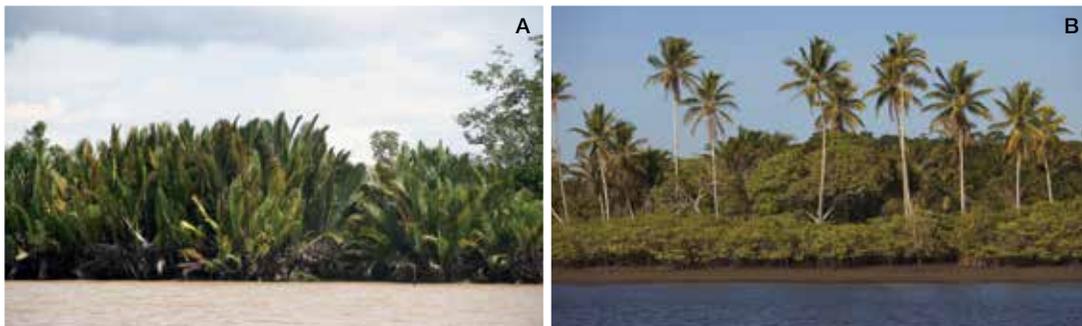


Figura 4.9 Ejemplos de palmeras de los manglares. (A) *Ejemplar pequeño de Nypa fruticans* (© Andreas Hutahaean, KKP). (B) Palmeras leñosas altas (© Enrico Marone, CI)

Para determinar la biomasa (kg), se deberán recolectar al menos entre 15 y 25 frondas de palmera de distintas plantas individuales que se encuentren fuera de cualquier parcela permanente de muestreo. Las muestras deberían cubrir la distribución de tamaño observada de las frondas individuales y cada fronda muestreada se corta a nivel del suelo. Obtenga la masa seca de cada fronda en el laboratorio y calcule el promedio. Cuento la cantidad total de frondas de nipa dentro de una parcela (o subparcela) de muestreo y luego multiplique ese número por el promedio de la masa seca.

Las palmeras con troncos leñosos se pueden medir de la misma manera que los árboles de hojas anchas. Los parámetros de la palmera que se deben medir (dap, altura, etc.) dependen de la ecuación alométrica que se utiliza para determinar la biomasa de la palmera. La variable que más se utiliza para determinar la biomasa de una palmera es la altura del tallo principal desde el suelo hasta la base de las hojas.

Determinación de la cantidad de carbono dentro del componente de las palmeras (kg C/m²):

El componente de carbono de las palmeras se determina multiplicando la biomasa (kg) (ya sea el promedio calculado a partir de las frondas recolectadas o por ecuaciones alométricas para palmeras leñosas más grandes) por un factor de conversión de carbono para especies de palmeras específicas de esa región.

Si la biomasa utilizada se determinó para toda la parcela aplicando el promedio de la biomasa de las frondas recolectadas multiplicado por todas las frondas de la parcela, entonces simplemente multiplique ese número por el factor de conversión de carbono para determinar el componente de carbono total de las palmeras en la parcela.

Si la biomasa utilizada se determinó para palmeras leñosas de mayor tamaño, deben sumarse todos los valores correspondientes al contenido de carbono de cada palmera en particular para determinar el contenido de carbono total de los árboles (kg C) para el tamaño de parcela en cuestión (m²).

El factor de conversión de carbono para las palmeras se puede determinar mediante análisis de laboratorio con un analizador de elementos (Capítulo 3) o a través de un factor de conversión de 0.47 (Kauffman *et al.* 1998).

EJEMPLO PARA PALMERAS PEQUEÑAS

- Carbono en el componente de las palmeras pequeñas (kg C/m²) = [Biomasa estimada de las frondas de palmera * Factor de conversión de carbono (0.47)] / Área de la parcela (m²).

EJEMPLO PARA PALMERAS LEÑOSAS DE GRAN TAMAÑO

- Contenido de carbono de cada palmera grande (kg C) = Biomasa de la palmera (kg) * Factor de conversión del carbono (0.47).
- Carbono en el componente de palmeras grandes (kg C/m²) = (Contenido de carbono del árbol 1 + Contenido de carbono del árbol 2 + Árbol n) / Área de la parcela (m²).

NEUMATÓFOROS

Los neumatóforos de las especies de mangles del género *Avicennia*, *Brugueira* y *Sonneratia* pueden tener una estructura y una biomasa importantes, y a diferencia de las raíces fúlcreas de *Rhizophora*, estas partes del árbol no se incluyen en las ecuaciones alométricas para el cálculo de la biomasa en árboles vivos (**Fig. 4.10**). La densidad de neumatóforos se puede determinar contando sus números en microparcels que se encuentren dentro o inmediatamente adyacentes a la parcela principal de muestreo.

El tamaño habitual de una microparcels es de 50 x 50 cm² pero puede oscilar desde 30 x 30 cm² a 1 x 1 m². Para determinar la biomasa (kg), los neumatóforos se deben recolectar por fuera de las parcelas permanentes de muestreo. Deben contarse todos los neumatóforos dentro de la parcela y recolectarse entre 50 y 100 muestras. Las muestras deberían cubrir la distribución de tamaño observada y se deben cortar a nivel del suelo. Obtenga la masa seca de cada neumatóforo en el laboratorio y calcule el promedio.

- Biomasa de los neumatóforos (kg) = Promedio de la masa seca de los neumatóforos muestreados * Número de neumatóforos en la microparcels.



Figura 4.10 Neumatóforos. (A) Medición de la altura de neumatóforos. (B) Los neumatóforos se pueden medir dentro de las microparcelas o en forma adyacente a ellas. Estas microparcelas pueden ser las mismas parcelas que se utilizan para tomar muestras de detritos (como se describe a continuación). (© Boone Kauffman, OSU)

Podría desarrollarse una ecuación alométrica utilizando la altura de los neumatóforos para predecir la biomasa, lo que sería de utilidad en parcelas permanentes. Si se desarrollara esta ecuación, deberá medirse la altura de cada neumatóforo en la microparcela. Esto sería de mayor relevancia para especies con grandes neumatóforos, tales como *Sonneratia alba*.

Determinación de la cantidad de carbono del componente de los neumatóforos (kg C/m²): El componente de carbono de los neumatóforos se determina multiplicando el promedio de la biomasa (kg), calculado a partir de los neumatóforos recolectados, por un factor de conversión de carbono para las especies específicas de esa región.

Dado que la biomasa utilizada se determinó para toda la microparcela aplicando el promedio de la biomasa de los neumatóforos recolectados multiplicado por todos los neumatóforos de la parcela, simplemente debe multiplicar ese número por el factor de conversión de carbono para determinar el componente de carbono total de los neumatóforos en la microparcela.

El factor de conversión de carbono para los neumatóforos se puede determinar mediante análisis de laboratorio con un analizador de elementos (Capítulo 3) o a través de un factor de conversión para raíces, generalmente de 0.39 (Kauffman & Donato 2011).

EJEMPLO

- Carbono en el componente de los neumatóforos (kg C/m²) = [Biomasa estimada de neumatóforos * Factor de conversión de carbono (0.39)] / Área de la parcela (m²).

DETRITOS

La capa de detritos se define como el material orgánico, no leñoso, muerto y recientemente caído en la superficie del suelo. Por lo general, está compuesta por hojas muertas, flores, frutos, semillas y fragmentos de corteza. En la mayor parte de los manglares, la cantidad de este material (por lo tanto, de la existencia de carbono) solo representa una parte muy pequeña del sumidero de carbono

debido a la alta eficiencia de los cangrejos consumidores de detritos y a que el material es exportado a través de las mareas y las inundaciones estacionales de los ríos.

En caso de que se midan, los detritos se muestrean en forma destructiva en la mayoría de los estudios de biomasa en pequeñas microparcelas, a menudo de un tamaño de 0.5 m x 0.5 m. Todo el material orgánico de la superficie, con excepción de partículas leñosas, se recolecta en una bolsa o recipiente resistente. Las bolsas se etiquetan con la ubicación, fecha, parcela y número de muestra (**Fig. 4.11**). Dada la presencia de agua en los manglares, la forma más eficiente de tomar muestras de detritos es en bolsas plásticas etiquetadas previamente con marcadores indelebles.



Figura 4.11 Bolsas de plástico, etiquetadas previamente, que contienen detritos (© Boone Kauffman, OSU)

Determinación de la cantidad de carbono dentro del componente de la hojarasca (kg C/m²):

Las muestras deben transportarse al laboratorio, colocarse en un horno de secado y secarse hasta llegar a la masa constante. Debido a las limitaciones que presenta cargar muestras voluminosas desde el campo y la disponibilidad limitada de espacio para secado en hornos, especialmente en ambientes rurales, recomendamos determinar el peso húmedo de toda la muestra y luego extraer una submuestra representativa bien mezclada para trasladar al laboratorio y secar hasta llegar al peso constante. Por último, determine la relación entre la masa húmeda y la masa seca de la submuestra registrando la masa húmeda de la muestra y relacionándola con la masa seca (constante) (Cummings *et al.* 2002).

- Biomasa de los detritos (kg) = [Masa seca de la submuestra (g) / Masa húmeda de la submuestra (g)] * Masa húmeda de todos los detritos en la misma parcela (kg).

La biomasa de los detritos (kg) puede estimarse entonces para el tamaño de la parcela en cuestión (m²). Se ha reportado que las concentraciones promedio de carbono en la masa seca de la hojarasca en bosques tropicales oscilan entre el 38 % y el 49 % (Kauffman *et al.* 1993; Kauffman *et al.* 1995). Por lo tanto, se recomienda un factor de conversión de carbono de alrededor de 0.45.

EJEMPLO

- Carbono en el componente de la hojarasca (kg C/m²) = [Biomasa promedio de los detritos * Factor de conversión de carbono (0.45)] / Área de la parcela (m²).

