



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



Solutions for environment and development  
Soluciones para el ambiente y desarrollo

## Programa regional de Cambio Climático

# Manual centroamericano para la medición de carbono azul en manglares

**Miguel Cifuentes Jara**

**Christian Brenes**

**Patricia Leandro**

**Oscar Molina**

**Tania E. Romero**

**Danilo Torres Gómez**

**Sergio Velásquez Mazariegos**



En coordinación con



Serie técnica.  
Informe técnico no. 141

# **Manual centroamericano para la medición de carbono azul en manglares**

**Miguel Cifuentes Jara**

**Christian Brenes**

**Patricia Leandro**

**Oscar Molina**

**Tania E. Romero**

**Danilo Torres Gómez**

**Sergio Velásquez Mazariegos**

© Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 2018

ISBN 978-9977-57-679-4

363.738.74

A693 Manual centroamericano para la medición de carbono azul en manglares /  
Cifuentes Jara, Miguel...[et al.]. – Turrialba, C.R : CATIE. Programa de Bosques,  
Biodiversidad y Cambio Climático, 2018.  
92 p. : il. – (Serie técnica. Manual técnico / CATIE ; no.141)

ISBN 978-9977-57-679-4

Handle <http://hdl.handle.net/11554/8719>

1. Manglares – Estimación de las existencias de carbono – América Central  
2. Manglares – Estimación de las existencias de carbono – República Dominicana 3. Manglares –  
Estimación de las existencias de carbono – Ecuaciones alométricas I. Cifuentes Jara, Miguel  
II. Brenes, Christian III. Leandro, Patricia IV. Molina, Oscar V. Romero, Tania E.  
VI. Torres Gómez, Danilo VII. Velásquez Mazariegos, Sergio. VIII. CATIE IX. Título  
X. Serie.

#### Forma sugerida para citar este documento:

Cifuentes - Jara, M.; Brenes, C.; Leandro, P.; Molina, O.; Romero, T.E.; Torres, D.; Velásquez, S. 2018. Manual centroamericano para la medición de carbono azul en manglares. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 92 p. (Serie técnica. Informe técnico, no.#141).

#### Revisores

Marcello Hernández y Eric Manzane

## Créditos

Esta publicación ha sido posible gracias al apoyo de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) bajo los términos del Acuerdo Cooperativo No. AID 596-A-13-00002 (Programa de Cambio Climático Regional de USAID), ejecutado por el CATIE con apoyo de IUCN, CARE Internacional y TerraGlobal Capital, LLC. Los contenidos y opiniones expresadas aquí no son responsabilidad del Programa Regional de Cambio Climático y no reflejan necesariamente las opiniones de USAID o del Gobierno de los Estados Unidos.

CATIE no asume la responsabilidad por las opiniones y afirmaciones expresadas por los autores. Las ideas de los autores no reflejan necesariamente el punto de vista de la institución. Se autoriza la reproducción parcial o total de la información contenida en este documento, siempre y cuando se cite la fuente.

Reconocemos el invaluable rol y la visión del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN) al fomentar el desarrollo y la validación de la metodología descrita en este documento y en facilitar los procesos para trabajar de forma prioritaria en el Bajo Lempa, específicamente en la bahía de Jiquilisco y en el estero de Jaltepeque.

Reconocemos también la labor del proyecto "Protección de sumideros y reservas de carbono en los manglares y áreas protegidas de Panamá", que se implementa a través del PNUD como parte de la Iniciativa Internacional para el Clima, como parte de la validación de la metodología desarrollada en El Salvador. El Ministerio Federal para el Ambiente, la Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear apoya dicha iniciativa con base en una decisión adoptada por el parlamento alemán.

A través del apoyo financiero de Conservación Internacional, esta metodología también fue utilizada para la medición de las existencias de carbono a nivel de ecosistema en los manglares, camaroneras y salineras ubicados alrededor del Golfo de Nicoya, Costa Rica, y la estimación de la dinámica histórica (1956-2014) de la cobertura del suelo y las emisiones de carbono asociadas a esos cambios.

# CONTENIDO

Índice de figuras .....	5
Índice de cuadros .....	8
Acrónimos y siglas.....	9
Introducción - La necesidad de cuantificar el carbono azul en Centroamérica y República Dominicana .....	11
Diseño del inventario y selección de los sitios de muestreo .....	14
Consideraciones generales para el muestreo de carbono azul .....	14
Delimitación de las áreas de estudio.....	20
Estudio de caso: Selección de sitios para la medición de carbono en manglares de Panamá.....	21
Métodos para la medición de los componentes de carbono azul en manglares.....	25
Transectos de medición y unidades muestrales .....	26
Biomasa de árboles.....	27
Mediciones en manglares enanos o “chaparros” .....	29
Hojarasca .....	30
Herbáceas y regeneración .....	30
Madera caída.....	32
Suelos.....	33
Manejo de las muestras .....	35
Particularidades del trabajo de campo en manglares .....	37
Influencia de la marea .....	37
Seguridad en el trabajo de campo.....	38
Recomendaciones para optimizar el trabajo de campo .....	40
Previo al trabajo de campo.....	40
Trabajo de campo.....	40
Posterior al trabajo de campo .....	41
Trabajo de laboratorio .....	42
Análisis de la densidad aparente.....	42
Análisis de C y N total .....	42
Preparación de las muestras de suelos y sedimentos .....	43
Tratamiento de muestras que contienen carbonatos .....	44
Preparación de las muestras de material vegetal .....	45
Método de combustión total .....	46
Control de calidad para los análisis.....	47
Cálculo de las existencias de biomasa y carbono.....	49
Biomasa de árboles.....	49
Biomasa de raíces.....	52
Biomasa en manglares enanos (“chaparros”).....	52
Efecto de la selección de los modelos alométricos sobre la biomasa .....	53



Biomasa de herbáceas, regeneración y hojarasca .....	54
Biomasa de madera caída.....	54
Carbono en el suelo .....	55
Carbono y CO <sub>2</sub> para el ecosistema y paisaje .....	57
Manejo de bases de datos .....	57
Uso de herramientas satelitales .....	60
Delimitación de áreas y reconocimiento inicial.....	60
Adquisición de información geoespacial .....	60
Preprocesamiento de los datos .....	61
Clasificación de la cobertura de mangle y coberturas aledañas .....	63
Postproceso de las imágenes clasificadas.....	66
Evaluación de la clasificación de las imágenes .....	66
Análisis de cambios de cobertura.....	66
Cálculos de los flujos históricos de emisiones .....	68
Anexos.....	71
Anexo 1. Lista sugerida de equipo y materiales necesarios para realizar inventarios de las existencias de carbono a nivel de ecosistema en manglares .....	71
Anexo 2. Ejercicio para ilustrar el manejo de datos y cálculos de carbono para inventarios de carbono azul en manglares .....	73
Descripción de la base de datos .....	73
Procedimiento.....	73
Notas finales.....	78
Apéndice - Ruta para incorporar las bases científicas del carbono azul en los marcos políticos e institucionales .....	79
Ámbito político-institucional .....	79
Ámbito técnico .....	80
Ámbito financiero.....	80
Ámbito social .....	81
Vinculación con la Estrategia Nacional REDD+ y los inventarios nacionales de GEI .....	81
Bibliografía.....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Depósitos elegibles para la medición de carbono en ecosistemas naturales (basado en IPCC 2003).....	15
Figura 2.	Las fotografías aéreas obtenidas mediante sobrevuelos con avioneta o con drones facilitan el conocimiento de los patrones de cobertura/uso del suelo en las áreas marino-costeras y permiten inferir las rutas de conversión de los manglares hacia otros usos de la tierra. ....	20
Figura 3.	Retícula de trabajo de 500 x 500 m colocada sobre la retícula de 3 x 3 km del inventario forestal nacional de Panamá para un área con cobertura de manglares de la costa de San Félix, Provincia de Chiriquí, Panamá. ....	22
Figura 4.	Zona buffer (amortiguamiento) de 175 m de ancho (en verde claro) a partir de los bordes de cuerpos de agua colocada sobre las áreas de manglares (en color morado) de la costa de San Félix, Provincia de Chiriquí, Panamá. ....	23
Figura 5.	Distribución de puntos de muestreo de manglares en la costa de San Félix, Provincia de Chiriquí, Panamá, ubicados aleatoriamente y con una distancia mínima de 1 km entre sí.....	24
Figura 6.	Esquema de la distribución de las parcelas de medición establecidas a lo largo de un transecto de 150 m y utilizadas para cuantificar las existencias de carbono en manglares. Tomado de Kauffman <i>et al.</i> (2014). ....	25
Figura 7.	Demostración del establecimiento de un transecto para la medición de carbono en manglares con una cinta métrica para mantener la dirección del transecto y ubicar las parcelas de medición cada 25 m. Fotografía: Miguel Cifuentes.....	26
Figura 8.	Diseño de las parcelas anidadas y transectos de intersección utilizados para medir biomasa y carbono en bosques de manglar. Adaptado de Kauffman y Donato (2012). ....	27
Figura 9.	Escala visual para determinar el grado de descomposición de los árboles de mangle en pie. De izquierda a derecha se muestra un árbol intacto, y con 97,5%, 80% y 50% de la biomasa original. Tomado de Kauffman <i>et al.</i> (2013). ....	28
Figura 10.	Métodos alternativos para cuantificar el carbono en bosques de manglar enano (“chaparro”), donde las densidades de los individuos son altas. Se pueden utilizar solo parcelas circulares de 2 m de radio (ejemplo de la parcela circular en la extrema izquierda de la figura) o, si la densidad de los individuos así lo amerita, usar semicírculos del mismo radio como parcelas y alternarlos de lado y lado del transecto de medición (ejemplificado con las dos parcelas semi-circulares de la derecha). Se mantiene la distancia entre parcelas (25 m). ....	29
Figura 11.	Variables dasométricas relevantes para el cálculo de la biomasa de árboles en manglares enanos (“chaparros”): profundidad de la copa, altura, diámetro del fuste o tallo medido a 30 cm sobre el suelo ( $d_{30}$ ) y diámetros ( $W_1$ y $W_2$ ) de la copa. Adaptado de Kauffman <i>et al.</i> (2013). ....	30

Figura 12.	Para cuantificar la biomasa del material herbáceo se utilizan marcos de medición contruidos de material resistente (por ejemplo, PVC) de 1 x 1 m para delimitar el área dentro de la cual se cosecha por completo el material vegetal para determinar su peso fresco total. Fotografía: Miguel Cifuentes.....	31
Figura 13.	Ejemplo de los segmentos utilizados para estimar visualmente la cobertura de herbáceas o regeneración en una parcela circular de 7 m de radio para cuantificar la biomasa de manglares. El área en azul representa el área de cada segmento con cobertura de herbáceas en una parcela.31	
Figura 14.	Representación simplificada de un plano de intersección (de 12 m de longitud y 2 m de altura) utilizado para medir piezas de madera caída en bosques de manglar. Para optimizar el trabajo de campo, las piezas de diferente tamaño se miden en segmentos diferentes del transecto principal. Adaptado de Kauffman <i>et al.</i> (2013).....	33
Figura 15.	Las muestras de suelo de manglar se separan en intervalos de 0-15, 1-30, 30-50, 50-100, 100-200 y > 200 cm de profundidad (marcadas de forma indicativa en la fotografía con líneas amarillas). Para extraer las muestras a > 100 cm de profundidad se requiere de barras de extensión que se acoplan al barreno. Se debe asegurar que la superficie del suelo donde se extrae la muestra esté inalterada. Fotografía: Miguel Cifuentes. ....	34
Figura 16.	Extracción en campo de un volumen conocido de suelo de manglar (izquierda) para el análisis posterior de densidad aparente en el laboratorio. Fotografías: Miguel Cifuentes. ....	34
Figura 17.	Almacenamiento y rotulación correctos en el campo de una muestra de suelo de manglar destinada para el análisis de densidad aparente (“dap”). Los códigos corresponden al número de sitio (S), transecto (T) parcela (P), tipo de muestra y el intervalo de profundidad del perfil de suelo al que corresponde (30-50). Nótese la etiqueta de respaldo, escrita con tinta indeleble sobre papel impermeable que se incluye en caso de que la rotulación original se pierda. Fotografía: Miguel Cifuentes.....	35
Figura 18.	El ciclo diario de las mareas se repite cada 12 horas, permitiendo una ventana restringida de tiempo para realizar el trabajo de campo. Tomado de Kauffman <i>et al.</i> (2013). ....	37
Figura 19.	Como medida de seguridad y si no se cuenta con el equipo adecuado, debe limitarse la altura máxima a la cual se tomarán las mediciones del diámetro de los árboles de manglar. Fotografía: Miguel Cifuentes.....	39
Figura 20.	Ejemplos de etiquetas de muestras de suelo de manglares en el momento en el que se reciben en el laboratorio (arriba) y una vez ingresadas a la cadena de custodia del mismo (abajo). Fotografías: Miguel Cifuentes.....	43
Figura 21.	Mortero de muestras de suelos de manglar y tamices estándar de dimensión ASTM 10 (2 mm) y ASTM 60 (0,250 mm) utilizados para homogenizar las muestras. Fotografías: Miguel Cifuentes.....	44
Figura 22.	Pesado de muestras de suelo de manglar con balanza analítica de alta precisión (izquierda). Las muestras se colocan herméticamente dentro de pequeñas cápsulas de estaño durante el pesado y en preparación para el posterior análisis. Fotografías: Miguel Cifuentes .....	45

- Figura 23. Molino analítico utilizado para moler muestras de tejido vegetal (izquierda). Ejemplo de un tamiz estándar para uso en el molino de tejido vegetal (derecha). Fotografías: Miguel Cifuentes. . 45
- Figura 24. Aparato autoanalizador de carbono y nitrógeno total marca ThermoFinnigan, modelo Flash EA 1112 Series, instalado en el laboratorio analítico de CATIE, en Costa Rica (arriba). Detalle de los componentes internos del autoanalizador: estufa y columnas reactoras (abajo, izquierda) y desecante y detector de conductividad térmica o cromatográfica (abajo, derecha). Fotografías: Miguel Cifuentes y Patricia Leandro..... 46
- Figura 25. Estándares químicos de control internacional utilizados para la calibración de los aparatos de análisis de carbono orgánico total. Fotografías: Miguel Cifuentes. .... 47
- Figura 26. Ejemplo de curvas de detección de carbono y nitrógeno obtenidas a partir de un analizador automatizado de carbono y nitrógeno total..... 48
- Figura 27. Diferencias en la estimación de las existencias de carbono sobre el suelo según la ecuación alométrica utilizada. Las barras azules representan los resultados de utilizar la ecuación de Châve *et al.* (2005) y las barras azules la ecuación de Komiyama *et al.* (2005). Tomado de BIOMARCC (2012). .... 53
- Figura 28. La selección inapropiada de ecuaciones alométricas para calcular la biomasa de manglares (en este ejemplo, de la especie *Brugiera gymnorrhiza*, nativa de Asia) puede provocar errores multiplicativos en las estimaciones conforme aumenta el tamaño de los árboles. Tomado de Kauffman *et al.* (2013). .... 54
- Figura 29. Pasos para cuantificar la biomasa de las herbáceas y la regeneración en manglares, combinando la cosecha de material en el campo y la determinación de su peso seco con estimaciones visuales del área de la parcela cubierta por dichos componentes. Los valores son ilustrativos. .... 55
- Figura 30. El cálculo de carbono en un perfil de suelo con la técnica de “masa equivalente” permite eliminar los sesgos por la compactación del suelo que produce el cambio de manglares a otros usos del suelo. .... 56
- Figura 31. Ejemplo de base de datos electrónica para el almacenamiento, depuración y control de calidad de los datos y el cálculo de las existencias de carbono en manglares. Los datos procedentes de cada componente del ecosistema se almacenan en hojas separadas dentro del mismo archivo.58
- Figura 32. La herramienta de “tablas dinámicas” del programa Microsoft Excel permite resumir rápida y convenientemente los resultados de los cálculos de carbono para manglares y otros usos de la tierra asociados..... 59
- Figura 33. La corrección atmosférica de una imagen de satélite original (arriba) permite eliminar la interferencia atmosférica debida a las nubes, aerosoles y gases atmosféricos para brindar una representación consistente de la superficie de estudio (abajo). La imagen corresponde a la Bahía de Jiquilisco, El Salvador (Cifuentes *et al.* 2017). .... 62