MADERA MUERTA Y CAÍDA

Hay muchas guías que describen métodos para determinar el volumen y la masa de la madera caída (Harmon & Sexton 1996; Waddell 2002). La madera muerta y caída puede ser un componente



Figura 4.12 Madera caída. (A) Madera caída después de una tormenta en Bangladesh. (B) Ejemplares de *Rhizophora* y *Sonneratia* arrancados de raíz después del tifón Sudal, Yap, Estados Federados de Micronesia. (© Boone Kauffman, OSU)

importante de la biomasa aérea, en especial después de perturbaciones naturales, tales como ciclones tropicales (**Fig. 4.12**). El uso de la tierra o el cambio en la cobertura de la tierra también puede hacer que aumente la cantidad de madera caída en el suelo del manglar. Para evaluar con exactitud los sumideros de carbono del ecosistema y las influencias de las perturbaciones naturales y antrópicas, la madera muerta y caída es una variable importante que se debe medir. La madera muerta por lo general se muestrea con un muestreo basado en parcelas o con el método de la intersección de líneas (Waddell 2002; Baker & Chao 2009). Se recomienda el método no destructivo de la intersección de líneas.

Técnica de la intersección de líneas (o planos) para muestrear madera caída: La técnica de la intersección de líneas (o planos) implica contar intersecciones de restos de madera a lo largo de un plano vertical de muestreo (transecto). Se debe establecer una serie de transectos en cada parcela de medición para medir este sumidero de carbono. Un transecto es una línea recta a través de toda la longitud de la parcela. Por ejemplo, se pueden establecer cuatro transectos en cada una de las seis parcelas para tener un total de 24 transectos por sitio.

Reglas importantes para medir madera caída:

- Los árboles muertos en pie no se miden con la técnica de la intersección de líneas.
- La madera caída debe haberse desprendido del árbol que la originó. Por lo tanto, no cuentan las ramas ni los tallos que aún forman parte de árboles o arbustos.
- La cinta del transecto debe intersectar el eje central de un fragmento de madera para que este cuente. Esto significa que si la cinta solo interseca una esquina en el extremo de un tronco, este no cuenta.
- Un fragmento puede registrarse varias veces si la cinta lo interseca más de una vez (por ejemplo, un fragmento curvado, o una rama y un tallo de un mismo árbol caído).

Se cuenta y se clasifica con esta técnica todo el material leñoso caído y muerto (troncos, ramas, raíces fúlcreas, o tallos de árboles y arbustos caídos o desprendidos) que se encuentre en el transecto o sobre él (dentro de los 2 m de la superficie del suelo). Los detritos leñosos se pueden categorizar según cuatro tamaños: fragmentos de madera finos, pequeños, medianos y grandes (**Tabla 4.5**). Estas clases de tamaños se utilizan habitualmente en los inventarios forestales, y existen herramientas de medición convenientes para simplificar el muestreo en el campo con base en estos límites (**Fig. 4.13**).

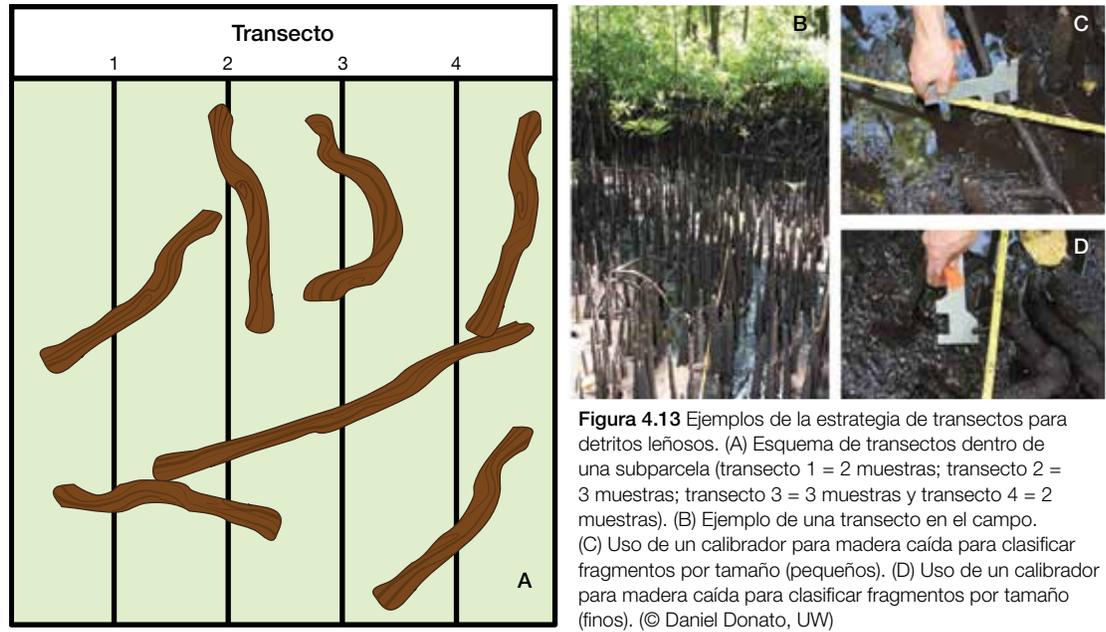


Tabla 4.5 Clases de tamaños de madera utilizados habitualmente.

DESCRIPCIÓN	DIÁMETRO
Fino	0 – 0.6 cm
Pequeño	0.6 – 2.5 cm
Mediano	2.5 – 7.6 cm
Grande	≥7.6 cm

La cantidad de fragmentos finos, pequeños y medianos que atraviesan el transecto se cuentan y calculan por separado para cada clase de tamaño. Los fragmentos más pequeños pueden ser muy abundantes y, para ahorrar tiempo, solo se muestrean a lo largo de las subsecciones de cada transecto (Fig. 4.14).

Para convertir lo contado para los tamaños más pequeños en biomasa, se debe estimar un promedio del diámetro de los fragmentos de madera en cada una de estas clases. El promedio del diámetro de los fragmentos de madera puede obtenerse de las mediciones de entre 50 a 100 fragmentos seleccionados al azar dentro de cada clase (finos, pequeños

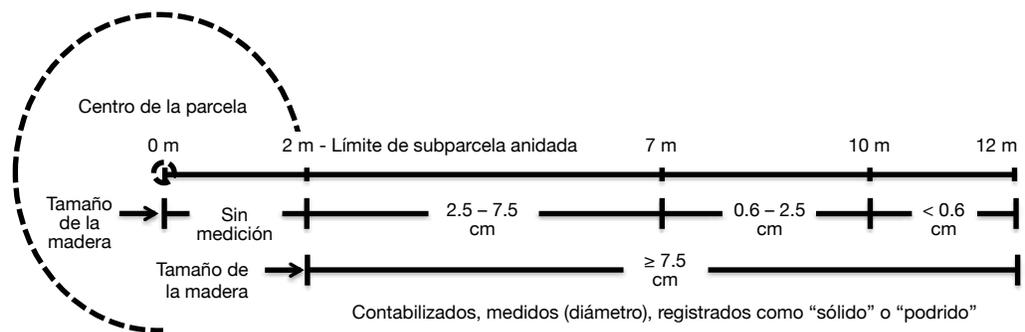


Figura 4.14 Ejemplo de un transecto para detritos de madera para el muestreo de madera caída en manglares con la técnica de la intersección de líneas. Se mide el diámetro de cada fragmento grande de madera a lo largo de todo el transecto. Los fragmentos de diámetro menor se cuentan, pero no se miden a lo largo de las longitudes establecidas del transecto.

y medios). Se recomienda utilizar un calibrador digital para medir el diámetro de cada fragmento. Recomendamos aplicar una ecuación de media cuadrática para calcular el diámetro promedio de los fragmentos de madera en lugar del promedio del diámetro de las clases de madera (Brown & Roussopoulos 1974). El diámetro cuadrático medio (Quadratic Mean Diameter, QMD) se calcula de la siguiente manera:

- Diámetro cuadrático medio (cm) = $\sqrt{(\sum \text{diámetro de cada fragmento de madera}^2) / \text{Número de fragmentos muestreados}}$.
- $QMD = \sqrt{(\sum D_i^2) / n}$.

En la **Tabla 4.6** se muestran ejemplos de diámetro cuadrático medio de madera caída en manglares.

En comparación con los fragmentos de madera más pequeños, se registra el diámetro de cada fragmento grande de madera a lo largo de todo el transecto (**Fig. 4.14**). Para cada fragmento grande que atraviese el transecto, registre el diámetro en el punto donde el transecto atraviesa el punto medio del fragmento de madera. Además, registre si el estado de descomposición es sólido (el machete rebota o se hunde solo levemente al golpear) o podrido (el machete se hunde profundamente y la madera se desgaja en gran medida).

En un sentido práctico, por lo general solo la fracción de madera mediana y grande (>2.5 cm diámetro) constituye un sumidero de carbono significativo (Kauffman & Cole 2010; Kauffman *et al.* 2011). Si se muestrea el componente de los detritos, es posible que sea más sencillo incluir los fragmentos de madera más pequeños (diámetro <2.5 cm) en la muestra de detritos y medir únicamente los fragmentos de madera medianos y grandes a lo largo del transecto.

Densidad de la madera: La densidad de los restos de madera se determina a partir del peso seco de la madera secada a 100 °C dividido por el volumen de la madera no secada. La densidad debe determinarse para cada categoría de madera muestreada (fragmentos finos, pequeños, medianos, grandes y sólidos, grandes y podridos) para determinar la biomasa. Recomendamos recolectar al menos entre 20 y 25 fragmentos de madera para cada especie y clase de tamaño, para capturar un rango representativo de tamaños dentro de cada clase y toda la diversidad de especies presentes en la muestra. A modo general, cada fragmento de madera recolectado para determinar la densidad de la madera debería tener una masa entre ~0.5 g y 50 g. Recolecte fragmentos al azar para determinar la densidad de la madera dentro del área del proyecto. Para evitar perturbaciones innecesarias, no recolecte fragmentos de las parcelas permanentes de muestreo. Consulte el comienzo de este capítulo para ver un análisis de los cálculos de la densidad de la madera. En la siguiente tabla se muestran ejemplos de densidad de madera para madera caída en manglares.

Tabla 4.6 Densidad de la madera y diámetro medio de las clases estándar de tamaño de madera caída en manglares dominados por *Rhizophora apiculata*, *Sonneratia alba* y *Bruguiera gymnorrhiza*. Los datos se obtuvieron de madera caída después de un tifón sin descomposición. na = no aplicable. (Modificado de Kauffman y Cole, 2010).

CLASE DE TAMAÑO (DIÁM. EN cm)	DENSIDAD ±EE (g/cm³)	TAMAÑO DE LA MUESTRA	DIÁMETRO (cm)	DIÁMETRO CUADRÁTICO MEDIO (cm)	TAMAÑO DE LA MUESTRA
<0.64	0.48 ± 0.01	117	0.43 ± 0.15	0.43	50
0.65 – 2.4	0.64 ± 0.02	31	1.33 ± 0.78	1.47	48
2.54 – 7.6	0.71 ± 0.01	69	4.30 ± 0.18	4.52	52
>7.6	0.69 ± 0.02	61	na	na	na

El volumen de la madera caída se calcula entonces a partir de los datos de la intersección de líneas mediante ecuaciones de escala.

- Volumendemaderaparalascasclasesdetamaño fino, pequeño y mediano por unidad de superficie (m^3/ha) = $\{\pi^2 * [\text{Número de muestras} * \text{Diámetro cuadrático medio de la clase de tamaño (cm)}^2 / [8 * \text{Longitud del transecto (m)}]]\}$.
 - Volumen (m^3/ha) = $\pi^2 * [N_i * QMD_i^2 / (8 * L)]$.
- Volumen de fragmentos grandes de madera caída (diámetro >7.6 cm) por unidad de superficie (m^3/ha) = $\pi^2 * \{\sum \text{diámetro de cada fragmento de madera}^2 / [8 * \text{Longitud del transecto (m)}]\}$.
 - Volumen (m^3/ha) = $\pi^2 * [d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots + d_n^2 / (8 * L)]$.
 - Cada fragmento se mide por separado

La biomasa de madera caída (kg/ha) se calcula como el volumen multiplicado por la densidad promedio de la madera.

- Biomasa de la madera caída (kg/ha) = Volumen (m^3/ha) * Densidad promedio de la madera (kg/m^3).

Determinación de la cantidad de carbono dentro del componente de la madera caída (kg C/ha): Por último, se convierte la biomasa de la madera caída a masa de carbono. El valor aceptable predeterminado con base en el contenido de carbono de la madera muerta en bosques tropicales es del 50 %, lo que corresponde a un factor de conversión de carbono de 0.50.

EJEMPLO

- Contenido de carbono de la madera muerta caída por parcela ($kg C/ha$) = Biomasa de la madera muerta (kg/ha) * Factor de conversión de carbono (0.5).

BIOMASA ARBÓREA SUBTERRÁNEA

La biomasa subterránea (por ejemplo, raíces y la base de los tallos) es un componente importante en los manglares. La relación entre la biomasa aérea y subterránea en manglares es por lo general entre 2.0 y 3.0, mientras que en bosques de tierras altas la relación es más alta, entre 3.96 y 4.52. Por lo tanto, en manglares, una gran parte de la biomasa tiende a encontrarse en forma subterránea (Komiyama *et al.* 2008). Dada la extrema dificultad para recolectar y medir sistemas radiculares, en la mayoría de los proyectos en manglares no se contempla la cosecha destructiva, ni la medición de la biomasa subterránea, ni se desarrollan ecuaciones alométricas. Existen muy pocas ecuaciones alométricas para la biomasa subterránea de bosques, y los manglares están entre los bosques menos estudiados en este sentido. Contar con estudios adicionales sería una valiosa contribución a la ciencia. Se hizo una revisión de ecuaciones útiles disponibles para la biomasa subterránea en manglares en Komiyama *et al.* (2008). La ecuación general reportada por Komiyama *et al.* (2008) es la siguiente:

- Biomasa arbórea subterránea ($kg C$) = $0.199 * [\text{Densidad de la madera (g/cm}^3\text{)}^{0.899}] * [\text{Diámetro del árbol a la altura del pecho (cm)}]^{2.22}$

El contenido de carbono de las raíces por lo general es menor que el de los componentes aéreos del árbol. Jaramillo *et al.* (2003) reportaron que el contenido de carbono de las raíces en bosques tropicales oscila entre el 36 % y el 42 %. Un valor predeterminado defendible para el contenido de carbono de las raíces sería del 39 % (mediana), por lo que el factor de conversión de carbono es 0.39.

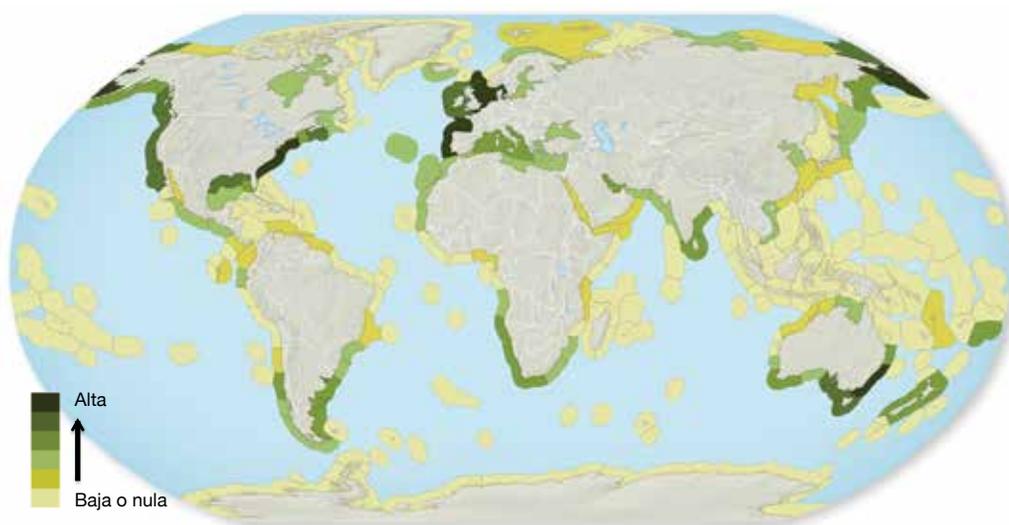
EJEMPLO

- Contenido de carbono subterráneo de cada árbol (kg C) = Biomasa subterránea del árbol (kg C) * Factor de conversión de carbono (0.39).
- Contenido de carbono subterráneo por parcela (kg C/m²) = (Contenido de carbono subterráneo del árbol 1 + Contenido de carbono subterráneo del árbol 2 + Árbol n) / Área de la parcela (m²).

MARISMAS

Para de este manual, las marismas se definen como ecosistemas costeros en la zona costera intermareal alta entre la tierra y las aguas oceánicas abiertas, que se inundan regularmente y están cubiertos de vegetación (sin incluir los árboles). Las marismas no incluyen los manglares ni tampoco los bosques de agua dulce o salobre (por ejemplo, de roble de los pantanos, melaleuca, pantanos de ciprés o sauces) ni salares sin vegetación. Las plantas halófilas que habitan marismas costeras no son exclusivamente marinas ni intermareales, lo que las distingue de la vegetación de los manglares y los pastos marinos, y están dominadas por plantas herbáceas que incluyen pastos y juncos de las familias Cyperaceae y Juncaceae. También puede haber plantas de sal y arbustos. La diversidad de formas de vida es importante en el momento de calcular las existencias de carbono porque cada una tiene una biomasa diferente.

Las marismas se forman sobre costas con sustratos blandos en la zona de mareas en estuarios y ensenadas, y en algunas costas abiertas con poca acción de las olas (**Fig. 4.15**). En una escala global, las marismas se forman en costas inapropiadas para el desarrollo de manglares, o en las que el desarrollo es limitado (Kangas & Lugo 1990). Por esta razón, estos sistemas son más comunes en zonas templadas, subárticas y árticas (Long & Mason 1983; Mitsch & Gosselink 2007). En las regiones tropicales, las marismas pueden reemplazarse en ambientes intermareales o bien por manglares en climas húmedos o por salinas en climas áridos.



TNC: Datos a partir de mapas de conservación y datos de SIG

Figura 4.15 Abundancia de marismas por ecorregión marina (Hoekstra *et al.* 2010)

La distribución de la vegetación en las marismas varía a través de la marisma y con la elevación de esta debido a diferencias en la tolerancia a la salinidad del suelo, los niveles de oxígeno, los niveles de sulfuro, el hidroperiodo, etc. (Partridge & Wilson 1987). A lo largo de la costa atlántica de América

del Norte, las marismas se dividen a menudo en distintas zonas, en función de las variaciones de las especies vegetales y la elevación relativa de la superficie del suelo respecto de las mareas (Niering & Warren 1980) (**Fig. 4.16**). La zona baja de la marisma se encuentra en la elevación más baja y se inunda más frecuentemente a causa de las mareas. La zona media/alta de la marisma se inunda con menos frecuencia, y la zona más alta de la marisma se inunda incluso con menos frecuencia. Las marismas salobres se ubican por lo general a lo largo de los bordes de la marisma tierra adentro donde el aporte de agua dulce genera un ambiente salobre.

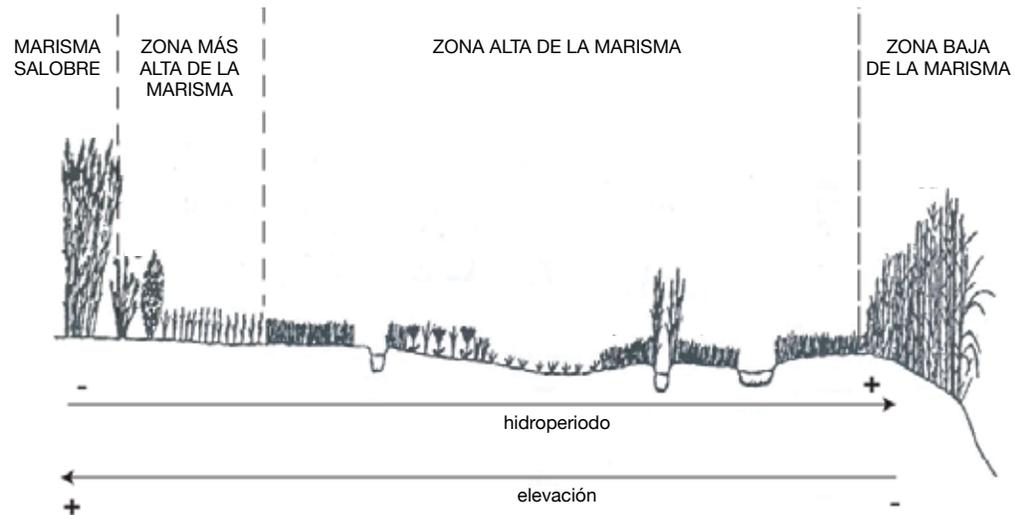


Figura 4.16 Zonificación de la vegetación de marismas en sistemas en los que predominan herbáceas, noreste de América del Norte (modificado de Niering & Warren 1980)

Las diversas zonas de la marisma pueden presentar diferencias florísticas y estructurales que influyen en la biomasa aérea y subterránea de la vegetación viva. Además, las propiedades geoquímicas, incluso la disponibilidad de nutrientes y las condiciones redox, pueden influir en la retención del carbono en el suelo.