Figura 34.	Ejemplo de mapa de cobertura del suelo en la Bahía de Jiquilisco, El Salvador, producto de la clasificación digital de una imagen de satélite del área. Tomado de Cifuentes-Jara <i>et al.</i> (2017). ..	63
Figura 35.	Flujo de trabajo del programa eCognition para clasificar imágenes de satélite con base en los métodos de Clasificación Orientada a Objetos.....	64
Figura 36.	Comparación visual de las diferencias entre la clasificación basada en píxeles (arriba) y la basada en objetos (abajo). .....	65
Figura 37.	Propiedades de dirección (A), magnitud (B) y distribución espacial de los cambios en la cobertura de uso del suelo en un paisaje marino-costero. ....	67

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Ejemplos de coberturas y usos del suelo comunes en áreas marino-costeras donde se realizan inventarios de carbono azul en bosques de manglar. ....	16
Cuadro 2.	Ejemplos de tablas de marea para América Central y República Dominicana. ....	38
Cuadro 3.	Ecuaciones alométricas recomendadas para el cálculo de biomasa total de árboles en kilogramos) de las especies de manglar más comunes de Centroamérica. ....	50
Cuadro 4.	Gravedad específica de la madera para especies de manglar presentes en el continente americano.....	51
Cuadro 5.	Ejemplo de un cuadro de resultados con las existencias de carbono ( $MgC \cdot ha^{-1}$ ) por componente del ecosistema calculado utilizando la herramienta de tablas dinámicas de Excel. ....	59
Cuadro 6.	Matriz de tabulación cruzada o “matriz de cambio” para dos mapas de diferentes fechas. ....	68
Cuadro 7.	Ejemplos de densidades de carbono para distintas coberturas de uso del suelo presentes en zonas marino-costeras. ....	69
Cuadro 8.	Lista sugerida de equipo y materiales necesarios para realizar inventarios de las existencias e carbono a nivel de ecosistema en manglares. ....	71

## ACRÓNIMOS Y SIGLAS

ALOS	Satélite Avanzado de Observación Terrestre ( <i>Advanced Land Observation Satellite</i> )
ARAP	Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá
ASTM	Asociación Americana de Ensayo de Materiales ( <i>American Society for Testing Materials</i> )
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CIFOR	Centro Internacional para la Investigación Forestal
COP	Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático
CMNUCC	Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático
ENF	Evaluación Nacional Forestal
ETM+	Cartógrafo Temático Mejorado ( <i>Enhanced Thematic Mapper</i> )
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
INF	Inventario Nacional Forestal
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
IUCN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
MAE	Ministerio del Ambiente del Ecuador
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
MRV	Medición, Reporte y Verificación
NAMA	Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación
OBIA	Clasificación Orientada a Objetos
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
PALSAR	Radar de Síntesis de Apertura de Barrido Lateral, banda L ( <i>Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar</i> )
PNUD	Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo
PVC	Policloruro de vinilo
QUAC	Corrección Atmosférica Rápida ( <i>Quick Atmospheric Correction</i> )
REDD+	Reducción de las Emisiones por Deforestación y Degradación
SIG	Sistema de Información Geográfica
SPP	Programa adicional para clasificación semiautomática ( <i>Semi-automatic Classification Plugin</i> )
TIR	Sensor térmico infrarrojo ( <i>Thermal Infrared Sensor</i> )
TM	Cartógrafo temático ( <i>Thematic Mapper</i> )
USAID	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
WEPAL	Intercambio Analítico Internacional de Plantas



# INTRODUCCIÓN - LA NECESIDAD DE CUANTIFICAR EL CARBONO AZUL EN CENTROAMÉRICA Y REPÚBLICA DOMINICANA

Las zonas marino-costeras son vitales para la sociedad como fuentes importantes de alimento, materiales de todo tipo, refugio de vida silvestre y provisión de servicios ecosistémicos como la regulación hídrica, la protección costera, la belleza escénica, y beneficios culturales y educativos. Estos y otros servicios ecosistémicos pueden representar valores monetarios considerables (Costanza *et al.* 2014), de entre US\$200 000 y 900 000 por hectárea de manglar (Costanza *et al.* 1997). Además de su valor para la adaptación al cambio climático, se ha empezado a reconocer su valor como ecosistemas con altísima capacidad de secuestro y acumulación de carbono, crítico para la mitigación. La cantidad de este “carbono azul” se refiere a las existencias de carbono que se encuentran en áreas de manglares, marismas saladas y pastos marinos, que pueden llegar a ser hasta cinco veces mayores que las encontradas típicamente en bosques tropicales terrestres (Donato *et al.* 2011).

No obstante, los manglares y otros ecosistemas marino-costeros han sido mayormente ignorados por las iniciativas estatales de desarrollo y los esfuerzos oficiales de conservación, con el agravante de que la subsistencia de una importante proporción de la población costera de nuestros países depende de su estabilidad (Cifuentes *et al.* 2015). Esta se ve amenazada por procesos antropogénicos que provocan una presión bidireccional sobre dichos bosques. Las amenazas de origen terrestre (cambio de uso de la tierra, cambios en hidrología, contaminación y erosión, construcción de infraestructura) y marino (aumento del nivel del mar, marejadas más frecuentes y fuertes) reducen las áreas disponibles para el crecimiento óptimo de los manglares, promueven pérdidas de carbono almacenado y fomentan la disminución y hasta la pérdida de los servicios ecosistémicos.

Durante los últimos 50 años, cerca de un tercio de los bosques de manglar del mundo se han perdido, sobre todo a favor del establecimiento de camaroneras y otros usos agrícolas (palma aceitera y arroz, entre otros; Alongi 2002, McLeod y Rodney 2006, FAO 2007, Kuenzer *et al.* 2011). Se estima que en 1970 los manglares cubrían unos 200 000 km<sup>2</sup>, aproximadamente el 75% de la superficie costera mundial (Spalding *et al.* 1997). Desde entonces, por lo menos un 35% del área de manglar ha sido destruida y actualmente los manglares están desapareciendo a una tasa de 1% a 2% anual (Alongi 2002, FAO 2007), superior a la tasa de pérdida de los bosques tropicales, estimada en 0,8% (Valiela *et al.* 2001, Gilman *et al.* 2006, Wells *et al.* 2006). Esta alarmante dinámica dio origen a la Iniciativa Internacional de Carbono Azul, la cual promueve el tema a nivel global a través de sus grupos de trabajo científico y político<sup>1</sup>.

Centroamérica no está exenta de esta dinámica de amenaza sobre los manglares. Sin embargo, a pesar de ser una de las regiones tropicales más vulnerables al cambio climático (Giorgi 2006), hasta hace poco los estudios se habían enfocado principalmente en la ecología y dinámica poblacional de estos ecosistemas (Pool 1977, Jiménez 1994, Coll 2001, Fonseca 2006, Zamora-Trejos y Cortés 2009). Desde 2011 y bajo el

1 Para más información acerca de la Iniciativa Internacional de Carbono Azul, consultar <http://thebluecarboninitiative.org/> Consultado nov. 2017.



liderazgo de CATIE y sus socios, se han desarrollado en Centroamérica y República Dominicana una serie de estudios y procesos para explorar el potencial del carbono azul como herramienta de respuesta ante los desafíos del cambio climático y para la promoción del desarrollo de comunidades rurales en las franjas marino-costeras<sup>2</sup>.

Como parte de este trabajo, en Costa Rica se realizaron las primeras mediciones de las existencias de carbono en manglares de la región (Manrow 2012), que posteriormente se ampliaron para llevar a cabo los primeros inventarios de carbono azul a nivel de ecosistema y paisajes (BIOMARCC 2012 y Cifuentes *et al.* 2015) con base en una metodología propuesta inicialmente en Asia (Murdiyarto *et al.* 2009). A partir de trabajos posteriores, fue posible derivar un primer estimado del valor del capital natural asociado a estos ecosistemas y determinar su relación con los medios de vida de las poblaciones rurales costeras (Arguedas 2015). Con base en esta información, se gestionan iniciativas para establecer esquemas de inversión y pago por servicios ambientales que involucran beneficios para las comunidades locales.

En El Salvador, el CATIE, a través del Programa Regional de Cambio Climático de USAID y a partir de trabajo de campo e información recopilada entre 2015 y 2017 en Bahía de Jiquilisco y el Estero de Jaltepeque, ha apoyado el fortalecimiento de las capacidades nacionales para estimar el carbono azul en manglares (Cifuentes Jara *et al.* 2017) y su incorporación dentro de iniciativas nacionales de restauración y manejo sostenible de zonas marino-costeras (Córdova-Ortiz 2015, Larios 2017). Adicionalmente, ha apoyado una propuesta para fortalecer las capacidades nacionales de incluir el carbono azul dentro del inventario nacional de gases de efecto invernadero y contribuir al inventario nacional forestal (Castaneda 2015). Con dicha propuesta se pretende institucionalizar los esfuerzos de carbono azul en el país, consolidar las capacidades de análisis de este tipo de muestras, datos e información en conjunto con el sector académico y facilitar procesos posteriores de medición y monitoreo de manglares. Este documento es un resultado complementario de dicho trabajo.

En Panamá, el proyecto “Protección de las Reservas y Sumideros de Carbono en los Manglares y Áreas Protegidas de Panamá”, financiado por el PNUD<sup>3</sup>, demuestra la contribución de los ecosistemas de manglar a la gestión del riesgo y del cambio climático tanto desde la perspectiva de la adaptación como de la mitigación. En la Bahía de Panamá, además, se ha establecido un sitio de monitoreo intensivo de manglares, en asocio con varias entidades nacionales y universidades de Estados Unidos<sup>4</sup>. Por su parte, en Honduras se ha puesto en marcha el “Proyecto GEF Marino-costero”, que tiene como objetivo promover la conservación de la biodiversidad a través de la expansión de la cobertura efectiva de áreas marinas y costeras protegidas en ese país, para salvaguardar la biodiversidad contra amenazas y fomentar la sostenibilidad financiera de dichas áreas. El proyecto se centra en el Caribe, que representa más del 80% de la longitud total del litoral hondureño. Finalmente, en Guatemala también se están dando los primeros pasos para cuantificar las existencias de carbono en los manglares de la costa pacífico (Aceituno *et al.* 2016, Rodríguez 2017). Entre tanto, República Dominicana ya registró una propuesta y está buscando fondos para implementar un NAMA de carbono azul (República Dominicana 2105), aunque solo se ha desarrollado un inventario aislado de carbono azul en dicha isla (Kauffman *et al.* 2014).

2 El detalle completo de este planteamiento se encuentra en línea como parte de la plataforma internacional PANORAMA de soluciones para el desarrollo: <http://panorama.solutions/en/solutions/blue-carbon-a-z-from-small-projects-to-policy-development> Consultado nov. 2017.

3 Los detalles del proyecto están disponibles en línea en: <http://www.miambiente.gob.pa/manglares/> Consultado nov. 2017.

4 Para mayor información, consultar <http://laestrella.com.pa/vida-de-hoy/planeta/panama-tercer-pais-mundo-torre-manglares/23897818> Consultado nov. 2017.

Ante este creciente número de iniciativas orientadas a determinar la capacidad de los manglares para almacenar carbono, es necesario contar con una guía metodológica que permita apoyar dichas mediciones. Aunque se han publicado guías similares (Kauffman *et al.* 2013, Howard *et al.* 2014), solo una está en español (Kauffman *et al.* 2013, traducida y actualizada de Kauffman *et al.* 2012) y no considera por completo las realidades humanas y técnicas de los países de Centroamérica y el Caribe. Así, el propósito de este manual es describir los métodos y las buenas prácticas para el diseño de inventarios forestales de carbono azul para manglares de la región. Nuestra intención es que los resultados derivados de estos trabajos sirvan de base para apoyar los procesos de inventario nacional forestal (INF) y los sistemas de medición, reporte y verificación (MRV) de REDD+ pero, sobre todo, que puedan ser utilizados para fortalecer la gestión sostenible de los manglares en beneficio de las comunidades rurales marino-costeras.

El contenido de este manual está pensado para proveer al personal técnico de los gobiernos y organizaciones nacionales y locales recomendaciones metodológicas apegadas a principios internacionales de buenas prácticas (IPCC 2003, GOFC-GOLD 2016) para cuantificar de forma completa las existencias de carbono azul en manglares (sobre el suelo, bajo el suelo, raíces, regeneración, madera caída, herbáceas). El manual describe primeramente cómo diseñar un inventario y seleccionar la muestra; luego, detalla los pasos del trabajo de campo desde una perspectiva práctica. Además, detalla los procedimientos de laboratorio necesarios para realizar los análisis químicos en muestras de suelo y tejido vegetal de los manglares y dedica una sección a describir los cálculos por realizar con los datos recopilados. También desarrolla una sección con los pasos para modelar el uso/cobertura del suelo en zonas marino-costeras, antes de terminar brindando recomendaciones para facilitar la incorporación de los datos de carbono azul en procesos nacionales. Para ilustrar estos elementos, incluimos ejemplos procedentes del trabajo realizado en diferentes lugares de la región.

# DISEÑO DEL INVENTARIO Y SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO

## CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL MUESTREO DE CARBONO AZUL

Antes de lanzar cualquier iniciativa de medición de carbono azul, debemos tener claro el propósito de dicha tarea, porque de este se deriva la naturaleza y la periodicidad de la información por recopilar, su procesamiento y posterior socialización y utilidad. El IPCC (2003) describe los principios más generales de buenas prácticas para estas iniciativas, suplementados por otras organizaciones que apoyan los procesos de mitigación a nivel global (ONU-REDD 2013, Howard *et al.* 2014, Hewson *et al.* 2014, GOF-C-GOLD 2016). Sin embargo, las características y necesidades de cada inventario están sujetas al uso potencial de los datos.

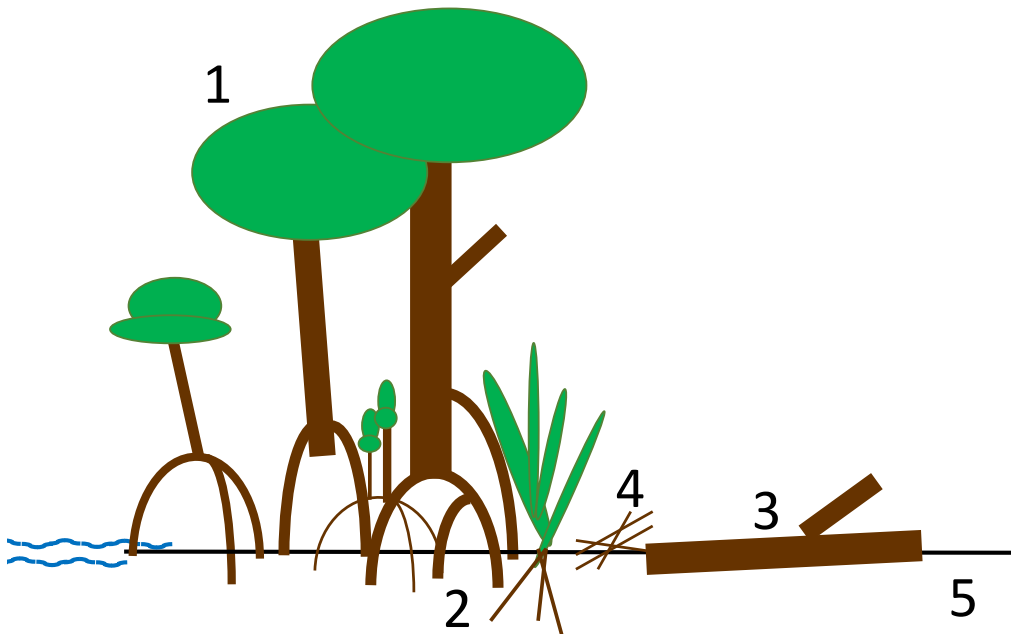
Desde la perspectiva del carbono azul, la información derivada de inventarios en ecosistemas marino-costeros puede utilizarse para apoyar proyectos de mitigación del cambio climático (asociados a mercados de carbono o iniciativas de responsabilidad social-empresarial, por ejemplo; Emmer *et al.* 2015 y VCS 2015), para brindar información que permita gestionar de manera sostenible recursos por parte de las comunidades locales y promover acciones de conservación (Córdova-Ortiz 2015), o integrarse en procesos nacionales (inventarios nacionales forestales o sistemas de medición, reporte y verificación para REDD+), entre otros.