Las marismas ofrecen una gama de servicios ecosistémicos, entre ellos la producción y exportación de materia orgánica, el ciclo de nutrientes, la protección contra tormentas y el secuestro de carbono (Nixon 1980; Dame *et al.* 1991; Mitsch & Gosselink 2000; Chmura *et al.* 2003). En el ámbito global, las marismas han sufrido un largo historial de conversión a tierras no afectadas por las mareas (“reclamadas al mar”), por lo general mediante muros de contención o diques que impiden que las mareas inunden los ecosistemas. Otras causas directas y antrópicas de la degradación de las marismas costeras incluye su transformación en estanques de evaporación para la extracción de sal, estanques de acuicultura (cría de camarones) (Barg *et al.* 1997) y la alteración del drenaje de la marisma para el control de insectos (Daiber 1982). El control del drenaje también se implementa para proteger tierras bajas, lo que da lugar a cambios en la composición vegetal del ecosistema de la marisma.

A pesar de se ha realizado ninguna evaluación global de la disminución de las marismas, estudios regionales sugieren que su extensión ha disminuido significativamente durante el último siglo. La pérdida de humedales en el delta del Misisipi en los EE. UU. se estimó en alrededor de 100 km²/año (Viles & Spencer 1995) a causa del desvío de agua y sedimentos en la cuenca y el delta del río (Gosselink & Maltby 1990). Se estima en un 50 % la pérdida total de las marismas en América del Norte desde la llegada de los europeos (Gedan *et al.* 2009). En el sudeste de Australia, la superficie de las marismas disminuyó entre un 30 % y un 40 % desde 1950, principalmente a causa del reemplazo de las marismas por manglares (Saintilan & Williams 1999). El 50 % de las marismas de China se perdieron

a partir de la década de 1950 a causa de tierras reclamadas al mar (An *et al.* 2007). Estas pérdidas tienen importantes consecuencias para la retención de carbono en el sistema (DeLaune & White 2012).

Las marismas secuestran y almacenan carbono con eficiencia en la biomasa vegetal y los suelos. Los sumideros subterráneos forman, por lo general, entre el 65 % y el 95 % de la existencia de carbono total del ecosistema en las marismas (Elsley-Quirk *et al.* 2011) y dominan el secuestro de carbono, en particular en las zonas bajas y medias de dichas marismas. La biomasa aérea cobra más importancia como componente del sumidero de carbono total en la zona alta de la marisma. Por lo tanto, es importante poder diferenciar entre las zonas alta, media y baja de la marisma al crear una estrategia de muestreo.

Consideraciones para el muestreo en el campo

La vegetación en las marismas variará dependiendo de la estación, así como también de la humedad del suelo, los nutrientes y las condiciones de salinidad que correspondan a las variaciones en las inundaciones a causa de las mareas. Las técnicas adecuadas de muestreo toman en cuenta estos factores y subdividen las áreas de interés en estratos de características ecológicas (relativamente) homogéneas, y el muestreo se realiza cuando la biomasa está en su pico de crecimiento (por lo general a fines del verano). El muestreo también puede verse limitado a períodos de bajamares de tan solo 3 a 4 horas. Este pequeño margen de tiempo requiere de un plan de muestreo eficiente.

Los estratos de características ecológicas (relativamente) homogéneas dentro de las marismas se presentan, por lo general, paralelos a la orilla o al canal de marea. Debido a la estructura innata de las marismas, los estratos se formarán habitualmente en sentido perpendicular al canal de marea o a la orilla. Deben colocarse suficientes parcelas de muestreo en cada estrato para caracterizar la biomasa dentro de este. Las parcelas dentro de cada estrato deben ser de aproximadamente 20 m x 50 m. Dentro de estas parcelas, se distribuyen como mínimo 5 o 6 subparcelas más pequeñas (0.25 m x 0.25 m) al azar (Fig. 4.17 y Capítulo 2 para más información sobre planificación del proyecto y diseño del muestreo).

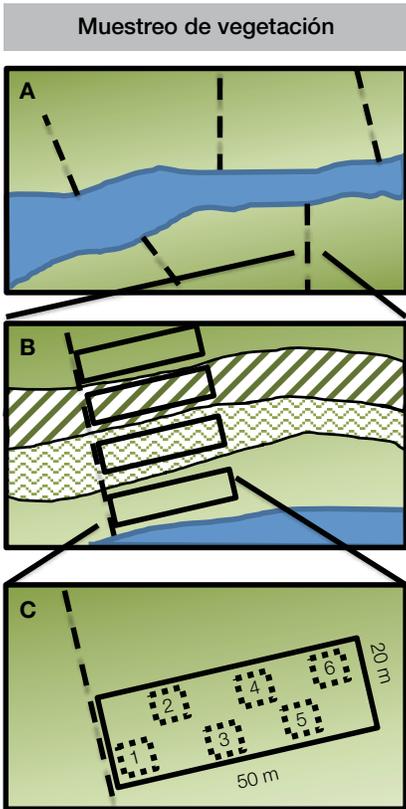


Figura 4.17 Ubicación recomendada de las parcelas de muestreo en marismas. (A) Los transectos deberán ser perpendiculares a los canales principales de la marisma que atraviesan la vegetación u otros gradientes estructurales. (B) Las parcelas a lo largo de los transectos deberán estar dentro de los estratos. (C) Deberán muestrearse cuadrantes suficientes (mínimo cinco) en cada parcela para caracterizar la biomasa

La biomasa aérea de las marismas puede variar significativamente entre estaciones, en especial en climas frescos, templados y subárticos donde toda la biomasa aérea de las marismas puede desaparecer durante el invierno (Darby & Turner 2008a). Otros factores son los niveles elevados de nutrientes que pueden reducir la proporción de la biomasa asignada a las raíces (Darby & Turner 2008b), el nivel de salinidad que puede aumentar la proporción entre la raíz y el tallo (Parrondo *et al.* 1978), la presión generada por el pastoreo (Giroux & Bédard 1987) y el nivel freático (Saunders *et al.* 2006). Recomendamos que las estimaciones de biomasa aérea y subterránea en marismas se realicen cuando la biomasa esté probablemente en su punto máximo, por lo general entre mediados y fines del verano. Cuando se trabaje con parcelas permanentes o mediciones reiteradas, es importante muestrear durante la misma estación todas las veces para que se puedan comparar los resultados.

Estimaciones de biomasa

Esta sección brinda orientación sobre cómo medir la biomasa aérea en una diversidad de tipos de marismas que es probable encontrar en el campo. Se requiere introducir algunas diferencias en los procedimientos de muestreo para tener en cuenta las diferencias en las formas de crecimiento.

PASTOS, JUNCOS DE LA FAMILIA CYPERACEAE Y OTRAS PLANTAS HERBÁCEAS

Las cañas y juncos de las familias Cyperaceae y Juncaceae son plantas que crecen densamente, presentan tallos altos y rectos, y son el tipo de vegetación principal de las marismas. El método habitualmente utilizado para estimar su biomasa aérea utiliza un cuadrante para definir áreas de muestreo dentro de las parcelas. Los cuadrantes para este ecosistema son por lo general de 30 cm x 30 cm, aunque debería utilizarse un cuadrante más grande en caso de que sea probable que se cuenten menos de 10 individuos en el área de 30 cm x 30 cm. Dentro de cada cuadrante, cuente el número de tallos por especie (por lo general, las marismas contienen grandes parches de una única especie dominante, pero no siempre) y mida la altura total de cada especie presente en el cuadrante. Si el tallo presenta señales de senescencia (material muerto) en la punta, mida la altura de la parte verde (Fig. 4.18).

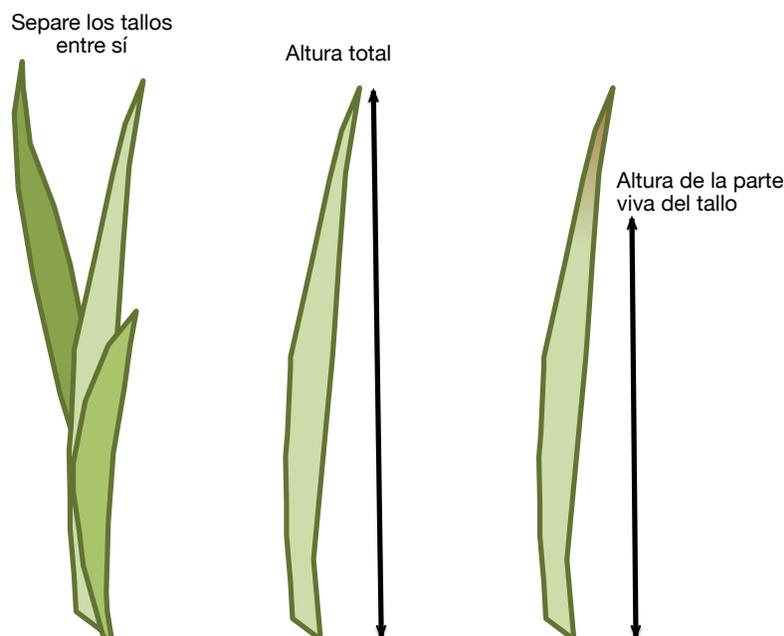


Figura 4.18 Medición de la altura y el ancho del tallo

Desarrollar ecuaciones alométricas específicas a la especie y la ubicación que se investiga es la forma más precisa de estimar el componente de carbono en los pastos. Para hacer esto, corte al menos 50 tallos a través del rango de alturas observables para cada especie. Mida la altura de la porción verde de cada tallo por separado.

En el laboratorio, determine la biomasa vegetal secando los tallos en el horno hasta llegar al peso constante (aproximadamente 72 horas a 60 °C, pero el tiempo variará en función del tamaño del tallo). Para cada especie, grafique los resultados en un gráfico de dispersión que represente la biomasa vegetal (eje y) contra la altura de la parte verde del tallo (eje x) (**Fig. 4.19**). Desarrolle una ecuación alométrica (con análisis de regresión) que represente la relación entre la biomasa vegetal y la altura del tallo. Aplique esta ecuación a la altura promedio de las plantas muestreadas en el cuadrante para obtener la estimación de la masa total por especie dentro del área de 30 cm x 30 cm.

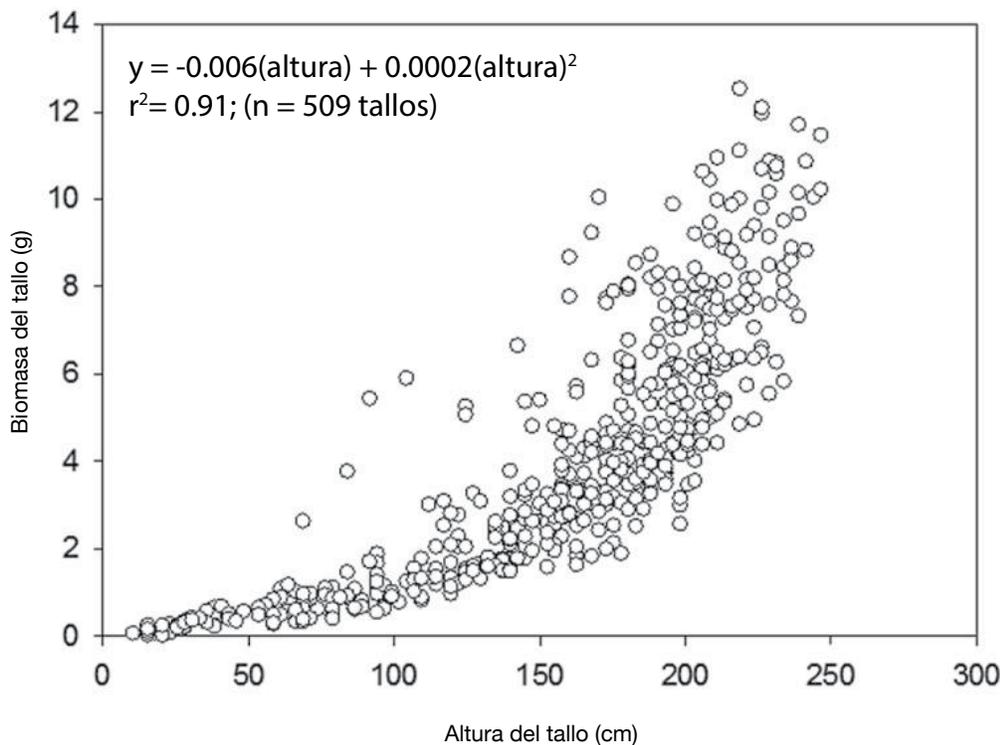


Figura 4.19 Ecuaciones alométricas entre la biomasa y la altura de los tallos (Craft 2013)

Determinación del sumidero de carbono en pastos de marismas (kg C/m²): El componente de carbono de los pastos se determina multiplicando la biomasa (kg) de cada especie (determinada por una ecuación alométrica) por el factor de conversión de carbono para la especie de pasto en particular. Esto se repite para cada tallo del cuadrante. Luego se suman todos los valores correspondientes al contenido de carbono de cada tallo para determinar el contenido de carbono total del pasto (kg C) para el tamaño de cuadrante en cuestión (m²).

El factor de conversión de carbono para los pastos puede o bien determinarse mediante análisis de laboratorio con un analizador de elementos (Capítulo 3) o puede aplicarse un factor de conversión de 0.45 (Fang *et al.* 1996).

EJEMPLO

- Carbono en componente de los pastos (kg C/m²) = [Biomasa estimada del pasto (kg) * Factor de conversión de carbono (0.45)] / Área del cuadrante (m²).

ARBUSTOS

La presencia de arbustos varía por lo general en función de la ubicación de las marismas. En el hemisferio norte, los arbustos componen solo una pequeña parte de las marismas y suelen ser del género *Atriplex*, *Borricha* e *Iva* (Pennings & Moore 2001), mientras que en el hemisferio sur, en especial en las latitudes altas, pueden dominar arbustos del género *Tecticornia* (Saintilan *et al.* 2009). El enfoque recomendado para estimar la biomasa aérea de arbustos en marismas es similar al protocolo para manglares arbustivos (ver la sección anterior sobre manglares arbustivos). Actualmente, existen muy pocas ecuaciones alométricas para arbustos de marismas. Por lo tanto, deberán desarrollarse ecuaciones sobre la base de indicadores como el diámetro del tallo a 30 cm por encima de la superficie del suelo y el volumen o área de la copa o la cubierta proyectada.

El diámetro, ancho, volumen y área de la copa, al igual que el diámetro del tallo principal a 30 cm por encima del suelo deben medirse para cada arbusto en el área de la parcela. Para medir adecuadamente el contenido de carbono, deben muestrearse en forma completa al menos entre 15 y 25 arbustos de cada especie, incluyendo el rango de tamaños presentes y que se encuentren fuera de las parcelas permanentes que se hubieran establecido. En el laboratorio, cada arbusto se seca y se pesa para obtener la biomasa. Las mediciones dasométricas (diámetro, área y volumen de la copa, diámetro del tallo principal a 30 cm) pueden luego aplicarse como variables independientes para predecir la masa aérea de las plantas por análisis de regresión (Fig. 4.20). Una vez establecidas las ecuaciones alométricas, pueden aplicarse a cada arbusto dentro de una parcela de muestreo.

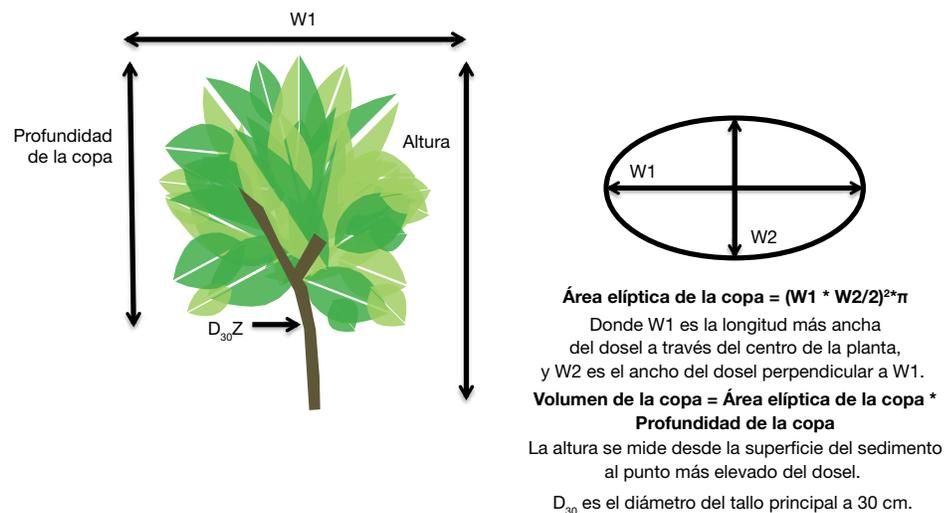


Figura 4.20 Técnicas de medición en campo para calcular el área elíptica y la profundidad de la copa, la altura y el diámetro a 30 cm de altura (D_{30}) en arbustos (adaptado de Kauffman y Donato 2012). La biomasa aérea se predice mejor a través de ecuaciones alométricas en las que la biomasa aérea es la variable dependiente, y el área de la copa, y la altura y/o el volumen de la copa son las variables independientes (Ross *et al.* 2001)

Determinación del sumidero de carbono en marismas arbustivas (kg C/m²): El componente de carbono de un arbusto se determina multiplicando la biomasa (kg), calculada con una ecuación alométrica, por el factor de conversión de carbono para arbustos específicos de esa región. Esto se realiza para cada arbusto muestreado. Luego se suman todos los valores correspondientes al contenido de carbono de cada arbusto en particular para determinar el contenido de carbono total de los arbustos (kg C) para el tamaño de parcela en cuestión (m²).

El factor de conversión de carbono para los arbustos se puede determinar mediante análisis de laboratorio con un analizador de elementos (Capítulo 3) o resulta justificable el uso del factor de conversión reportado para mangles arbustivos (0.46 a 0.5).

EJEMPLO

- Contenido de carbono de cada arbusto (kg C) = Biomasa del arbusto (kg) * Factor de conversión del carbono (0.46–0.5)
- Carbono en el componente de los arbustos (kg C/m²) = (Contenido de carbono del arbusto 1 + Contenido de carbono del arbusto 2 + Arbusto n) / Área de la parcela (m²).

BIOMASA SUBTERRÁNEA

La biomasa subterránea de raíces y rizomas puede contener entre el 50 % y el 95 % de la biomasa vegetal total de las marismas (Valiela *et al.* 1976; Eisey-Quirk *et al.* 2011). La biomasa subterránea puede estimarse mediante ecuaciones alométricas que relacionan la biomasa subterránea con la biomasa aérea conocida, o puede determinarse sitio por sitio mediante mediciones directas.

Existen pocas ecuaciones alométricas para estimar la biomasa subterránea con base en la biomasa aérea, y las que lo hacen se basan en estudios realizados en América del Norte (Valiela *et al.* 1976; Giroux & Bédard 1988; Darby & Turner 2008a). Recomendamos utilizar las ecuaciones de la **Tabla 4.7** para estimar la biomasa subterránea total para el tamaño de parcela en cuestión. Estas ecuaciones dieron resultados con distintos niveles de éxito en la predicción de la biomasa de *Spartina alterniflora* en diversos sitios. Se requiere más trabajo para derivar ecuaciones alométricas de la biomasa subterránea en otras especies y para diversos entornos climáticos y geomórficos.