Aunque cada uno de estos propósitos presenta sus particularidades, de forma muy general, cualquier esfuerzo de medición de las existencias de carbono en manglares debe contemplar al menos los siguientes pasos (Pearson *et al.* 2005, Howard *et al.* 2014):

1. Definir los límites espaciales y temporales de un proyecto para ayudar a delimitar sus objetivos y el ámbito de las inferencias.
2. Definir la estratificación del área para controlar la variación en los datos recopilados. La resolución y el detalle de la estratificación son relativos a la escala y los objetivos del estudio.
3. Decidir cuáles depósitos de carbono del ecosistema deben ser medidos y monitoreados. El IPCC (2003) define cinco de estos para los ecosistemas (Figura 1) y sugiere sean medidos si representan una proporción significativa ( $> 5\%$ ) de las existencias totales de carbono o si la proporción de cambio (un 3% anual) es evidente (Casanoves *et al.* 2017).
4. Diseñar un inventario que permita definir el tipo, número y ubicación de las unidades muestrales.
5. Determinar la frecuencia de las mediciones.
6. Ejecutar el trabajo de campo.
7. Preparar las muestras y realizar los análisis de laboratorio.
8. Calcular las existencias de carbono y realizar inferencias espaciales y temporales.

En toda circunstancia, debemos tener claro el equilibrio entre lo estadísticamente deseable y lo factible dadas las condiciones financieras, humanas, técnicas y logísticas de un proyecto, pues todas estas pueden influir en la precisión y la exactitud de nuestros estimados. Otro elemento que debemos tomar en cuenta es que nuestros estimados deben ser conservadores; es decir, no sobreestimar los sumideros ni subestimar las fuentes de emisiones (IPCC 2003, Pearson *et al.* 2005). Afortunadamente, hay una serie de guías metodológicas que pueden orientarnos en esta materia (Casanoves *et al.* 2017), inclusive dirigidas al trabajo en manglares (MAE 2012).

Al ampliar la escala de una iniciativa de medición y monitoreo de carbono azul para estimar flujos de emisiones y remociones de carbono (o, más ampliamente, GEI), debemos tener el cuidado de incluir información espacial y temporal. Para ello, es necesario derivar *datos de actividad* y *factores de emisión*. La magnitud y dirección de los cambios en la cobertura/uso del suelo a lo largo del tiempo constituyen los datos de actividad, derivados a partir de análisis geográficos que comparan la cobertura/uso del suelo entre dos o más periodos. Los factores de emisión representan la diferencia entre la magnitud de las densidades de carbono de las coberturas/ usos involucrados en una transición entre dos puntos en el tiempo. Estos se derivan de inventarios de campo (incluyendo el INF), estudios previos o datos predeterminados (IPCC 2003).



**Figura 1.** Depósitos elegibles para la medición de carbono en ecosistemas naturales (basado en IPCC 2003).


**Nota:** 1: biomasa arriba del suelo; 2: biomasa bajo el suelo; 3: madera caída; 4: hojarasca; 5: carbono en el suelo.

Al tomar en cuenta gradientes de cobertura/uso del suelo para estudios de carbono azul en áreas de manglar, se debe determinar cuál es la dinámica de conversión de dichos bosques a otros usos de la tierra. Esto puede ir de la mano con la comparación de las coberturas a lo largo del tiempo, para determinar la evolución histórica de las existencias y las emisiones. La definición de las categorías/ usos a partir de imágenes y mapas disponibles puede responder a clasificaciones visuales *in situ*, que pueden ser muy detalladas y hasta imperceptibles para los sensores remotos, por lo que recomendamos buscar un equilibrio entre el nivel de detalle deseado a nivel de campo y el que es factible distinguir a partir de las imágenes de satélite. Por ejemplo, es habitual en Centroamérica distinguir entre estratos de manglar alto, intermedio y bajo, o diferenciar áreas por la dominancia de una determinada especie en ellas. Sin embargo, estas características no son discriminantes a partir de las imágenes de Landsat comúnmente disponibles. Sería necesario usar imágenes de mayor resolución o de otro tipo para distinguir estos estratos consistentemente. Otras categorías de uso aledañas a los manglares y que se pueden tomar en cuenta son las camaroneras, salineras, zonas ganaderas o agrícolas (palma aceitera, arroz), y otras (Cuadro 1).



**Cuadro 1.** Ejemplos de coberturas y usos del suelo comunes en áreas marino-costeras donde se realizan inventarios de carbono azul en bosques de manglar.

Cobertura/Usos	Descripción general	Ilustración
Bosque siempre verde	Bosque tropical no inundado, con cobertura foliar permanente. Ubicado frecuentemente en el margen posterior de las áreas del manglar, lejos de la influencia marina.	
Bosque mixto semicaducifolio	Bosque tropical no inundado, con pérdida estacional de cobertura foliar. A menudo colinda con áreas de ganadería.	
Mangle denso (alto/medio)	Manglar habitualmente situado cerca de los márgenes de los canales, ríos u orillas del mar. De talla alta (h > 5 m), composición variada y densidad considerable.	

Cobertura/Uso	Descripción general	Ilustración
Mangle bajo (enano)	Manglar de estatura baja (< 3 m). Generalmente son monoespecíficos, con densidades muy altas que impiden el tránsito fácil.	
Otros humedales (marismas, praderas pantanosas)	Vegetación dominada por hierbas y arbustos achaparrados en sustratos frecuentemente inundados por agua salobre.	
Plantaciones de palma o coco	Áreas de cultivo de coco o palma de aceite.	



Cobertura/Uso	Descripción general	Ilustración
Agropecuario	Áreas bajo cultivos agrícolas (cultivos, pastos).	
Urbano/Suelo desnudo	Poblados, carreteras y otra infraestructura gris.	
Camaronera/ Salinera	Pilas estacional o permanentemente inundadas para la producción de camarones o la extracción de sal.	
Dunas, arena	Áreas en el margen costero, dominadas por sustrato arenoso y con vegetación halófila.	

Cobertura/Uso	Descripción general	Ilustración
Cuerpos de agua	Canales, ríos, lagunas, mar.	
Vegetación arbustiva	Vegetación de talla baja ( $h < 3$ m).	

Fuente: Tomado de Cifuentes *et al.* (2017).

Aunado a lo anterior, la clasificación de cobertura/uso utilizada debe ser congruente con la definición nacional de bosques y otros ecosistemas de cada país, así como las categorías de uso de la tierra que este utilice para sus inventarios de gases de efecto invernadero (INGEI), el inventario nacional forestal (INF) y el MRV para REDD+. De esta forma, los datos recopilados podrán ser agregados de manera transparente a la contabilidad nacional de emisiones de GEI o al monitoreo de la cobertura/uso del suelo.

En las secciones siguientes desarrollaremos con mayor detalle una serie de recomendaciones que permitan, en la medida de lo posible, relacionar los inventarios locales de carbono azul con las distintas iniciativas nacionales, tomando como base los ocho puntos descritos anteriormente. Iniciamos con los procesos de diseño de los inventarios; luego, detallamos las distintas acciones necesarias para desarrollar el trabajo de campo y describimos los análisis de laboratorio necesarios para cuantificar las existencias de carbono en manglares y otros usos del suelo aledaños. Posteriormente, ampliamos esa información con detalles sobre el uso de herramientas satelitales para proveer estimados locales, nacionales y hasta regionales de la dinámica de las emisiones de GEI asociada a los cambios en la cobertura/uso del suelo. Este manual, además, concluye con sugerencias para facilitar el proceso de inclusión de la información de carbono azul en procesos nacionales.



## DELIMITACIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO

La delimitación de las áreas con manglar en una zona de estudio se realiza de manera eficiente por medio de un sistema de información geográfica (SIG), complementado por fotografías aéreas y mapas de cobertura de la tierra (BIOMARCC 2012, Cifuentes *et al.* 2017). En casos calificados, es posible realizar sobrevuelos con avioneta<sup>5</sup> o drones como ayuda para identificar los patrones de uso de la tierra con las herramientas SIG (Cifuentes *et al.* 2015; Figura 2). Los drones se están convirtiendo en soluciones de uso rápido y bajo costo, pero su autonomía de vuelo aún es restringida. En la sección “Adquisición de información geoespacial” (p. 60) se detallan las fuentes potenciales de datos geoespaciales.



**Figura 2.** Las fotografías aéreas obtenidas mediante sobrevuelos con avioneta o con drones facilitan el reconocimiento de los patrones de cobertura/uso del suelo en las áreas marino-costeras y permiten inferir las rutas de conversión de los manglares hacia otros usos de la tierra.  
Fotografía: Miguel Cifuentes, Golfo de Nicoya, Costa Rica.

El fin de este proceso es identificar las áreas de manglar y otros usos o coberturas del suelo aledaños que constituirán el ámbito geográfico y temporal del estudio. Si se cuenta con una serie histórica de imágenes

5 Un ejemplo de una compañía de operadores aéreos con capacidad para realizar estos sobrevuelos en Centroamérica es CAVU: <https://www.cavuventures.com/>. Consultado nov. 2017. Su mención no implica aprobación o recomendación alguna por parte de los autores, USAID o CATIE.

y fotografías para un área, se puede establecer un periodo histórico y la cronología de los cambios en la cobertura. Para cuantificar adecuadamente las emisiones y posibles remociones de gases de efecto invernadero a partir de las pérdidas o ganancias de las áreas de manglar, es necesario determinar cuál fue su extensión original y cuáles usos de la tierra las han reemplazado a lo largo del tiempo. Esta información se debe complementar y corroborar con recorridos de campo y entrevistas a funcionarios de gobierno, organizaciones comunitarias y pobladores de las comunidades del área.

Una vez delimitada el área de estudio e identificadas y seleccionadas las coberturas/uso del suelo relevantes, se procede con la selección de los sitios para realizar las mediciones. En lo posible, recomendamos que los inventarios se diseñen de forma tal que los datos puedan ser incorporados de manera transparente y estadísticamente robusta a procesos nacionales de monitoreo de bosques. Las consideraciones para seleccionar una muestra representativa, espacialmente independiente y que cumpla con lo anterior se describen a continuación con base en un estudio de caso.

## ESTUDIO DE CASO: SELECCIÓN DE SITIOS PARA LA MEDICIÓN DE CARBONO EN MANGLARES DE PANAMÁ

Tania E. Romero<sup>6</sup>

En esta sección describimos la experiencia en el diseño de un inventario para la medición de carbono azul en manglares de Panamá que tuvo lugar como parte del proyecto “Protección de reservas y sumideros de carbono en los manglares y áreas protegidas de Panamá”. Este proyecto es coordinado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) e implementado por éste junto al Ministerio de Ambiente (MiAmbiente) y la Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá (ARAP), con el apoyo de Wetlands International y Conservación Internacional. El mismo demuestra la contribución de los ecosistemas de manglar a la gestión del riesgo y del cambio climático, tanto desde la perspectiva de adaptación como de mitigación, y sus investigaciones buscan mejorar la comprensión de la dinámica del carbono en los manglares y los ecosistemas asociados de Panamá. A través de capacitaciones, planificación y regulaciones, micro proyectos comunitarios y sensibilización, el proyecto fortalece la gestión de los manglares a nivel nacional y local en tres distritos de Chiriquí. De esta manera el proyecto contribuirá a la mitigación y adaptación al cambio climático, al desarrollo social, económico, ambiental y a la conservación de la biodiversidad.

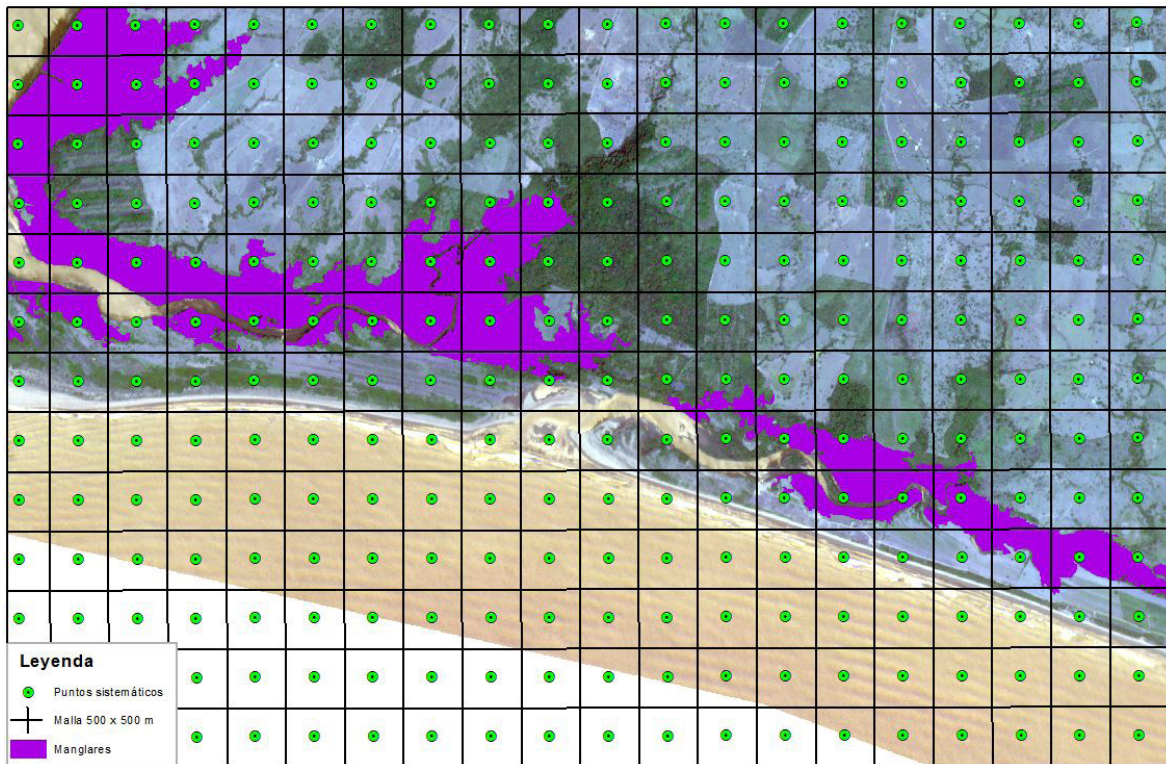
En lo posible, los inventarios forestales de carbono azul deben alinearse con otros esfuerzos de cuantificación de carbono que se realizan en el país. Dado que los INF son los procesos sistemáticos mejor desarrollados para caracterizar recursos forestales nacionales y que integran también los esfuerzos nacionales de medición, reporte y verificación (MRV) para REDD+, son la opción más robusta para buscar esas sinergias.

Para contribuir de forma más directa a los procesos nacionales, en Panamá se incorporó la retícula base del INF en la etapa de diseño del inventario. Para ello, se debe solicitar el acceso a la capa

<sup>6</sup> Tania E. Romero G. MSc. Especialista en Medición de Carbono, UNDP Oficina de Panamá. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Ciudad del Saber, Edificio 129. Correo electrónico: [tania.romero@undp.org](mailto:tania.romero@undp.org). Tel. +507 305-4869

geográfica (*shapefile*) del INF a la institución encargada del inventario nacional forestal. En los países de Centroamérica, dicha institución es el Ministerio de Ambiente, bajo la autoridad del Servicio Forestal Nacional o de las oficinas de monitoreo de recursos forestales del país. A partir de este insumo se realizan una serie de procesos que involucran el uso de sistemas de información geográfica (SIG).

Se tomó como base la retícula original del INF y se incrementó su densidad mediante el uso del programa ArcGIS versión 10.3. Esto permite seleccionar los sitios de muestreo de carbono azul en ubicaciones congruentes con las escalas espaciales superiores del INF, reduciendo así la posibilidad de sesgo en la selección de la muestra y aumentando la congruencia espacial de los datos a nivel nacional. En el caso de Panamá, la densidad se aumentó de 3 x 3 km hasta una retícula de trabajo de 500 x 500 m con el comando *Create Fishnet* de ArcGIS 10.3 (Figura 3). La decisión de qué tan densa podría ser esta última depende de la escala y del tamaño del área bajo estudio. Además, se sugiere ajustar el número total de muestras al presupuesto y tiempo de ejecución del proyecto, como recomiendan Howard *et al.* (2015). Para concluir este paso, la retícula de trabajo se sobrepuso geográficamente a la cobertura de manglares en el área de interés (Figura 3).

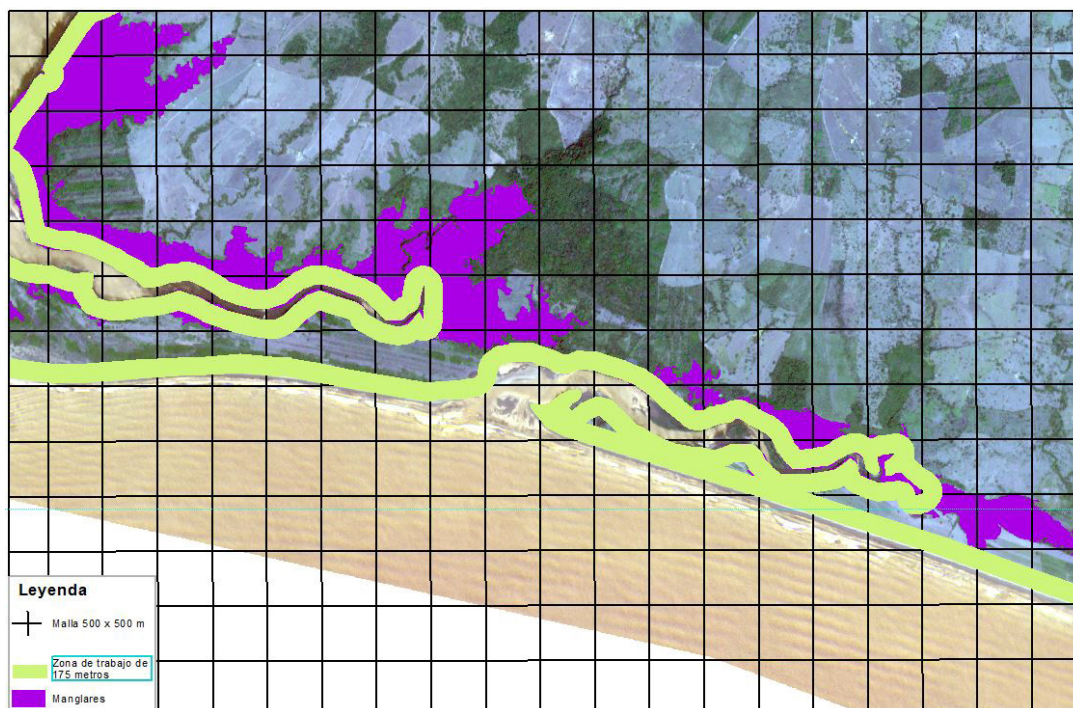


**Figura 3.** Retícula de trabajo de 500 x 500 m colocada sobre la retícula de 3 x 3 km del inventario forestal nacional de Panamá para un área con cobertura de manglares de la costa de San Félix, Provincia de Chiriquí, Panamá.

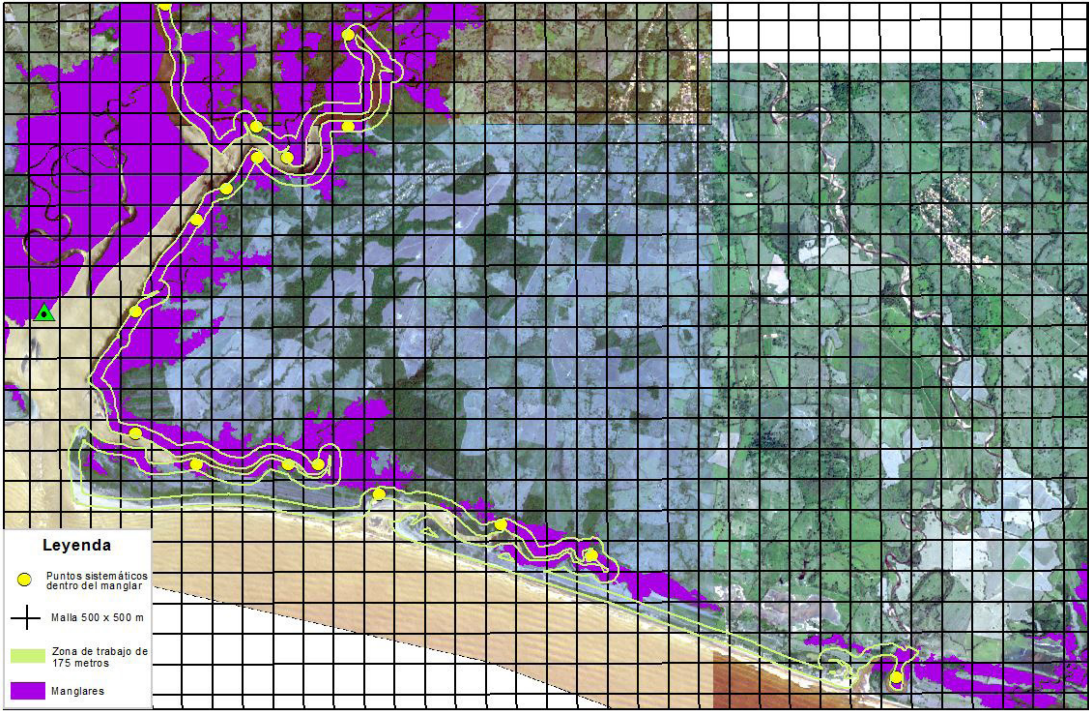
Para determinar el universo potencial de muestreo de los manglares, se fijó una zona de amortiguamiento (o *buffer*) de 150 m o 175 m de ancho a partir de los bordes de los cuerpos de agua identificados en los mapas bases locales (Figura 4). Esta distancia está alineada con los métodos sugeridos por Kauffman *et al.* (2013)



y permite abarcar zonas continuas de manglar. El resultante conjunto de áreas potenciales de muestreo está constituido por todos los puntos centrales de las celdas de la retícula de trabajo (Figura 4) contenidos dentro del polígono de amortiguamiento de los manglares dibujado inicialmente. A partir de ese conjunto, se distribuyó al azar la cantidad de puntos de muestreo requeridos dentro de la zona de amortiguamiento (Figura 4). Como último paso, y para evitar la autocorrelación espacial de las muestras, se utilizó un filtro espacial (*Create Random Points*) para asegurar que los puntos finales tengan una separación mínima de 1 km (Figura 5).



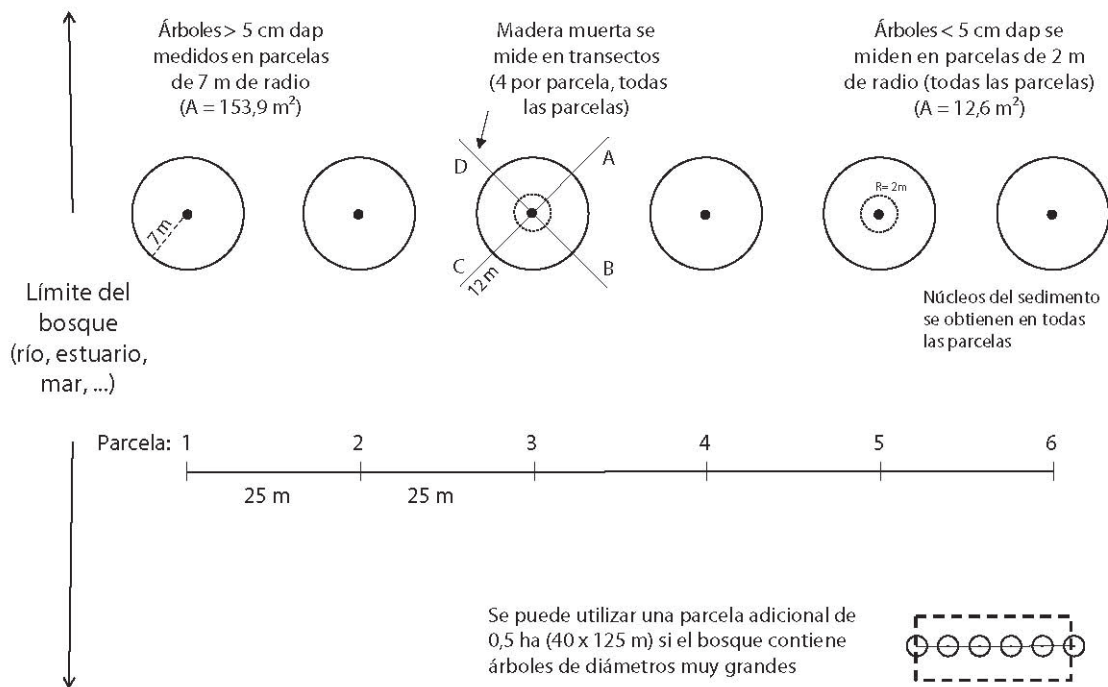
**Figura 4.** Zona *buffer* (amortiguamiento) de 175 m de ancho (en verde claro) a partir de los bordes de cuerpos de agua colocada sobre las áreas de manglares (en color morado) de la costa de San Félix, Provincia de Chiriquí, Panamá.



**Figura 5.** Distribución de puntos de muestreo de manglares en la costa de San Félix, Provincia de Chiriquí, Panamá, ubicados aleatoriamente y con una distancia mínima de 1 km entre sí.

# MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LOS COMPONENTES DE CARBONO AZUL EN MANGLARES

Una vez seleccionados los sitios de muestreo, se procede al trabajo de campo. En síntesis, la metodología propuesta consiste en establecer parcelas circulares anidadas ubicadas a lo largo de un transecto de medición de 150 m de longitud a partir de la orilla del manglar (Figura 6). Los métodos que describimos a continuación, basados en Kauffman *et al.* (2012 y 2013) y Howard *et al.* (2014), brindan la oportunidad de cuantificar de forma completa y robusta todos los componentes de carbono del ecosistema (Figura 1). A la fecha, se han utilizado en Centroamérica y República Dominicana para cuantificar las existencias de carbono en manglares (BIOMARCC 2012, Kauffman *et al.* 2014, Cifuentes *et al.* 2015, Aceituno *et al.* 2016, Cifuentes *et al.* 2017, MiAmbiente y PNUD 2017). En esta sección, describimos conceptualmente los arreglos de muestreo y en la sección de “Particularidades del trabajo de campo” (p. 37) detallamos los aspectos prácticos de las mediciones.



**Figura 6.** Esquema de la distribución de las parcelas de medición establecidas a lo largo de un transecto de 150 m y utilizadas para cuantificar las existencias de carbono en manglares. Tomado de Kauffman *et al.* (2014).



## TRANSECTOS DE MEDICIÓN Y UNIDADES MUESTRALES

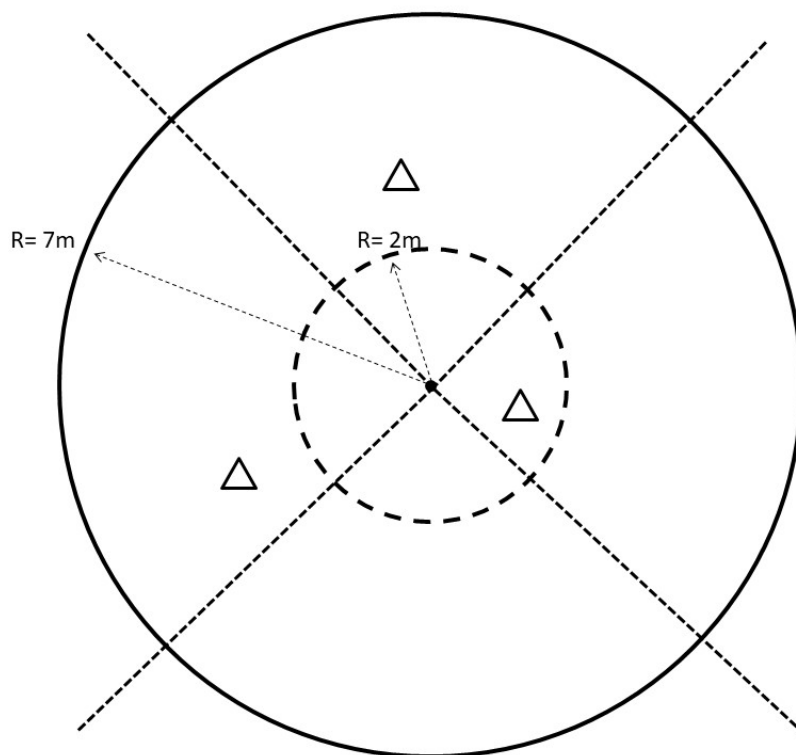
En cada sitio de muestreo se establecen transectos de medición de 150 m de largo perpendiculares a la línea costera o la orilla del canal o del río donde crecen los manglares (Figura 7). Para la medición apropiada de todos los componentes del ecosistema, se usa un sistema anidado de unidades muestrales (Figura 8) que se colocan sobre el transecto, separadas cada 25 m. La demarcación de los transectos se inicia a 25 m de la orilla para evitar o disminuir el efecto de borde y cada 25 m después de ese punto. En la sección “Particularidades del trabajo de campo” (p. 37) describimos en detalle las operaciones de tiempos y movimientos para la ejecución de los inventarios, mientras que a continuación explicamos los procesos generales por componente del ecosistema.



**Figura 7.** Demostración del establecimiento de un transecto para la medición de carbono en manglares con una cinta métrica para mantener la dirección del transecto y ubicar las parcelas de medición cada 25 m. Fotografía: Miguel Cifuentes.

## BIOMASA DE ÁRBOLES

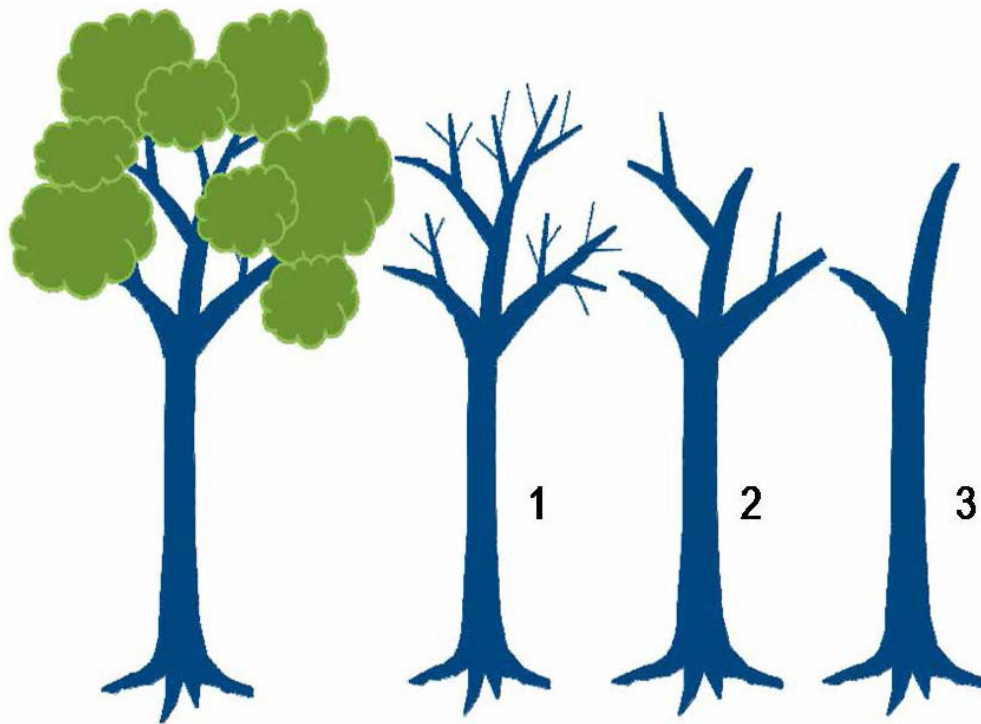
Los árboles con diámetro  $\geq 5$  cm se miden en parcelas circulares de 7 m de radio utilizando cintas diamétricas, mientras que el diámetro de los individuos con  $dap < 5$  cm se mide en una subparcela de 2 m de radio contenida dentro de la principal (Figura 8). El tamaño de los árboles se mide como el diámetro a la altura del pecho (dap), a 1,30 m de altura sobre el fuste, o el diámetro (d, medido a 30 cm por encima de la última raíz fúlcrea o irregularidad del fuste). Junto con la medición del diámetro se debe anotar la especie y si el árbol está vivo o muerto, para poder diferenciarlos posteriormente al calcular la biomasa. Los manglares, generalmente, tienen baja riqueza de especies de árboles y es relativamente sencillo aprender rápidamente a identificar las especies más abundantes. Sin embargo, siempre es recomendable hacer el esfuerzo por recolectar muestras dendrológicas y llevarlas a un herbario o con un taxónomo para su correcta identificación y registro como material de referencia.



**Figura 8.** Diseño de las parcelas anidadas y transectos de intersección utilizados para medir biomasa y carbono en bosques de manglar. Adaptado de Kauffman y Donato (2012).

El nombre de la especie se usa para realizar análisis de diversidad florística (que no es tema de este manual) y también para asignarle los valores apropiados de gravedad específica de la madera. Estos se pueden obtener directamente, tras cosechar una pequeña muestra de madera y llevarla al laboratorio, o tomando valores de la literatura (Zanne *et al.* 2009).