Tabla 4.7 Ecuaciones para predecir la biomasa subterránea de raíces y rizomas con base en la biomasa aérea de *Spartina alterniflora* (Gross *et al.* 1991)

ECUACIÓN	COMPONENTES AÉREOS INCLUIDOS (PARA UNA PARCELA ENTERA)	r ²
$\ln(\text{Biomasa subterránea viva, g}) = 0.718 * \ln(\text{Biomasa aérea viva, g}) + 2.646$	Hojas y tallos vivos	0.86
$\ln(\text{Biomasa subterránea viva, g}) = 0.700 * \ln(\text{Biomasa aérea viva, g}) + 3.051$	Solo hojas vivas	0.85
$\ln(\text{Biomasa subterránea viva, g}) = 0.713 * \ln(\text{Biomasa aérea viva, g}) + 2.235$	Toda la biomasa aérea viva y muerta	0.86

El muestreo directo será el método más preciso para determinar la biomasa subterránea. Para hacer esto, se recolectan muestras mediante la extracción de un núcleo (ver el Capítulo 3 para más información). En la mayoría de los estudios se han tomado núcleos a relativamente poca profundidad para estimar la biomasa de raíces subterráneas. No obstante, recomendamos muestrear a 1 m de profundidad porque esta medición tiene relación con las técnicas establecidas para el muestreo de suelos presentadas en el Capítulo 3, y hay pruebas de que las especies de las marismas pueden aprovechar agua dulce a esta profundidad (Arp *et al.* 1993). Los protocolos recomiendan el uso de núcleos de 10 cm de diámetro y extraer segmentos de 2.5 cm de ancho a 2.5, 5; 7.5, 12.5, 15, 22.5 y 25 cm de profundidad, y luego extraer segmentos de 5 cm de ancho a profundidades de 35, 45, 55 y 65 cm (Saunders *et al.* 2006). Recomendamos agregar 75 y 95 cm. Los segmentos se lavan sobre un tamiz de 1 mm y se separan visualmente en raíces, rizomas y detritus. El material vivo y muerto se separa en función del color y de la textura (Saunders *et al.* 2006). Las raíces y rizomas vivos se secan luego en el horno a 60 °C hasta llegar al peso seco constante. La biomasa subterránea se determina de la siguiente manera:

- Biomasa subterránea para cada segmento de muestra (g) = Masa seca de la muestra (g) / Masa húmeda de la muestra (g).
- Biomasa subterránea para cada área de muestra (todo el núcleo, g/cm²) = (Biomasa del segmento 1 + Biomasa del segmento 2 + Biomasa del segmento n) / Área muestreada (en función del diámetro del núcleo, cm²).
- Biomasa subterránea promedio (g/cm²) = (Biomasa de la muestra 1 + Biomasa de la muestra 2 + Biomasa de la muestra n) / n.

Determinación del carbono dentro de la biomasa subterránea (kg/m²): El componente de carbono subterráneo se determina multiplicando la biomasa (kg) (ya sea a partir de núcleos o por ecuaciones alométricas) por un factor de conversión de carbono para especies de pastos específicas de esa región.

Si la biomasa utilizada se determinó para toda la parcela con ecuaciones alométricas, simplemente multiplique ese número por el factor de conversión de carbono para determinar el componente de carbono subterráneo total en su parcela.

Si la biomasa utilizada se determinó mediante la toma de muestras de núcleos, el promedio de la biomasa subterránea para el área de muestreo se multiplica por el factor de conversión de carbono y luego se calcula a la escala del tamaño de la parcela.

El factor de conversión de carbono para la biomasa subterránea de pastos en marismas se puede determinar mediante análisis de laboratorio con un analizador de elementos (Capítulo 3) o a través del factor de conversión de 0.34 de la biomasa subterránea de pastos marinos (Duarte 1990).

EJEMPLO (BIOMASA DETERMINADA POR ECUACIONES ALOMÉTRICAS)

- Carbono en el componente subterráneo (kg C/m²) = [Biomasa estimada del componente subterráneo (kg) * Factor de conversión de carbono (0.34)] / Área de la parcela (m²).

EJEMPLO (BIOMASA DETERMINADA POR MUESTREO)

- Componente de carbono subterráneo = Promedio de la biomasa subterránea (g/cm²) * Factor de conversión de carbono (0.34).
- Dado que estos números representan el componente de carbono subterráneo dentro del área de muestreo, puede simplemente ponerlos a la escala del tamaño de la parcela.

DETRITOS

La hojarasca se define como el material orgánico muerto, no leñoso y recientemente caído en la superficie del suelo. Puede incluir vegetación de marismas, pasto marino o restos de algas marinas. En la mayoría de las marismas, la biomasa de este componente es relativamente pequeña debido a la rápida descomposición y a la remoción por herbívoros o la marea.

Los detritos se muestrean en forma destructiva en la mayoría de los estudios (para más información, ver la sección anterior sobre detritos en manglares). Todos los detritos que sean fáciles de extraer de la superficie se recolectan en un cuadrante (por ejemplo, 50 cm x 50 cm) y se llevan al laboratorio en una bolsa o recipiente sólidos. Una vez allí, la muestra, o una muestra representativa de esta, se seca hasta alcanzar el peso constante para determinar la biomasa (kg) y se convierte a carbono mediante la estimación de un factor de conversión de carbono de 0.45.

EJEMPLO

- Carbono en el componente de la hojarasca (kg C/m^2) = $[\text{Biomasa promedio de los detritos} * \text{Factor de conversión de carbono (0.45)}] / \text{Área de la parcela (m}^2\text{)}$.



Figura 4.21 Hojarasca en una marisma (© Neil Saintilan, OEH, Nueva Gales del Sur)

MADERA MUERTA Y CAÍDA

La madera muerta y caída no suele ser un componente de importancia de la biomasa aérea de las marismas, pero puede incorporarse a la existencia de carbono de estas marismas como material alóctono. Cuando esto sucede en una parcela, la madera muerta debería muestrearse mediante la técnica de la intersección de líneas. La biomasa de madera muerta y caída (kg/ha) se calcula como el volumen multiplicado por la densidad promedio de la madera. Por último, se convierte la biomasa de la madera caída a masa de carbono. El valor aceptable predeterminado con base en el contenido de carbono (% del peso) de la madera muerta en bosques tropicales es del 50 %, lo que corresponde a un factor de conversión de carbono de 0.50. Consulte la sección anterior para ver los métodos para medir madera muerta y caída en manglares.

PASTOS MARINOS

El pasto marino es un ecosistema marino costero con predominio de plantas con flor y está completamente sumergido en áreas intermareales. Existen alrededor de 60 especies de pasto marino en cuatro familias (**Fig. 4.22**) y, por lo general, se limitan a zonas con sedimentos no consolidados con alta disponibilidad de luz. A diferencia de los manglares que, por lo general, se encuentran restringidos a los trópicos y subtrópicos, y las marismas, más estándar en climas templados, el pasto marino se distribuye en todo el mundo y está presente en todos los continentes con excepción de la Antártida (Green & Short 2003). Las praderas de pastos marinos son valiosas como hábitat de muchas especies de importancia económica y ecológica al igual que por sus altas tasas de producción primaria, por el fortalecimiento de pesquerías, el ciclo de nutrientes, la estabilización de sedimentos, la atenuación de

marejadas (Orth *et al.* 2006) y por su importancia en el ciclo del carbono (Duarte *et al.* 2005; Duarte *et al.* 2010; Kennedy *et al.* 2010; Fourqurean *et al.* 2012a).

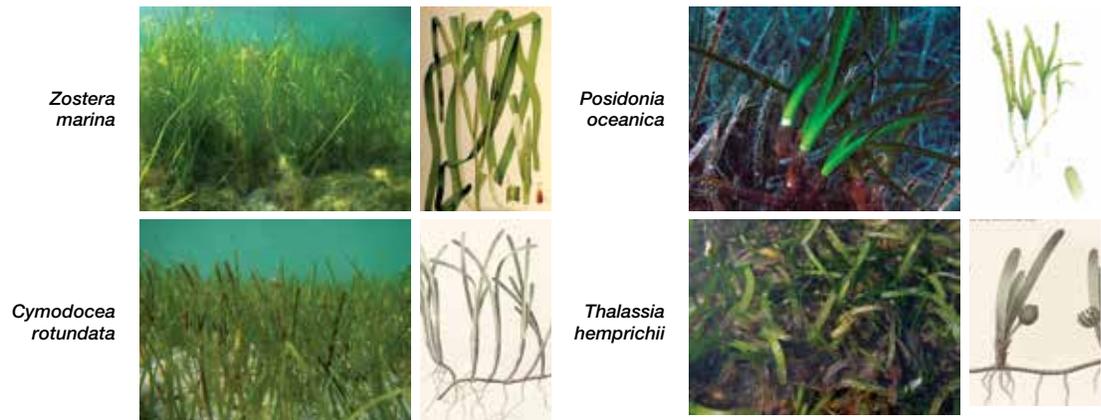


Figura 4.22 Ejemplos de especies comunes de pastos marinos (© Peter Macreadie, UTS y wikicommons)

Al reducir la presión que generan las olas y las corrientes en los suelos, los pastos marinos disminuyen la cantidad de sedimentos resuspendidos y mejoran la captura de partículas en suspensión (Hendriks *et al.* 2008). No solo capturan y almacenan el carbono orgánico producido por las plantas y otras fuentes dentro de las praderas de pastos marinos, sino que además atrapan y entierran carbono originado en otros sitios (carbono alóctono). Por lo general, el 50 % del carbono de los sedimentos en las praderas de pastos marinos es alóctono (Kennedy *et al.* 2010). No toda la producción neta dentro de las praderas de pastos marinos se conservan. Parte del carbono derivado del ecosistema de pastos marinos se exporta a otros ecosistemas costeros y marinos donde es consumido o enterrado (Heck Jr *et al.* 2008).

Las praderas de pastos marinos también se encuentran entre los ecosistemas más amenazados del mundo. La tasa de pérdida de hábitats conocidos de pastos marinos se incrementó desde una mediana de 0.9 % por año antes de 1940 a 7 % por año desde 1990 (Waycott *et al.* 2009). En el ámbito global, las principales razones de la pérdida de pastos marinos son la degradación de la calidad del agua (por ejemplo, eutrofización) y las operaciones de dragado y relleno.

Los suelos debajo de los pastos marinos contienen más carbono orgánico que los ecosistemas de bosques terrestres (Fourqurean *et al.* 2012a). Por lo tanto, el impacto potencial de la pérdida de ecosistemas de pastos marinos para el presupuesto global de CO₂ es significativo. De hecho, la cantidad de carbono orgánico almacenado en las praderas de pastos marinos es aproximadamente igual a la cantidad total de carbono orgánico almacenado en todas las marismas y los manglares del mundo combinados (Chmura *et al.* 2003; Donato *et al.* 2011). Estas estimaciones hacen que los pastos marinos sean un punto caliente o “hotspot” en el ámbito global para el almacenamiento de carbono.