Los individuos muertos (uno de los componentes de la “necromasa”<sup>7</sup>) se clasifican en tres categorías (Figura 9), según su grado de integridad estructural (97,5%, 80% y 50% de la biomasa original; Kauffman y Donato 2012). Estos valores se usan para corregir la biomasa calculada posteriormente. Dependiendo de los objetivos del estudio, podría ser necesario medir la altura de todos los individuos dentro de la parcela. Más comúnmente, se mide la altura de todos los tallos muertos que aún se encuentran en posición vertical y la de los dos árboles dominantes de las parcelas de 7 m de radio. Lo más eficiente es utilizar para ello un clinómetro o un hipsómetro. El tamaño de las raíces del manglar no se mide directamente porque posteriormente se calcula su biomasa por medio de ecuaciones alométricas (ver Cuadro 3 en la sección “Cálculo de las existencias de biomasa y carbono”, p. 49) basadas en el diámetro del árbol medido.

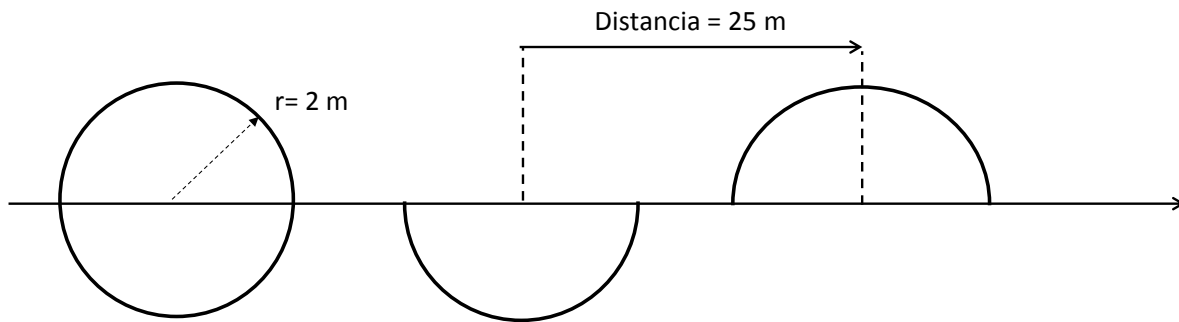


**Figura 9.** Escala visual para determinar el grado de descomposición de los árboles de manglar en pie. De izquierda a derecha se muestra un árbol intacto, y con 97,5%, 80% y 50% de la biomasa original. Tomado de Kauffman *et al.* (2013).

7 El término “necromasa” se utiliza más ampliamente para designar la materia vegetal muerta en un bosque. En el contexto de las estimaciones de carbono, la necromasa incluye los árboles muertos en pie, la madera caída y la hojarasca. En la práctica, la medición y el cálculo de la biomasa y el carbono de estos componentes se realiza por separado.

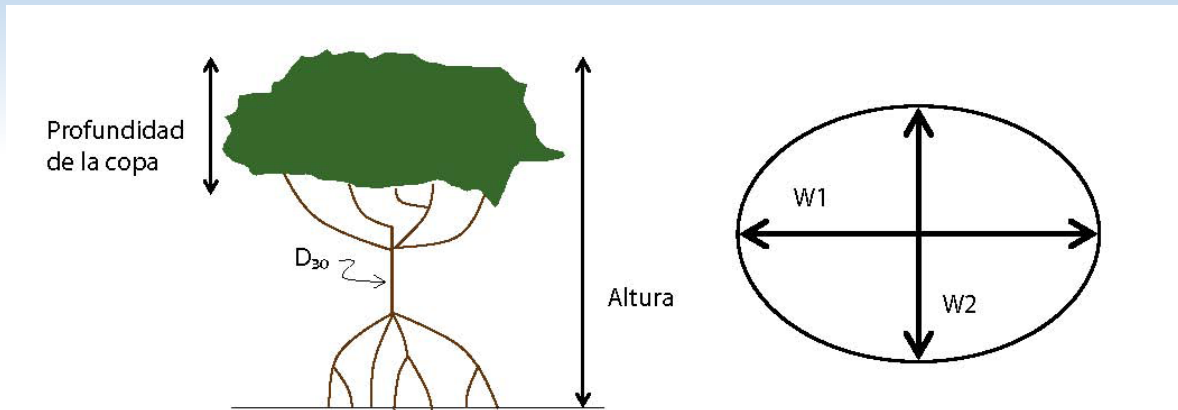
### Mediciones en manglares enanos o “chaparros”

Los manglares enanos o chaparros se caracterizan por su desarrollo limitado en altura y sus densidades elevadas de individuos con respecto a los manglares más desarrollados, aunque las especies presentes sean similares. Debido a estas características, lo recomendable es modificar el esquema de muestreo anteriormente descrito para mantener la eficiencia de trabajo en el campo. Kauffman *et al.* (2013) sugieren dos modificaciones al método original: utilizar solo las parcelas circulares de 2 m de radio o, si la densidad de los individuos así lo determina, usar parcelas en forma de semicírculo, que pueden alternarse a cada lado del transecto principal de medición (Figura 10).



**Figura 10.** Métodos alternativos para cuantificar el carbono en bosques de manglar enano (“chaparro”), donde las densidades de los individuos son altas. Se pueden utilizar solo parcelas circulares de 2 m de radio (ejemplo de la parcela circular en la extrema izquierda de la figura) o, si la densidad de los individuos así lo amerita, usar semicírculos del mismo radio como parcelas y alternarlos de lado y lado del transecto de medición (ejemplificado con las dos parcelas semi-circulares de la derecha). Se mantiene la distancia entre parcelas (25 m; el dibujo no está a escala).

Además de la mayor densidad de individuos, el mangle enano tiene una arquitectura distinta a la de los manglares altos. Por esta razón, las mediciones del tamaño de los árboles que se deben registrar son diferentes: altura total (medida desde la superficie del suelo hasta el punto más alto de la copa), diámetro del tallo o fuste medido a 30 cm sobre el suelo, profundidad de copa (medida desde la base de la copa hasta el punto más alto de la misma) y diámetros de la copa (medido perpendicularmente entre sí; Figura 11).



**Figura 11.** Variables dasométricas relevantes para el cálculo de la biomasa de árboles en manglares enanos (“chaparros”): profundidad de la copa, altura, diámetro del fuste o tallo medido a 30 cm sobre el suelo ( $d_{30}$ ) y diámetros ( $W_1$  y  $W_2$ ) de la copa. Adaptado de Kauffman *et al.* (2013).

## HOJARASCA

Definimos la hojarasca como la madera caída con  $d < 2,5$  cm y demás material fino (hojas, flores, etc.) que se encuentra sobre el suelo. Para medir la cantidad de biomasa de hojarasca, se coloca aleatoriamente un marco de PVC, madera o metal de  $0,25 \text{ m}^2$  ( $0,50 \times 0,50 \text{ m}$ ) dentro de la parcela principal y se cosecha todo el material que se encuentre dentro de él. Si el material es muy abundante se procede a recolectarlo por completo, pesarlo “fresco” en el campo con una balanza portátil, y tomar una submuestra de aproximadamente 250 g. Esta submuestra se lleva al laboratorio, donde se seca al horno hasta peso constante. Si la cantidad de material es menor a 1 kg, se procede a recolectarlo y llevarlo al laboratorio para secarlo completamente y pesarlo. Sin embargo, normalmente la hojarasca no es un componente importante del ecosistema de manglar y puede obviarse de los inventarios, pues se ha demostrado que alcanza apenas el 0,02% de la biomasa total (BIOMARCC 2012).

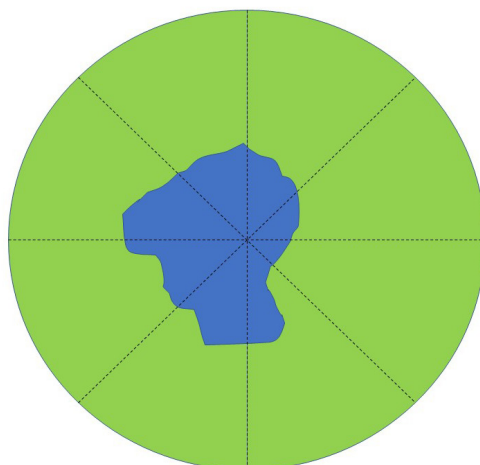
## HERBÁCEAS Y REGENERACIÓN

Para medir la regeneración, definida como las herbáceas, helechos (*Acrostichum aureum*) y plántulas de manglar con altura  $< 1,30$  m, se procede de forma similar a la hojarasca. Durante la planificación del inventario hay que considerar la conveniencia de separar los componentes de regeneración de las estructuras herbáceas. En el campo, se cosecha el material herbáceo y de regeneración usando marcos de medición de  $1 \times 1 \text{ m}$  o de  $0,50 \times 0,50 \text{ m}$ , dependiendo de la cantidad y talla de material presente (Figura 12), siguiendo el mismo proceso que para la hojarasca. Después, se obtiene una estimación visual del área de la parcela cubierta por las herbáceas y la regeneración, dividiendo la parcela de 7 m de radio en varios segmentos que sean visualmente manejables (Figura 13).





**Figura 12.** Para cuantificar la biomasa del material herbáceo se utilizan marcos de medición contruidos de material resistente (por ejemplo, PVC) de 1 x 1 m para delimitar el área dentro de la cual se cosecha por completo el material vegetal para determinar su peso fresco total. Fotografía: Miguel Cifuentes.



**Figura 13.** Ejemplo de los segmentos utilizados para estimar visualmente la cobertura de herbáceas o regeneración en una parcela circular de 7 m de radio para cuantificar la biomasa de manglares. El área en azul representa el área de cada segmento con cobertura de herbáceas en una parcela.



## MADERA CAÍDA

La madera caída se mide categorizada por tamaño, utilizando la metodología del plano de intersección (Brown y Roussopoulos 1974, Van Wagner 1982) a lo largo de cuatro transectos de medición de 12 m de longitud y 2 m de altura<sup>8</sup>. Esta técnica se basa en teoría de probabilidad estadística que relaciona el diámetro de un conjunto aleatorio y normalmente distribuido de piezas de madera caída con su volumen. Así, con solo conocer el diámetro de una pieza de madera caída que interseca el plano se puede derivar indirectamente su biomasa, como se demostrará más adelante. Para incluir una pieza de madera caída dentro de las mediciones, esta debe cumplir con los siguientes criterios (Van Wagner 1968):

- Las piezas de madera incluidas en el muestreo deben estar posicionadas en un ángulo  $< 45^\circ$  respecto de la superficie del suelo y completamente desprendidas de los árboles o las ramas principales.
- La pieza de madera debe intersecar (cruzar) por completo el plano de muestreo.
- Cuando el plano de intersección cruza sobre el extremo de una pieza de madera, su inclusión se alterna durante el muestreo (una pieza se incluye y la siguiente no, etc.).
- Las piezas de madera ubicadas paralelamente a la dirección del plano de intersección no se toman en cuenta durante el muestreo.

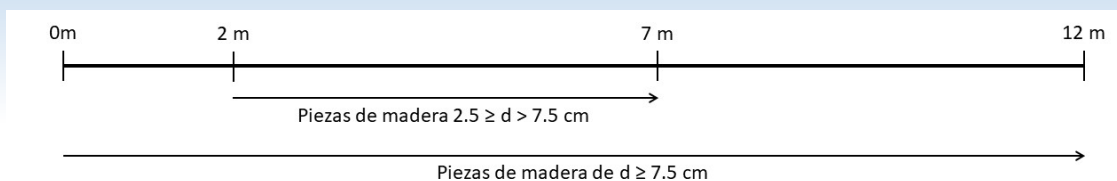
Los planos de intersección inician a partir del centro de la parcela y deben estar orientados a  $45^\circ$  respecto de la dirección principal del transecto (Figura 8). Kauffman *et al.* (2013) categorizan las piezas de madera caída en cuatro categorías de tamaño, según el tiempo requerido para que un fuego las consuma completamente. Sin embargo, para simplificar la recolección de datos en el campo, sugerimos utilizar solo dos categorías de diámetro y recopilar los datos de la siguiente manera (Figura 14):

- Las piezas con  $d \geq 7,5$  cm se miden lo largo de todo el transecto;
- Las piezas con  $2,5 \geq d > 7,5$  cm se miden a lo largo de 5 m sobre el transecto, solo entre los 2 y los 7 m del transecto, medidos desde el centro de la parcela.
- Las piezas de madera con  $d < 2,5$  cm son consideradas hojarasca y medidas aparte (ver sección “Hojarasca”, p. 30).

Estos límites de tamaño se pueden analizar con técnicas estadísticas y basados en muestreos anteriores o preliminares para optimizar el esfuerzo en el campo y el poder estadístico de los datos recopilados en diferentes tipos de manglar. El único cuidado que se debe tener es que la totalidad de los componentes del ecosistema sean muestreados, para que el inventario sea completo. Las piezas de madera semienterrada ( $> 50\%$  de su diámetro bajo la superficie del suelo) no se toman en cuenta en la medición.

A cada pieza de madera con  $d \geq 7,5$  cm se le asigna una categoría de descomposición (por ejemplo: sólida, en descomposición, podrida) mediante la “prueba del machete” (Penman *et al.* 2003). Esta información se usa posteriormente para calcular la biomasa a partir del volumen obtenido. Se deben tomar entre 20 y 25 muestras de madera de hasta 50 g de cada una de estas categorías para determinar su gravedad específica en el laboratorio (Kauffman *et al.* 2013).

8 Aunque la técnica original utiliza correcciones debidas a la pendiente del terreno y su interacción con la inclinación de las piezas, en el trabajo con manglares se pueden ignorar estas consideraciones porque el terreno es básicamente horizontal y plano.



**Figura 14.** Representación simplificada de un plano de intersección (de 12 m de longitud y 2 m de altura) utilizado para medir piezas de madera caída en bosques de manglar. Para optimizar el trabajo de campo, las piezas de diferente tamaño se miden en segmentos diferentes del transecto principal. Adaptado de Kauffman *et al.* (2013).

## SUELOS

Las muestras de suelo de manglar se extraen con un barreno para suelo no consolidado<sup>9</sup> en un punto ubicado aleatoriamente dentro de la parcela (Figura 8). La superficie del suelo debe estar libre de hojarasca u otro material ajeno que pudiera contaminar la muestra y no debe estar alterada por el tránsito de las personas involucradas en el trabajo (Figura 15). Los núcleos extraídos se separan en intervalos de 0-15, 15-30, 30-50, 50-100, 100-200 y > 200 cm de profundidad (Murdiyaso *et al.* 2009). Para evitar la compactación de los intervalos más superficiales de la muestra, se puede colocar un par de tablas anchas sobre el suelo y trabajar de pie sobre estas para repartir las cargas físicas. Recomendamos además extraer las muestras de diferentes lugares de la parcela.

Para determinar la densidad aparente del suelo, se toma una muestra del centro de cada intervalo de profundidad (Figura 16). El material restante se homogeniza y se lleva una submuestra a un laboratorio analítico para realizar los análisis correspondientes. En el campo, la muestra de densidad aparente se recolecta como una porción de suelo de longitud constante (de 3 cm o más, definida previamente) que se extrae del núcleo de suelo de donde se toma en las parcelas de muestreo (Figura 16). Hay que tener el cuidado extremo de no perder (o agregar) material correspondiente a las muestras de densidad aparente, para no sesgar el cálculo. Cuando el muestreo se realiza en áreas fuera de los manglares y bajo otras coberturas o usos más intensivos, puede ser necesario utilizar otros barrenos más apropiados para suelos consolidados<sup>10</sup>. El barreno para muestreo en manglares se deformará si se usa en estos suelos, por lo que no debe utilizarse allí.

9 2 ½" x 40" Stainless steel gouge auger. AMS Inc. 105 Harrison Street, American Falls, ID 83211-1230, USA. Teléfono: +1-208-226-2017. [www.ams-samplers.com](http://www.ams-samplers.com) Consultado nov. 2017.

10 Single gouge auger set, 1 m hard soils. Product code: 04.01.SB. Eijkelpamp Soil & Water, Nijverheidsstraat 30, 6987 EM Giesbeek, The Netherlands. Teléfono: + 31 313 880200. e-mail: [info@eijkelpamp.com](mailto:info@eijkelpamp.com). <https://en.eijkelpamp.com/products/augering-soil-sampling-equipment/single-gouge-auger-set-b.html> Consultado nov. 2017.



**Figura 15.** Las muestras de suelo de manglar se separan en intervalos de 0-15, 1-30, 30-50, 50-100, 100-200 y > 200 cm de profundidad (marcadas de forma indicativa en la fotografía con líneas amarillas). Para extraer las muestras a > 100 cm de profundidad se requiere de barras de extensión que se acoplan al barreno. Se debe asegurar que la superficie del suelo donde se extrae la muestra esté inalterada. Fotografía: Miguel Cifuentes.



**Figura 16.** Extracción en campo de un volumen conocido de suelo de manglar (izquierda) para el análisis posterior de densidad aparente en el laboratorio. Fotografías: Miguel Cifuentes.



## MANEJO DE LAS MUESTRAS

Hay varios tipos de muestras que se deben recolectar en el campo para su posterior procesamiento, secado, pesado y análisis en un laboratorio. Las muestras de suelo para determinar la densidad aparente son las que conllevan mayor cuidado, seguidas por las de tejido vegetal. A pesar de que una recomendación estándar en el muestreo de suelos es utilizar envases metálicos herméticos para almacenar y preservar la integridad de las muestras de densidad aparente, en el caso de los manglares y otros ecosistemas marino-costeros esta práctica es inadecuada porque el agua salina corroe rápidamente los cilindros y sella las tapas de los mismos, lo cual torna imposible su extracción. Por tanto, y aplicando el mayor de los cuidados para no perder material, recomendamos el uso de bolsas plásticas con sello hermético para almacenar las muestras en el campo y trasladarlas al laboratorio.

En general, recomendamos utilizar una combinación de bolsas de papel y plásticas para almacenar las muestras en campo. Las muestras de tejido vegetal, hojarasca y herbáceas o regeneración pueden almacenarse en bolsas de papel si están secas al tacto. Las muestras de suelo deben ir en bolsas plásticas, de preferencia en doble bolsa. En todo caso, recomendamos tener suficientes bolsas plásticas siempre a mano para cubrir las bolsas de papel en caso de lluvia y para proteger las muestras y evitar pérdida de material durante el traslado de un sitio a otro en el manglar.

Hay que identificar las muestras claramente y con información completa para asegurarnos de que los datos que de ellas se deriven sean asignados correctamente a las parcelas y componentes medidos en campo. Recomendamos desarrollar una nomenclatura para rotular cada muestra. En primer lugar, toda muestra debe ir identificada con al menos la fecha del muestreo, el nombre del lugar de trabajo, el número del transecto y la parcela, y el tipo de muestra. En el caso de las muestras de suelo, también se debe indicar el intervalo de profundidad de donde se extrajo el material. Para simplificar el trabajo, podemos usar códigos numéricos, alfanuméricos o de texto para identificar cada muestra y rotular los recipientes con anticipación (Figura 17). Además de etiquetar las bolsas, recomendamos introducir entre las dos bolsas plásticas una etiqueta escrita de forma indeleble sobre papel impermeable.



**Figura 17.** Almacenamiento y rotulación correctos en el campo de una muestra de suelo de manglar destinada para el análisis de densidad aparente (“dap”). Los códigos corresponden al número de sitio (S), transecto (T) parcela (P), tipo de muestra y el intervalo de profundidad del perfil de suelo al que corresponde (30-50 cm). Nótese la etiqueta de respaldo, escrita con tinta indeleble sobre papel impermeable que se incluye en caso de que la rotulación original se pierda. Fotografía: Miguel Cifuentes.

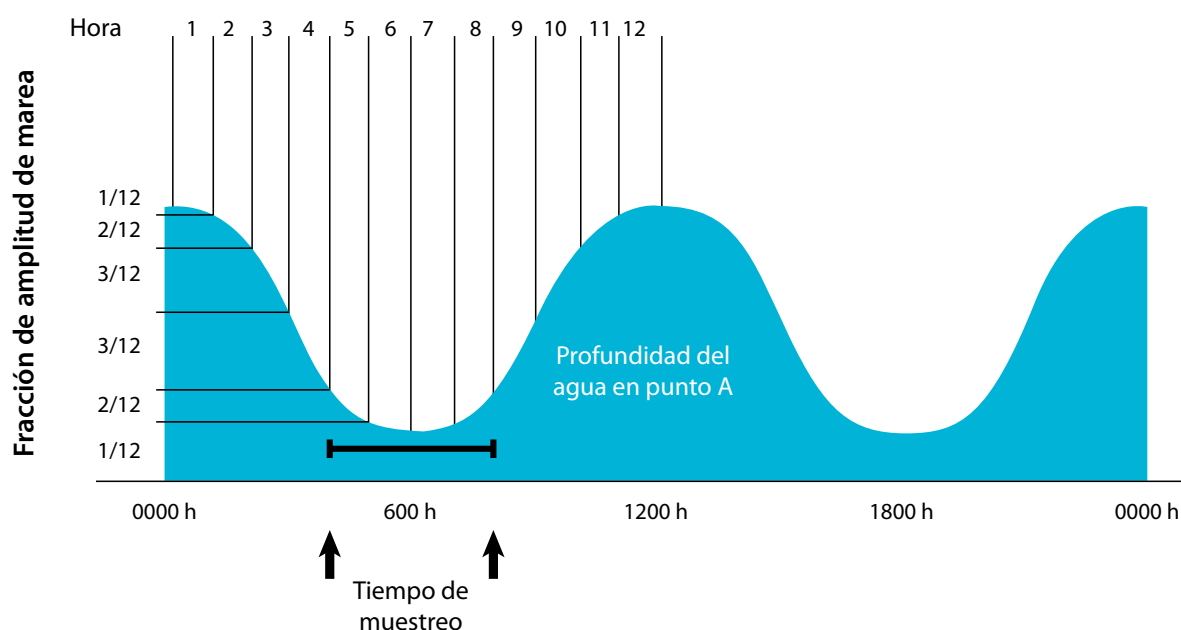
Cuando las muestras recolectadas deban ser transportadas a otro país para su análisis químico, será necesario consultar con las autoridades fitosanitarias y aduanales para determinar cuáles son los requisitos específicos de exportación e importación de las muestras. En general, las muestras deben ir completamente secas, doblemente empacadas en bolsas selladas y rotuladas indicando además que se trata de materiales científicos sin valor comercial. Se recomienda utilizar cajas de plástico resistente para el transporte, ya que las cajas de cartón pueden sufrir daños durante el tránsito.

# PARTICULARIDADES DEL TRABAJO DE CAMPO EN MANGLARES

Los bosques de manglar presentan particularidades que los distinguen de los bosques terrestres y los convierten en ambientes extremadamente desafiantes para trabajar. Esas características influyen en la forma en la cual se planifica y lleva a cabo el trabajo de campo. A continuación, describimos cómo la influencia de las mareas, la ubicación de los sitios, la densidad de la vegetación y otras consideraciones de seguridad deben ser tomadas en cuenta para asegurar que el trabajo de campo se complete con un mínimo de inconvenientes y asegurando la integridad física del personal.

## INFLUENCIA DE LA MAREA

Una de las características más distintivas de los bosques de manglar es la influencia diaria de las mareas. Los ciclos de marea alta y baja, con su entrada y salida de agua y consiguiente variación en el nivel del mar cada 12 horas (Figura 18), impiden o habilitan periódicamente las condiciones propicias para el trabajo de campo. La única forma segura de trabajar adecuadamente en los manglares es durante la marea baja, que ofrece una ventana de entre 3 y 4 horas (Kauffman *et al.* 2013). Sin embargo, dependiendo de la costa y el sitio, en Centroamérica el nivel del mar puede variar desde unos decímetros (costa Caribe) hasta varios metros de altura (costa Pacífico).



**Figura 18.** El ciclo diario de las mareas se repite cada 12 horas, permitiendo una ventana restringida de tiempo para realizar el trabajo de campo. Tomado de Kauffman *et al.* (2013).

Por lo anterior, se debe programar los desplazamientos hacia y desde los sitios de muestreo de forma que la llegada y la salida se hagan en condiciones óptimas para facilitar el desplazamiento y el trabajo. Además, hay que vigilar el ritmo del trabajo del personal para asegurar que este pueda movilizarse y trabajar de forma



segura. Una herramienta útil para planificar de antemano el trabajo de campo son las tablas de marea, que pueden estar disponibles a nivel nacional o, más comúnmente, para sitios específicos (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Ejemplos de tablas de marea para América Central y República Dominicana.

País	Enlace
Belice	<a href="http://www.tablademareas.com/ca/british-columbia/belize-inlet">http://www.tablademareas.com/ca/british-columbia/belize-inlet</a>
Honduras	<a href="http://copeco.gob.hn/Tablas-de-Marea-Semestre-2016">http://copeco.gob.hn/Tablas-de-Marea-Semestre-2016</a>
Guatemala	<a href="http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/pacifico.pdf">http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/pacifico.pdf</a> <a href="http://es.wisuki.com/tide/885/puerto-quetzal">http://es.wisuki.com/tide/885/puerto-quetzal</a> <a href="http://es.wisuki.com/country/gt/guatemala">http://es.wisuki.com/country/gt/guatemala</a>
Nicaragua	<a href="http://www.ineter.gob.ni/tabla.html">http://www.ineter.gob.ni/tabla.html</a> <a href="http://www.ineter.gob.ni/RecursosHidricos/pronostico-mareas.html">http://www.ineter.gob.ni/RecursosHidricos/pronostico-mareas.html</a>
Costa Rica	<a href="https://www.imn.ac.cr/tablas-de-mareas">https://www.imn.ac.cr/tablas-de-mareas</a> <a href="http://www.borbonmarino.com/tablas_marea.html">http://www.borbonmarino.com/tablas_marea.html</a>
Panamá	<a href="http://micanaldepanama.com/servicios/canal-servicios-maritimos/tabla-de-mareas/">http://micanaldepanama.com/servicios/canal-servicios-maritimos/tabla-de-mareas/</a>
El Salvador	<a href="http://www.snet.gob.sv/ver/oceanografia/pronostico/mareas/calendario+de+mareas/">http://www.snet.gob.sv/ver/oceanografia/pronostico/mareas/calendario+de+mareas/</a>

**Nota:** Todos los enlaces incluidos en la tabla consultados nov. 2017.

Como describimos en la sección de “Uso de herramientas satelitales” (p. 60), los sistemas de información geográfica y los servicios de mapas en línea (Google Maps<sup>11</sup>, por ejemplo) son herramientas útiles para ubicar los sitios de estudio y planificar los desplazamientos para coincidir con las mareas.

## SEGURIDAD EN EL TRABAJO DE CAMPO

Como toda ocupación en campo, los inventarios de carbono en manglares conllevan riesgos que deben ser identificados, minimizados y controlados. La seguridad e integridad física de los investigadores y asistentes debe ser una prioridad. Algunas de las recomendaciones descritas a continuación son comunes a cualquier esfuerzo de muestreo y otras son más específicas para manglares. La máxima en seguridad es buscar y fomentar una cultura de “cero riesgos” en el trabajo de campo.

Es importante establecer el cronograma para el trabajo de campo con anticipación y socializarlo con terceros asociados al proyecto o autoridades nacionales de seguridad y policía para que el itinerario diario sea conocido por todos. Aunque es recomendable informar las horas de salida al campo, es aún más importante informar el momento en el que el equipo se encuentra de regreso a la base de operaciones. De esta forma, en el peor de los casos, las personas de contacto pueden poner en marcha una operación de búsqueda y rescate dirigida hacia el sitio de trabajo del día y siguiendo la ruta anticipada.

Ya que el trabajo de campo involucra el traslado en botes pequeños, es indispensable observar las reglas de seguridad en su uso. El bote y su motor deben estar en buen estado, contar con un techo o toldo para brindar sombra y proteger del viento y la lluvia, y cumplir con las regulaciones de la autoridad marítima para la operación. El operador del bote debe estar capacitado para desempeñar ese rol y tener los respectivos seguros. Se debe contar con chalecos salvavidas en buen estado para todo el personal (y establecer la obligatoriedad de su uso), combustible suficiente para al menos cubrir el viaje diario y, en lo posible, un radio de comunicaciones que permita conectarse con los servicios de emergencia costera. Es aconsejable, además, revisar con anticipación los pronósticos del tiempo, observar las alertas de tormenta y evitar navegar bajo condiciones desfavorables.

11 <https://maps.google.com> Consultado nov. 2017.

Durante el trabajo de campo, el personal no debe laborar de forma individual ni alejarse del área de muestreo sin supervisión o compañía. Debemos contar en todo momento con un botiquín básico de primeros auxilios y es deseable que al menos una persona del equipo tenga este tipo de entrenamiento en áreas agrestes. Las heridas y lesiones más frecuentes en el campo son laceraciones, torceduras de tobillo, golpes por caídas y suciedad en los ojos, por lo que el botiquín debe tener suficientes materiales para tratarlas. También es frecuente encontrar abejas y avispas en los manglares, así que es imprescindible hacer lo necesario para evitar un ataque de ese tipo. Debemos saber con anticipación si alguien del personal es alérgico a este y otro tipo de picaduras o alimentos y tener a mano los medicamentos y el conocimiento necesario para brindar tratamiento apropiado y manejar la extracción del paciente para recibir atención más avanzada.

Para minimizar las quemaduras de sol, es recomendable que el personal utilice bloqueador solar, sombrero y ropa adecuada, y camisas de manga larga, pantalones largos y zapatos cerrados para prevenir picaduras de insectos. Debe evitarse el uso de botas de hule en los manglares porque al hundirse en el fango producen un efecto de vacío y en ocasiones es imposible extraerlas del fango. Son preferibles los zapatos cerrados de cordón y con suela áspera para impedir los resbalones.

Aunque una de las técnicas dasométricas consiste en medir el diámetro de los árboles de manglar 30 cm por encima de la última raíz fúlcrea, en la práctica se debe fijar una altura máxima por encima de la cual ningún asistente de campo debe arriesgar su seguridad para obtener una medición (Figura 19). Una caída de una altura considerable puede provocar heridas, fracturas u otras lesiones complicadas de atender en un área remota.

Finalmente, las zonas marino-costeras y, en particular, las áreas de manglares se vienen utilizando con



Figura 19. Como medida de seguridad y si no se cuenta con el equipo adecuado, debe limitarse la altura máxima a la cual se tomarán las mediciones del diámetro de los árboles de manglar. Fotografía: Miguel Cifuentes.

mayor frecuencia para realizar actos ilícitos. Además, hay comunidades rurales costeras que son foco de violencia o delincuencia. Por estas razones, recomendamos informar y coordinar con los servicios de seguridad naval, guardia costera u otras autoridades pertinentes las salidas al campo. Contar con una escolta o presencia de las autoridades no debe ser percibido como un evento extraordinario. Una vez de vuelta al puerto y al hospedaje, se recomienda observar las reglas básicas y de sentido común para prevenir ser víctima cualquier hecho delictivo o violento<sup>12</sup>.

## RECOMENDACIONES PARA OPTIMIZAR EL TRABAJO DE CAMPO

Danilo Torres<sup>13</sup>

Para llevar a cabo las mediciones descritas anteriormente, es necesario organizar el transporte hacia/ desde los sitios, la logística del trabajo, el personal, los materiales y el equipo necesarios. A continuación, ofrecemos algunas recomendaciones prácticas basadas en las experiencias adquiridas luego de realizar inventarios de carbono azul en varios países de Centroamérica.

### *Previo al trabajo de campo*

Antes de salir al campo, se deben introducir las coordenadas de los sitios escogidos en un GPS. De esta forma se facilita el tránsito y la ubicación exacta de los sitios de muestreo dentro del manglar. Además, debe prepararse el equipo y los materiales necesarios para la recolección de los datos. El equipo utilizado incluye GPS, brújula, clinómetro, pie de rey, barreno, marcos de área fija hechos de PVC, cámara fotográfica, cintas topográficas (de 50 o 100 m de longitud), cuchillo, cinta métrica o cuerda con marcas a distancias preestablecidas y coincidentes con los tamaños de parcela y longitud de los transectos de madera caída, cinta diamétrica, tijeras podadoras y báscula manual, entre otros (ver lista completa de materiales en el Anexo 1). Los materiales mínimos son: libretas o formularios de campo, lápices, lapiceros, marcadores, tabla de apuntar, bolsas plásticas para recolectar sedimentos y herbáceas, recipiente para el traslado de las muestras recolectadas, y etiquetas debidamente rotuladas.