No hay datos suficientes disponibles para comentar categóricamente sobre los patrones regionales de almacenamiento de carbono en ecosistemas de pastos marinos, pero los datos disponibles actualmente se sintetizan por región en la **Tabla 4.8**.

Tabla 4.8 Existencias de carbono para una gama de lechos de pastos marinos (Fourqurean *et al.* 2012b).

REGIÓN	BIOMASA VIVA DE PASTOS MARINOS (MgC/ha)		CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (MgC/ha)	
	n	Promedio ± 95 % IC	n	Promedio ± 95 % IC
Pacífico noreste	5	0.97 ± 1.02	1	64.4
Pacífico sudeste	0	SD	0	SD
Atlántico norte	50	0.85 ± 0.19	24	48.7 ± 14.5
Atlántico occidental tropical	44	0.84 ± 0.17	13	150.9 ± 26.3
Mediterráneo	57	7.29 ± 1.52	29	372.4 ± 56.8
Atlántico Sur	5	1.06 ± 0.51	5	137.0 ± 56.8
Indopacífico	47	0.61 ± 0.26	8	23.6 ± 8.3
Pacífico Occidental	0	SD	0	SD
Sur de Australia	40	2.32 ± 0.63	9	268.3 ± 101.7

*SD = sin datos

Consideraciones para el muestreo en el campo

La biomasa de los pastos marinos varía estacionalmente, en especial en climas templados y boreales. En algunos sitios, la vegetación aérea formada por pastos marinos puede desaparecer durante el invierno. Por lo tanto, recomendamos medir la biomasa cuando las existencias en pie estén en su punto máximo y repetir el muestreo en los años siguientes en la misma época del año. Los pastos marinos pueden estar sumergidos o ser intermareales. El muestreo de pastos marinos intermareales se puede hacer durante la bajamar (tan solo 3 a 4 horas), pero el muestreo de pastos marinos sumergidos por debajo de la marea se debe hacer con esnórquel o equipo de buceo. Los pastos marinos son plantas herbáceas relativamente pequeñas. Por lo tanto, son adecuadas las parcelas pequeñas (0.25–1 m²) para obtener estimaciones adecuadas de las existencias de carbono. Los lechos de pastos marinos varían en estructura a lo largo del gradiente de profundidad debido a la energía hidrodinámica, la disminución de la irradiancia y otros gradientes ambientales tales como la salinidad, que pueden afectar la composición de las especies y su capacidad para capturar carbono (Serrano *et al.*, 2014). Por lo tanto, la estratificación del área de estudio se alinea habitualmente según la profundidad. Por ejemplo, los estratos pueden basarse en intervalos de profundidades conocidas para obtener una representación confiable de la variación de la biomasa con la profundidad del agua. Para cada intervalo de profundidad, determine la biomasa midiéndola en puntos aleatorios (Capítulo 2) (Short & Coles 2001).

Estimaciones de biomasa y contenido de carbono

Esta sección brinda orientación sobre cómo medir la biomasa aérea en una diversidad de tipos de vegetación que es probable encontrar en el campo. Se requiere introducir algunas diferencias en los procedimientos de muestreo para tener en cuenta las diferencias en las formas de crecimiento.

BIOMASA VIVA

En la mayoría de los sistemas de pastos marinos, el componente vivo de la biomasa aérea y subterránea se puede recolectar insertando un tubo nucleador de gran diámetro (de 10 cm a 25 cm de diámetro) en el sedimento a través del material aéreo de la planta, con cuidado de no cortar las hojas, hasta llegar a la parte del suelo donde predomina la parte superior de las raíces (también denominada rizósfera, por

lo general a 40 cm de profundidad). Luego se puede tapar y extraer el tubo (**Fig. 4.23**). Estos núcleos se colocan en tamices o en bolsas de redcilla, se lavan para extraer los sedimentos y se separan en componentes vivos aéreos y subterráneos (**Fig. 4.24**).

La separación del material formado por raíces y rizomas vivos de las estructuras muertas suele ser ambigua. Algunos de los tejidos vivos subterráneos son evidentes, ya que son habitualmente de



Figura 4.23 Obtención de muestras y núcleos de biomasa en praderas de pastos marinos en Ceara, Brasil (© Krishna Barros, UFC)



Figura 4.24 Biomasa aérea y subterránea de *Ruppia maritima* (© Margareth Copertino, FURG)

color claro y turgentes, pero puede ser difícil determinar si las estructuras más viejas de color oscuro están vivas o muertas. A menudo, se requiere de conocimiento del área y experiencia para garantizar que sea coherente la separación del material vivo del muerto. Para la mayoría de las especies de pastos marinos, la porción aérea de las plantas está formada íntegramente por hojas verdes, fáciles de diferenciar de los tejidos subterráneos que no son de color verde. Tenga en cuenta que, en muchos lugares, estas hojas verdes albergan una importante carga de epífitas que se deben extraer y analizar por separado (ver la próxima sección).

Determinación de la cantidad de carbono dentro del componente de la vegetación viva (kg C/m²): En el laboratorio, determine la biomasa vegetal secando la biomasa viva en el horno hasta alcanzar el peso constante (aproximadamente 72 horas a 60 °C). El componente vegetal vivo se determina multiplicando la biomasa (kg) de una muestra de material vegetal para un área determinada (m²) por un factor de conversión de carbono. El contenido de carbono luego se pone a escala para determinar el sumidero de carbono para el tamaño de la parcela en cuestión. Para determinar el contenido de carbono, las muestras se pueden analizar indirectamente mediante la determinación de la materia orgánica por la técnica de pérdida por ignición (Loss on Ignition, LOI) y el uso de una ecuación alométrica para estimar el carbono orgánico, o directamente con un analizador de elementos (previa extracción o contabilización del carbono inorgánico según los métodos presentados en el Capítulo 3). Si esto no fuese práctico, se puede utilizar un valor de 0.34 (Duarte 1990).

EJEMPLO

- Carbono en el componente de la biomasa viva (kg C/m²) = [Biomasa estimada de la planta * Factor de conversión de carbono (0.34)] / Área de la parcela (m²).

BIOMASA DE EPÍFITAS

Las epífitas adheridas a los pastos marinos son organismos que crecen en las láminas de los pastos, entre los que se incluyen algas, diatomeas y otros organismos incrustantes (**Fig. 4.25**). Si bien las epífitas son, por lo general, un componente ínfimo del carbono orgánico en un ecosistema de pastos marinos, es una práctica habitual extraer las epífitas de las láminas de los pastos y analizarlas como un sumidero de carbono aparte. Deben llevarse registros cuidadosos de si las epífitas se separaron del material foliar o no para que sea posible hacer comparaciones entre sitios.

Existen dos técnicas principales para extraer epífitas de las hojas de los pastos marinos: raspar a mano y lavar con ácido (**Fig. 4.26**). Ninguno de los métodos es perfecto. Raspar epífitas bien adheridas puede dar como resultado que las epífitas no se remuevan del todo o puede desgastar la superficie de las hojas y contaminar el componente de epífitas con material del pasto marino. Lavar el pasto

marino con ácido remueve eficientemente epífitas con carbonato, pero las epífitas carnosas pueden aún requerir de raspado, y el ácido puede hacer que se pierdan por lixiviación componentes orgánicos solubles tanto de los tejidos del pasto marino como de las epífitas. Si el objetivo es cuantificar el sumidero de las epífitas, recomendamos el método del raspado.



Figura 4.25 Epífitas. (A) Ejemplo de algas coralinas. (B) Ejemplo de algas filamentosas. (© Justin Campbell, Instituto Smithsonian)

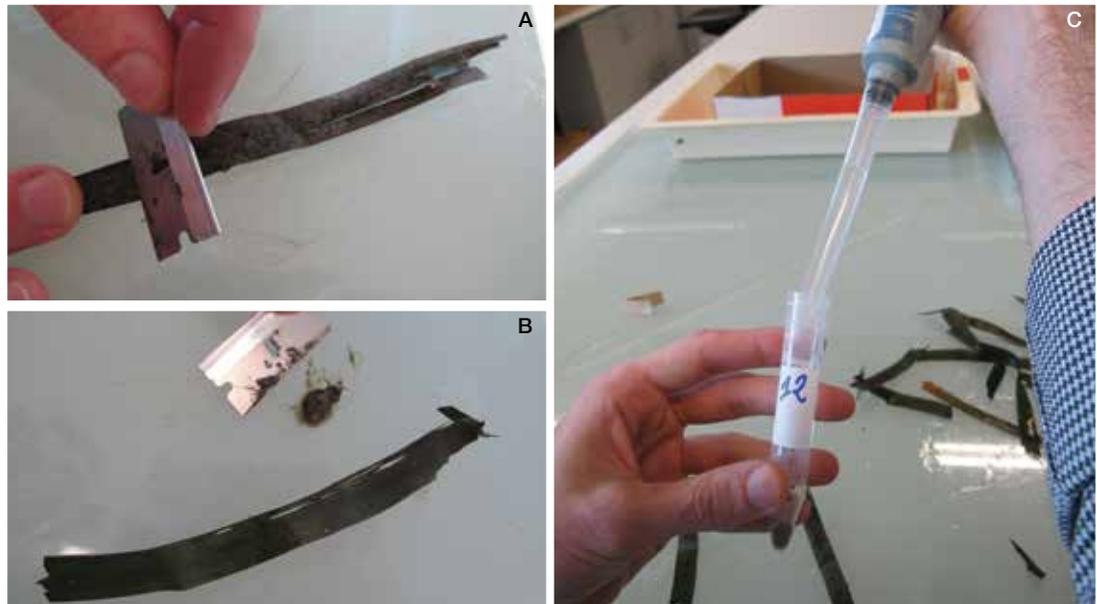


Figura 4.26 Extracción y procesamiento de epífitas. (A) Extracción de epífitas de ambas caras de una hoja de pasto marino con una cuchilla. (B) Epífitas (algas) y una muestra limpia de pasto marino. (C) Epífitas secas durante el lavado con ácido. (© Óscar Serrano, ECU)

Determinación de la cantidad de carbono dentro del componente de las epífitas (kg C/m^2):

La extracción de las epífitas se realiza en el laboratorio. Por lo tanto, si utiliza un sistema de parcelas permanentes, las muestras deben obtenerse de un área de tamaño conocido fuera de la parcela. Algunas clases de epífitas contienen altos niveles de carbonato de calcio, por lo que se debe determinar la cantidad de carbono inorgánico en ese componente. Los procedimientos son similares a los descritos para suelos con altos niveles de carbonato tal como se detallaron en el Capítulo 3 y se explican brevemente a continuación.