### *Trabajo de campo*

Hemos encontrado que el trabajo de campo se optimiza con un equipo de cinco personas. La persona líder será la encargada de tomar los puntos de GPS, llevar el azimut del transecto, tomar las fotografías y anotar los datos, además de coordinar el trabajo de los demás y vigilar que los procedimientos se desarrollen adecuadamente. Dos personas miden los árboles, la madera caída y la regeneración o las herbáceas. Finalmente, dos personas se asignan para la recolección de las muestras de sedimentos. Ocasionalmente, las responsabilidades pueden rotarse para no convertir los procesos en rutina o para optimizar el trabajo en el campo.

Cuando se llega al sitio de muestreo, la primera operación es tomar el punto de GPS al inicio del transecto

12 El Departamento de Seguridad de las Naciones Unidas ofrece dos cursos gratis en línea sobre procedimientos de seguridad en el campo. Para obtener más información y matricularse, visitar el sitio web: <https://training.dss.un.org/> Consultado nov. 2017.

13 Lic. Danilo Torres Gómez. Ingeniero Forestal y Regente forestal y Ambiental. Cartago, Costa Rica. e-mail: [danilotorres88@hotmail.com](mailto:danilotorres88@hotmail.com). Tel. +(506) 8631-4975.

(orilla del estero). Luego, con la brújula se determina el azimut del transecto (perpendicular al estero) y se procede a establecer el transecto de 150 metros de longitud, en incrementos de 25 m para coincidir con la ubicación del centro de las parcelas circulares. El centro de cada parcela se marca con cinta topográfica para facilitar su localización. Llegados al centro de la Parcela 1 se toma el punto de GPS y se retoma el azimut original para nuevamente guiar a la persona con la cinta métrica y así llegar al centro de la Parcela 2. Este proceso se repite hasta llegar al centro de la Parcela 6, donde termina el transecto de medición. Paralelamente al establecimiento del transecto, las demás personas llevan el equipo y materiales que se van a utilizar.

Establecido el transecto y ubicado el equipo de trabajo en el centro de la Parcela 6, se inicia con el muestreo. Recomendamos que la persona que anota los datos se quede en el centro de la parcela, mientras dos personas delimitan la parcela con cinta topográfica, montan y miden los cuatro subtransectos de madera caída y, por último, miden el diámetro de los árboles vivos y muertos  $\geq 5$  cm. Las otras dos personas se dedican al muestreo de sedimentos; una es responsable de extraer los núcleos de suelo y trasladar el barreno y la otra se encarga de recolectar, etiquetar (rotular las bolsas y las etiquetas respectivas) y trasladar las muestras en el campo. Una vez finalizado el muestreo en la Parcela 6, el equipo se traslada de parcela en parcela y completa las mediciones y recolección de muestras hasta el inicio del transecto.

Completar las mediciones y recolectar todas las muestras en cada parcela normalmente toma de 30 a 40 minutos. Es importante mantener este ritmo de trabajo para evitar que la entrada de la marea alta obstaculice terminar el trabajo del día. En estratos de mangle alto e intermedio, las personas que extraen las muestras de suelo son quienes demoran más en su trabajo, por lo que el resto del personal usualmente avanza sobre el transecto para iniciar en la siguiente parcela. Por el contrario, en sitios con mangle enano o chaparro, el trabajo de quienes realizan las mediciones dasométricas y de madera caída es mucho más demorado debido a la mayor densidad de los árboles y la cantidad de variables por recopilar (altura de copa, ancho de copa, altura total y diámetro a 30 cm). En esos casos, puede ser necesario que el personal dedicado a las mediciones de suelos, al terminar sus tareas, dedique tiempo a la medición de árboles, y viceversa.

### *Posterior al trabajo de campo*

Terminado el muestreo de campo y de regreso en el hospedaje, cada persona es responsable de limpiar o lavar con agua dulce el equipo que usó, y secarlo y aceitarlo o engrasarlo, según corresponda, para evitar el óxido. Las muestras de suelo recolectadas se colocan en un lugar seguro, donde no haya interacción con factores externos que las puedan contaminar. Además, se deben secar lo antes posible o, de carecer de hornos para tal propósito en el sitio, congelarlas para evitar la descomposición que se da rápidamente por los altos contenidos de materia orgánica. Los mismos cuidados aplican para las muestras de tejido vegetal. Los datos recolectados en campo deben ser digitalizados para tener un respaldo y enviados a un correo electrónico para evitar cualquier pérdida de información. Para cerrar el día, se planifican las actividades del día siguiente y se prepara el equipo nuevamente.

El procesamiento de muestras de suelos y tejido vegetal para realizar los análisis químicos de carbono (y nitrógeno) total son un paso fundamental en la cuantificación del carbono en manglares. Por tratarse de procesos de química analítica, el apego a estándares y procesos de esos laboratorios es fundamental. En general, para el trabajo con carbono azul, nos preocupamos por dos análisis de laboratorio principales: la determinación de la densidad aparente del suelo y la determinación del carbono orgánico total. Para realizarlos, se necesita desarrollar una serie de pasos que describimos en esta sección. Para ampliar sobre la teoría subyacente de estos métodos, se puede consultar el manual clásico de Soil Survey Staff (1996).

## ANÁLISIS DE LA DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente relaciona un volumen conocido de suelo con su peso seco y es una variable crítica para calcular la densidad de carbono en suelos de manglar. Cualquier error en su determinación —desde el campo hasta el laboratorio— puede sesgar considerablemente su magnitud y, por ende, incidir gravemente en los valores finales de carbono.

Para determinar el volumen de la muestra extraída en campo, previamente se rellena el barreno con material para moldear (arcilla o plastilina sintética), se extrae la muestra tal como se haría en el campo y se determina su volumen con una probeta graduada de tamaño adecuado. Recomendamos repetir este procedimiento a lo largo del barreno, al menos 10 veces por cada intervalo de profundidad del que se extraerá la muestra, para obtener estimados robustos.

Las muestras de densidad aparente se trasvasan en el laboratorio a un recipiente adecuado y se secan a 110 °C por 24 horas. Una vez secas, se pesan en balanza analítica y el resultado se utiliza para calcular la densidad aparente en unidades de  $\text{g}\cdot\text{cm}^3$ . Dado que estas muestras se secan por encima de la temperatura crítica de volatilización de compuestos nitrogenados, no pueden ser utilizadas para análisis posteriores, a menos que el interés único del estudio sea el carbono orgánico total.

## ANÁLISIS DE C Y N TOTAL

Hay diversos métodos analíticos que permiten determinar las concentraciones de carbono en muestras de suelos o de tejido. Para los manglares, el preferido es la combustión seca total, generalmente en aparatos autoanalizadores diseñados para ese tipo de análisis (Nelson y Sommers 1996). Este método permite determinar el porcentaje de concentración de carbono orgánico total sin tener que disponer de desechos líquidos, tóxicos o corrosivos. En el mercado existen equipos que determinan simultáneamente carbono y nitrógeno total como parte del mismo proceso de análisis. Estos ofrecen la ventaja de ser fáciles, rápidos, precisos y reproducibles.

Debido a que cada aparato autoanalizador de combustión seca presenta particularidades de diseño, instalación y uso, a continuación describimos solamente los pasos estandarizados más importantes para

---

14 Patricia Leandro Montoya. Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Tejido Vegetal y Aguas. Programa de Agricultura, Ganadería y Agroforestería. 7170 CATIE; Turrialba, Cartago, 30501; Costa Rica. e-mail: [pleandro@catie.ac.cr](mailto:pleandro@catie.ac.cr). Tel. +(506) 2558-2377



preparar las muestras de suelos y de tejido vegetal para este análisis. Sugerimos consultar el manual del equipo por utilizar y obtener asesoría y entrenamiento directamente con el fabricante antes de proceder con los análisis. Será necesario realizar pruebas previas para encontrar las curvas de calibración y pesos de la muestra más adecuados para cada aparato y circunstancia de análisis.

### Preparación de las muestras de suelos y sedimentos

La muestra que se recibe en el laboratorio —aproximadamente 100 g de muestra fresca— se codifica para el ingreso a la cadena de custodia e inicio del proceso de análisis (Figura 20). La muestra se seca al aire o en horno a 40 °C, hasta que al agitarla ligeramente desprenda polvo. Una vez seca, se morteriza y pasa por un tamiz de abertura de 2 mm (ASTM 10). Todo lo que quede en el tamiz de 2 mm luego de morterizar la muestra se desecha. También se puede utilizar el molino para suelo con tamiz de 2 mm para realizar este proceso. Después de que la muestra se homogeniza y tamiza por malla de 2 mm se debe tomar una alícuota para tamizarla por una malla de 0,250 mm (ASTM 60) antes de ser analizada (Figura 21). Esta submuestra debe morterizarse hasta que pase toda por el tamiz de 0,250 mm. En este paso no debe desecharse material. Las muestras tamizadas por 0,250 mm se secan a 60 °C por al menos 24 horas y se conservan secas antes del análisis.



**Figura 20.** Ejemplos de etiquetas de muestras de suelo de manglares en el momento en el que se reciben en el laboratorio (arriba) y una vez ingresadas a la cadena de custodia del mismo (abajo). Fotografías: Miguel Cifuentes.



**Figura 21.** Morterizado de muestras de suelos de manglar y tamices estándar de dimensión ASTM 10 (2 mm) y ASTM 60 (0,250 mm) utilizados para homogenizar las muestras. Fotografías: Miguel Cifuentes

Para el análisis se pesa la muestra seca en una cápsula de estaño especial para la combustión (Figura 22). Este peso depende de la configuración del equipo y del contenido de carbono en la muestra, lo que se determina mediante análisis previos. Para ese proceso es importante considerar que el contenido de carbono en la muestra se encuentre entre los límites de detección del aparato analizador y que la relación entre el peso de la muestra y el oxígeno para la combustión sea la adecuada. Luego de pesar la muestra, se cierra la cápsula cuidadosamente para no romperla. La cápsula cerrada no debe contener aire y no debe manipularse con las manos directamente para evitar contaminación gaseosa y de naturaleza orgánica. Por eso, durante el proceso, se debe utilizar pinzas y guantes. La balanza analítica utilizada debe tener una precisión de 0,1 mg (Figura 22).

### *Tratamiento de muestras que contienen carbonatos*

Normalmente las muestras de suelos orgánicos no contienen carbono inorgánico. Si se tiene alguna evidencia de la presencia de carbono inorgánico, previo al análisis se digiere con HCl 50% para disolver los carbonatos. Para verificar la presencia de carbonatos en la muestra de suelo (procesada como se describió anteriormente) se adiciona unas gotas de HCl 10% a una pequeña porción de muestra. Si la muestra presenta carbonatos se observará efervescencia por presencia de CO<sub>2</sub>. El análisis se realiza de la misma forma descrita en la sección posterior “Método de combustión total” (p. 46) y el resultado se reporta como porcentaje (%) de carbono orgánico total.





**Figura 22.** Pesado de muestras de suelo de manglar con balanza analítica de alta precisión (izquierda). Las muestras se colocan herméticamente dentro de pequeñas cápsulas de estaño (derecha) durante el pesado y en preparación para el posterior análisis. Fotografías: Miguel Cifuentes

### *Preparación de las muestras de material vegetal*

La muestra que ingresa del campo se seca a 65 °C hasta peso constante. Luego se muele en molino para material vegetal con una malla de  $\leq 1$  mm, se homogeniza y mantiene seca antes del análisis (Figura 23). Se pesa la muestra en una cápsula de estaño para la combustión (este peso depende de la configuración del equipo; Figura 22). El contenido de carbono en material vegetal es alto comparado con los contenidos para suelos, por lo que el peso de muestra y la curva de calibración deben ajustarse para que los valores detectados se ubiquen entre los valores de la curva y entre los límites de detección del equipo. Las unidades resultantes son las mismas que para los suelos (se puede encontrar información complementaria en Mills y Jones 1996).



**Figura 23.** Molino analítico utilizado para moler muestras de tejido vegetal (izquierda). Ejemplo de un tamiz estándar para uso en el molino de tejido vegetal (derecha). Fotografías: Miguel Cifuentes.

### Método de combustión total

El método de combustión total consiste en oxidar la muestra en un reactor de alta temperatura<sup>15</sup> en presencia de gas oxígeno de alta pureza. Los productos de dicha oxidación son gases y agua. Con una corriente de arrastre de helio los productos de oxidación pasan por un catalítico que remueve halógenos y óxidos de azufre. Luego pasan por un reactor-reductor que elimina el exceso de oxígeno. Los compuestos específicos para estas funciones no se detallan aquí porque dependen del tipo de aparato analizador y la metodología exacta que se utilice. El exceso de agua es retenido con un absorbente antes de pasar por la columna cromatográfica que separa el CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. Los gases son detectados por un diferencial de microcorrientes usando un detector de conductividad térmica y reportados como carbono y nitrógeno (Figura 24). Si no se requiere nitrógeno antes de pasar por la columna cromatográfica, puede ser eliminado mediante un absorbente específico. En el mercado se encuentran diferentes marcas de equipos para determinar el carbono y/o carbono y nitrógeno simultáneamente por el método de combustión. Las variantes en la configuración y la detección dependen de la marca y el modelo (en el caso particular ejemplificado en la Figura 24, la detección se hace por conductividad térmica).



**Figura 24.** Aparato autoanalizador de carbono y nitrógeno total marca ThermoFinnigan, modelo Flash EA 1112 Series<sup>16</sup>, instalado en el laboratorio analítico de CATIE, en Costa Rica (izquierda). Detalle de los componentes internos del autoanalizador: estufa y columnas reactoras (centro) y desecante y detector de conductividad térmica o cromatográfica (derecha). Fotografías: Miguel Cifuentes y Patricia Leandro.

15 Dependiendo del método y el aparato exacto que se utilice, la temperatura de combustión varía entre 900 y 1450 °C (Soil Survey Staff 1996).

16 ThermoScientific (2001).

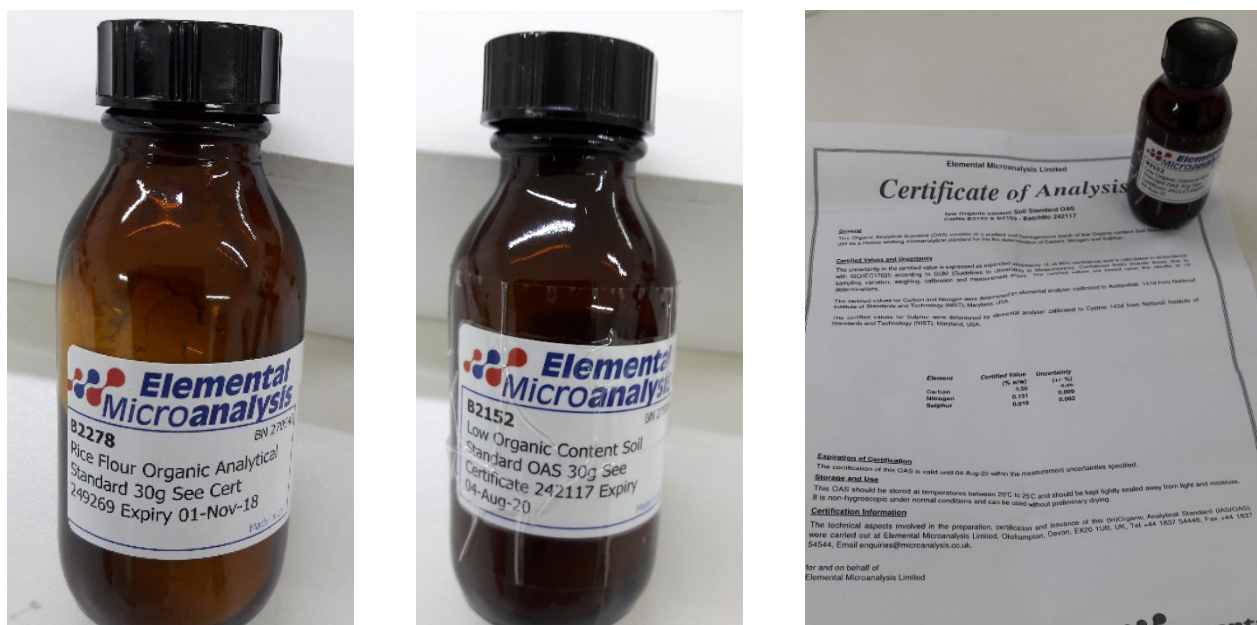


## Control de calidad para los análisis

Es importante para garantizar la calidad y veracidad en los resultados contar con un sistema de control de calidad estricto y consistente. Este debe incluir una cadena de custodia de la muestra que garantice su trazabilidad, materiales de control certificados que aseguren la veracidad de resultados, y procesos estadísticos que nos alerten si hubiesen resultados fuera de rango.