- 1) Las epífitas se extraen de ambas caras de la hoja raspando con una cuchilla de borde recto (**Fig. 4.26**).
- 2) Las epífitas se secan a $60\text{ }^\circ\text{C}$ hasta alcanzar el peso constante.
- 3) Una vez secas, homogenice la muestra y determine su peso.
- 4) El contenido de carbono inorgánico se determina por uno de dos métodos:
 - a. Acidificación:
 - Remojar la muestra en 1N HCl durante aproximadamente 18 horas. Luego lavar la muestra tres veces en agua destilada. Secar hasta llegar al peso constante y analizar el contenido de carbono con un analizador de elementos o una prueba de LOI.
 - Tenga en cuenta que la acidificación puede hacer que se pierda materia orgánica por lixiviación.
 - b. Analizador de elementos:
 - Determinar el contenido de carbono total de una submuestra seca con un analizador de elementos. Obtener cenizas de otra submuestra a $500\text{ }^\circ\text{C}$ y pesar las cenizas resultantes. Determinar el contenido de carbono inorgánico con un analizador de elementos y restar el contenido inorgánico del contenido de carbono total.

Anote siempre las masas de las muestras en todas las etapas del procedimiento para poder calcular el porcentaje de carbono orgánico e inorgánico. El contenido de carbono se corrige en función de la pérdida de carbono inorgánico para obtener un factor de conversión de carbono. La biomasa de la muestra de epífitas se multiplica por el factor de conversión de carbono corregido y luego se promedia con todas las muestras para determinar el tamaño del sumidero de carbono para el tamaño de la parcela en cuestión (m^2).

DETRITOS

Los detritos en las praderas de pastos marinos están formados generalmente por hojas muertas, rizomas, frutos y algas. En la mayoría de estos ambientes, la cantidad de detritos (y, por ende, el tamaño de la existencia de carbono) solo representa una parte muy pequeña del sumidero de carbono debido a la alta eficiencia de remineralización de las hojas, así como también a la exportación a través de la energía hidrodinámica.

En caso de que se midan, los detritos se muestrean en forma destructiva en microparcelas (por ejemplo, de un tamaño de 0.5 m x 0.5 m). Todo el material orgánico de la superficie se recolecta en una bolsa o recipiente. Las bolsas se etiquetan con la ubicación, la fecha, la parcela y el número de muestra.

Las muestras deben transportarse al laboratorio y secarse hasta que alcancen una masa constante (72 horas a 60 °C). Debido a las limitaciones que presenta cargar muestras voluminosas y la disponibilidad a menudo limitada de espacio para secado en el horno, especialmente en ambientes rurales, recomendamos medir el peso húmedo de toda la muestra y luego extraer una submuestra representativa bien mezclada para trasladar al laboratorio, y determinar la relación entre la masa húmeda y seca de la submuestra para poner a escala la biomasa de toda la muestra.

EJEMPLO

- Biomasa de los detritos (kg) = [Masa seca de la submuestra (g) / Masa húmeda de la submuestra (g)] * Masa húmeda de todos los detritos en la misma parcela (kg).

El contenido de carbono en la biomasa de los detritos (kg) se puede estimar entonces para el tamaño de la parcela en cuestión (m²). El factor de conversión para la biomasa viva (0.34) también se puede utilizar para estimar el promedio del contenido de carbono de la masa seca de los detritos del pasto marino.

EJEMPLO

- Carbono en el componente formado por los detritos (kg C/m²) = [Biomasa promedio de los detritos * Factor de conversión de carbono (0.34)] / Área de la parcela (m²).

EXISTENCIA DE CARBONO TOTAL

La existencia de carbono total en la vegetación dentro del área de un proyecto se determina sumando el contenido de carbono de cada componente vegetal (árboles, detritos, pastos, arbustos, etc.) en un área determinada. La existencia de carbono total en el área de un proyecto se puede determinar de la siguiente manera:

Paso 1: Determinar el contenido de carbono de cada componente para el tamaño de la parcela en cuestión (ver arriba).

Paso 2: Convertir el contenido de carbono de cada componente para el tamaño de la parcela en cuestión a unidades que se utilizan habitualmente para la evaluación de las existencias de carbono (MgC/ha) con los siguientes factores de conversión de unidades (1000 kg por Mg y 10 000 m² por ha):

$$\text{Componente vegetal del sumidero de carbono (MgC/ha)} = \text{Contenido de carbono (kg C/m}^2\text{)} * (\text{Mg}/1000 \text{ kg}) * (10\ 000 \text{ m}^2/\text{ha}).$$

REPETIR PARA CADA TIPO DE VEGETACIÓN ANALIZADA

Paso 3: Sumar todos los componentes vegetales presentes dentro de una misma parcela.

Carbono vegetal total dentro de una parcela (MgC/ha) = Componente 1 (MgC/ha) + Componente 2 (MgC/ha) + Componente 3 (MgC/ha) + ...

REPETIR PARA TODAS LAS PARCELAS

Paso 4: Determinar la cantidad promedio de carbono vegetal en una parcela y calcular la desviación estándar asociada para establecer la variabilidad o el error.

Promedio de carbono vegetal en una parcela = Carbono vegetal total en la parcela 1 (MgC/ha) + Carbono vegetal total en la parcela 2 (MgC/ha) + Carbono vegetal total en la parcela 3 (MgC/ha) + ... n) / n.

La desviación estándar (σ) determina qué tanto se aproximan los datos al promedio y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Desviación estándar } (\sigma) = \left[\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{(N-1)} \right]^{1/2}$$

- \bar{X} = Promedio del carbono vegetal en una parcela.
- X_1 = Resultado específico para la parcela 1, en MgC/ha; X_2 = Resultado específico para la parcela 2, en MgC/ha, etc.
- N = Cantidad de parcelas.

Paso 5: Obtener la cantidad total de carbono del ecosistema.

Estimación del carbono vegetal en un estrato (MgC) = Promedio del carbono vegetal en una parcela (MgC/ha) * Área del estrato (ha).

Sumar los valores de MgC de cada estrato para determinar la existencia de carbono total del suelo.

Carbono total en el área del proyecto (MgC) = Estimación del carbono vegetal en el estrato 1 (MgC) + Estimación del carbono vegetal en el estrato 2 (MgC) + Estimación del carbono vegetal en el estrato 3 (MgC) + ...

Paso 6: Para reportar el valor de la variabilidad o el error asociados a estas mediciones, calcule la incertidumbre total en los datos. Primero, calcule la desviación estándar del promedio de MgC para cada estrato. [Multiplique el valor de la desviación estándar del carbono (MgC/ha) de cada núcleo determinado en el paso 5 anterior por el área de cada estrato (en hectáreas)]. Luego propague la incertidumbre a través de los cálculos combinando las desviaciones estándar del promedio de MgC para cada estrato de la siguiente manera:

$$(\sigma_T) = \sqrt{(\sigma_A)^2 + (\sigma_B)^2 + \dots + (\sigma_N)^2}$$

- Donde σ_T = Variabilidad total asociada a las mediciones.
- σ_A = Desviación estándar del promedio de MgC del núcleo para el estrato A * Área del estrato.
- σ_B = Desviación estándar del promedio de MgC del núcleo para el estrato B * Área del estrato.
- σ_N = Desviación estándar del promedio de MgC del núcleo para los demás estratos * Área de cada estrato por separado.

Este enfoque puede aplicarse al sumar valores promedio, como se hace al combinar los datos de los estratos por separado.

Paso 7: La existencia final de carbono vegetal se presentará como un valor promedio \pm la incertidumbre total. Como alternativa, se puede obtener una existencia de carbono mínima y máxima al multiplicar el área del proyecto por las densidades de carbono mínimas y máximas.

Carbono orgánico total en un área de proyecto (calculado en el paso 5) \pm la desviación estándar (calculada en el paso 6).

GUÍA RÁPIDA

Paso 1: Diseño de parcelas

- La accesibilidad y la seguridad son las principales prioridades al elegir el área de las parcelas.
 - Recordar que es posible que cada sitio sea accesible solo durante unas horas.
- Estratificar el sitio de estudio.
- Decidir si las parcelas de muestreo serán permanentes o temporales.
 - Las parcelas permanentes se utilizan cuando el mismo sitio será evaluado en el futuro para determinar los cambios.
 - Las parcelas temporales se utilizan cuando el muestreo se realizará solo una vez o cuando no sea posible utilizar parcelas permanentes.

Paso 2: Medir los componentes vegetales (componentes aéreos y subterráneos tanto vivos como muertos)

- Determinar qué componentes son relevantes para el sitio de estudio y la escala del área de muestreo necesaria para cada uno.
 - Manglares.
 - Árboles vivos.
 - Mangles arbustivos.
 - Árboles muertos en pie.
 - Lianas.
 - Palmeras.
 - Neumatóforos.
 - Hojarasca.
 - Madera muerta y caída.
 - Biomasa arbórea subterránea (si existe una ecuación alométrica).
 - Marismas.
 - Arbustos.
 - Pastos y juncos.
 - Hojarasca.
 - Madera muerta y caída.
 - Praderas de pastos marinos.
 - Plantas vivas.
 - Epífitas.
 - Hojarasca.
- Determinar la biomasa por análisis de laboratorio o por ecuaciones alométricas.
- Determinar el contenido de carbono de un tamaño de parcela conocido.

Paso 3: Calcular la existencia total de carbono vegetal.

- Sumar los valores correspondientes a los sumideros de carbono de los componentes que correspondan para cada parcela.
- Determinar el promedio y la desviación estándar para las parcelas dentro de un estrato y multiplicar por el área del estrato. Repetir para cada estrato.
- Determinar la existencia de carbono vegetal total para el área del proyecto sumando las reservas de carbono dentro de cada estrato y calculando el error.
- Debe incluir la variabilidad asociada a las mediciones y a la profundidad total del suelo analizada cuando presente los resultados.