Como primer paso de la cadena de custodia de las muestras, al ingreso de las mismas se procede a identificarlas con los códigos propios del laboratorio, adicional a la identificación asignada por el cliente. Con este código se le da seguimiento a la muestra en cada paso del análisis. Así, por ejemplo, el orden de ingreso de una muestra determina su orden de procesamiento, pesado y posterior análisis y reporte (Figura 20).

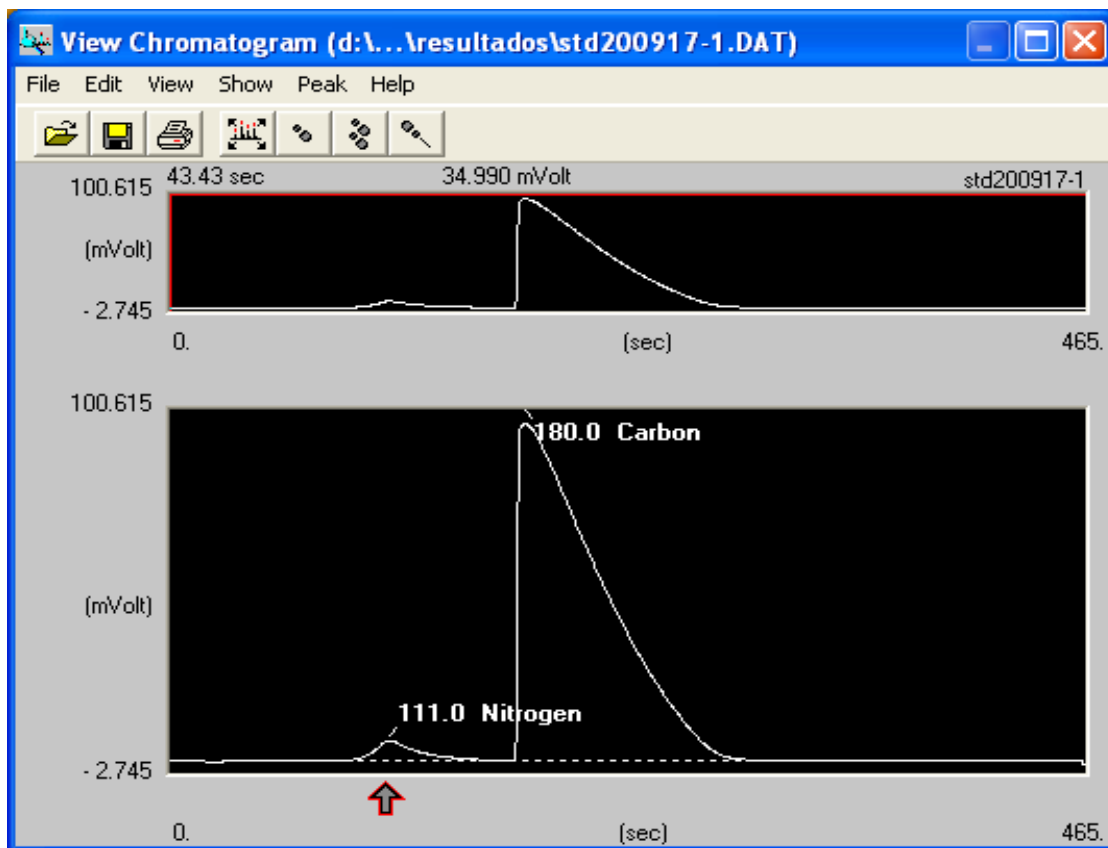
El laboratorio debe contar con muestras de control certificadas para suelo y material vegetal que aseguren la veracidad de los resultados durante el proceso de análisis. Estas muestras se obtienen de proveedores internacionales y presentan concentraciones de ciertos elementos conocidas con alto grado de exactitud (Figura 25). También es recomendable estar incorporados a un programa de intercambio de muestras control nacional o internacional (por ejemplo, el International Plant Analytical Exchange - WEPAL<sup>17</sup>), para ejercer un control cruzado adicional con otros laboratorios. Los productos de los análisis obtenidos por medio de estos programas de intercambio permiten verificar la veracidad de los resultados y refuerzan su fiabilidad. No es inusual que los investigadores envíen un pequeño lote de muestras a otros laboratorios o que las incluyan como muestras “incógnitas” dentro de un mismo análisis.



**Figura 25.** Estándares químicos de control internacional utilizados para la calibración de los aparatos de análisis de carbono orgánico total. Fotografías: Miguel Cifuentes.

17 Para más información, puede visitar el sitio web de WEPAL (<http://www.wepal.nl/>) o escribir al correo electrónico [info.wepal@wur.nl](mailto:info.wepal@wur.nl).

Es importante que en cada corrida de análisis se incluyan muestras “blanco” y de control de cantidad de carbono conocida para verificar inicialmente el funcionamiento del equipo. En ciertos equipos, es necesario además construir curvas de calibración con materiales estándar que fijan el rango de concentración dentro del cual los resultados son válidos (Figura 26). Independientemente del equipo utilizado, recomendamos que cada 10 muestras (o el número que convenga según la cantidad de muestras) se incluya una muestra control para verificar los resultados. Los valores de carbono de las repeticiones de las muestras control deben estar entre los niveles de la estadística. Lo que sucede es que, según el tipo de muestra, los consumibles de los reactores se desgastan más rápido dentro del aparato autoanalizador, y la eficiencia de los análisis puede disminuir. Cuando esto se detecta como valores fuera del rango esperado, se debe detener los análisis y realizar el mantenimiento habitual de los aparatos, según dicten los manuales del fabricante. Adicional a estos procesos de control de calidad, se debe observar estrictamente los cuidados habituales que todo laboratorio analítico debe tener.



**Figura 26.** Ejemplo de curvas de detección de carbono y nitrógeno obtenidas a partir de un analizador automatizado de carbono y nitrógeno total.

# CÁLCULO DE LAS EXISTENCIAS DE BIOMASA Y CARBONO

Para determinar la biomasa y el carbono almacenados en los manglares se procede secuencialmente calculando las densidades de biomasa y carbono<sup>18</sup> de cada uno de los componentes del ecosistema por separado. En primera instancia se obtienen los valores de biomasa, que luego se convierten a unidades de carbono o, inclusive, de CO<sub>2</sub>. Posteriormente, a través de la sumatoria de todas las cantidades parciales calculadas, se obtiene el valor de la existencia total de biomasa y carbono de todo el ecosistema. En esta sección describimos este proceso y damos recomendaciones para realizar los cálculos correspondientes. La misma información del inventario realizado puede utilizarse para desarrollar análisis florísticos y de estructura de los bosques. Como esos temas han sido ampliamente desarrollado por otros autores, no los abordamos aquí.

## BIOMASA DE ÁRBOLES

Las mediciones de diámetro y altura que se toman en el campo en las parcelas de 7 y 2 m de radio se utilizan como base para calcular la biomasa de los árboles a partir de ecuaciones alométricas. Estas son relaciones matemáticas que relacionan las dimensiones de los árboles con sus valores equivalentes de biomasa. Pueden estar construidas para estimar la biomasa total de un árbol completo (Fromard *et al.* 1998, por ejemplo) o para estimar la biomasa de sus componentes por separado (Smith y Whelan 2006, por ejemplo). Lo ideal es contar con ecuaciones alométricas construidas específicamente para las especies de árboles presentes en el área donde se realizan las mediciones (IPCC 2003) porque se ha demostrado que la alometría de los manglares es dependiente de la especie más que del sitio (Komiyama *et al.* 2008), aunque la fisionomía de los árboles, la densidad de la madera y la composición de especies sí varía según la ubicación geográfica (Howard *et al.* 2014). Describir los pasos para construir las ecuaciones localmente va más allá del ámbito de este manual, pero hay guías internacionales de buenas prácticas que detallan ese proceso (Picard *et al.* 2012, Cifuentes *et al.* 2014).

Si no se cuenta con ecuaciones desarrolladas localmente, se procede jerárquicamente y se utilizan ecuaciones construidas para el mismo país, región, o para condiciones bioclimáticas similares, y que estén reportadas en la literatura (Cintrón y Schaffer-Novelli 1984, Tamai *et al.* 1986, Day *et al.* 1987, Clough *et al.* 1989, Imbert y Rollet 1989, Tam *et al.* 1995, Fromard *et al.* 1998, Komiyama *et al.* 2000, Ross *et al.* 2001, Saenger 2002, Pongparn 2003, Coronado-Molina *et al.* 2004, Ong *et al.* 2004, Comley y McGuinness 2005, Komiyama *et al.* 2005, Smith y Whelan 2006, Komiyama *et al.* 2008, Kauffman y Cole 2010, Kauffman *et al.* 2013). En última instancia, y por su uso tan extendido, se pueden utilizar ecuaciones publicadas para uso global (Châve *et al.* 2005 y Komiyama *et al.* 2005; Cuadro 3).

Actualmente se cuenta con un número muy reducido de ecuaciones alométricas construidas específicamente para el continente americano (Cifuentes-Jara *et al.* 2013<sup>19</sup>). Los estudios de Cintrón y Schaffer-Novelli (1984, en Puerto Rico), Day *et al.* (1987, México), Fromard *et al.* (1998, Guyana Francesa), Ross *et al.* (2001), Soares y Schaffer-Novelli (2005), y Smith y Whelan (2006, Florida) constituyen la excepción (Cuadro 3).

18 La densidad de carbono está dada en unidades de Mg·ha<sup>-1</sup> (megagramos o toneladas métricas por hectárea). Para calcular estas unidades, se relaciona la biomasa calculada para una parcela circular con la de 1 ha por medio de una regla de tres.

19 La base de datos global de ecuaciones alométricas está disponible en línea en: [www.globallometree.org](http://www.globallometree.org) Consultado nov. 2017.

**Cuadro 3.** Ecuaciones alométricas recomendadas para el cálculo de biomasa total de árboles (en kilogramos) de las especies de manglar más comunes de Centroamérica.

Ecuación	$r^2$	$n$	Diámetro (cm)	Referencia
<b>Biomasa sobre el suelo</b>				
<i>Avicennia germinans</i>				
$B_{\text{tss}} = 0,14 * \text{dap} * h^{2,4}$	0,97	25	4,5-42,0	Fromard <i>et al.</i> (1998)
$\log_{10}(B_{\text{tss}}) = -1,1242 + 0,641 * \log_{10}(h)$	0,921		0,7-21,5	Smith y Whelan (2006)
$\log_{10}(B_{\text{tss}}) = -0,395 + 1,934 * \log_{10}(\text{dap})$	0,951		0,7-21,5	Smith y Whelan (2006)
$\log_e(B_{\text{tss}}) = -1,5852 + 2,3023 * \log_e(\text{dap})$	0,97	10	1-10	Day <i>et al.</i> (1987)
<i>Laguncularia racemosa</i>				
$B_{\text{tss}} = 0,1023 * \text{dap}^{2,5}$	0,97	70	1,5-9,6	Fromard <i>et al.</i> (1998)
$\log_{10}(B_{\text{tss}}) = -1,355 + 2,585 * \log_{10}(h)$	0,973		0,5-18	Smith y Whelan (2006)
$\log_{10}(B_{\text{tss}}) = -0,441 + 1,930 * \log_{10}(\text{dap})$	0,977		0,5-18	Smith y Whelan (2006)
$\log_e(B_{\text{tss}}) = -1,5919 + 2,1924 * \log_e(\text{dap})$	0,97	10	1-10	Day <i>et al.</i> (1987)
$B_{\text{tss}} = (-441,05021 + 464,47815 * (\text{dap})^2 - 645,89716 * (h)) / 1000$	0,975	78	<22	Soares y Schaffer-Novelli (2005)
$B_{\text{tss}} = (1645,12584 + 40,09963 * (\text{dap}^2 * h)) / 1000$	0,951	78	<22	Soares y Schaffer-Novelli (2005)
<i>Rhizophora mangle</i>				
$\log_{10}(B_{\text{tss}}) = -0,769 + 2,357 * \log_{10}(h)$	0,931		0,5-20	Smith y Whelan (2006)
$\log_{10}(B_{\text{tss}}) = -0,112 + 1,731 * \log_{10}(\text{dap})$	0,937		0,5-20	Smith y Whelan (2006)
$\log_e(B_{\text{tss}}) = -1,5605 + 2,5072 * \log_e(\text{dap})$	0,94	10	1-10	Day <i>et al.</i> (1987)
$\ln(B_{\text{tss}}) = (4,89219 + 2,61724 * \ln(\text{dap})) / 1000$	0,991	78	<22	Soares y Schaffer-Novelli (2005)
$\ln(B_{\text{tss}}) = (17,79752 - 20,74652 * (G) + 1,34908 * \ln(G)) / 1000$	0,993	78	<22	Soares y Schaffer-Novelli (2005)
<i>Rhizophora spp.</i>				
$B_{\text{tss}} = 128,2 * \text{dap}^{2,6}$	0,92	9	1,3-32	Fromard <i>et al.</i> (1998)
<b>Raíces fúlcreas</b>				
<i>Rhizophora mangle</i>				
$\log_{10}(R_f) = 0,160 * \log_{10} * \text{dap} - 1,041$	0,821		0,5-20	Smith y Whelan (2006)
$\log_e(R_f) = -4,4565 + 3,1828 * \log_e(\text{dap})$	0,83	10	1-10	Day <i>et al.</i> (1987)
<b>Ecuaciones generales para bosques de manglar</b>				
$B_{\text{tss}} = 0,168 * \rho * \text{dap}^{2,47}$	0,99	84	<50	Châve <i>et al.</i> (2005)
$B_{\text{tss}} = 0,251 * \rho * \text{dap}^{2,46}$	0,98	108	<49	Komiyama <i>et al.</i> (2008)
$B_f = 0,199 * \rho^{0,899} * \text{dap}^{2,22}$	0,95	26	<45	Komiyama <i>et al.</i> (2005)



Mangle enano o “chaparro”				
<i>Rhizophora mangle</i>				
$B = 125,9571 * d_{30}^2 * h^{0,8557}$	0,99	26	<15,4	Cintrón y Shaeffer-Novelli, 1984
$\ln(B_{\text{tss}}) = (2,528 + 1,129 * \ln(d_{30}^2) + 0,156 * \ln(V_c)) / 1000$	0,943	53	<40	Ross <i>et al.</i> 2001
<i>Avicennia germinans</i>				
$B_{\text{tss}} = 0,2004 * \text{dap}^{2,1}$	0,82	45	1,5-3,5	Fromard <i>et al.</i> (1998)
$\ln(B_{\text{tss}}) = (2,134 + 0,895 * \ln(d_{30}^2) + 0,184 * \ln(V_c)) / 1000$	0,989	21	<40	Ross <i>et al.</i> 2001
<i>Laguncularia racemosa</i>				
$\ln(B_{\text{tss}}) = (1,095 + 0,659 * \ln(D_{30}^2) + 0,304 * \ln(V_c)) / 1000$	0,980	44	<40	Ross <i>et al.</i> 2001

**Nota:** Para obtener las ecuaciones parciales para los componentes de los árboles (fuste, ramas, hojas, raíces), consultar las referencias originales o Kauffman *et al.* (2014).  $B_{\text{tss}}$ : biomasa total sobre el suelo (kg);  $R_f$ : raíces fúlcreas (kg);  $\text{dap}$ : diámetro del tronco a la altura del pecho, medido a 1,30 m del suelo (cm);  $d$ : diámetro del tronco (cm);  $d_{30}$ : diámetro del tronco medido a 30 del suelo (cm);  $B_s$ : biomasa bajo el suelo (raíces; kg);  $G$ : área basal;  $h$ : altura (m);  $V_c$ : volumen de copa).

Hay diversos estudios que han publicado datos de la gravedad específica de la madera para especies de manglares (Cuadro 4), aunque en la literatura internacional los datos de América Central no son prominentes. Por tanto, hacemos hincapié acerca de la importancia de recolectar muestras de madera y determinar su gravedad específica como parte rutinaria de los inventarios que se realicen en la región. Para obtener la gravedad específica de otras especies de árboles que crecen asociadas a los manglares o en sus áreas de transición a tierra firme, sugerimos consultar las bases de datos de Châve *et al.* (2006), Zanne *et al.* (2009) y Cifuentes Jara *et al.* (2017).

**Cuadro 4.** Gravedad específica de la madera para especies de manglar presentes en el continente americano.

Especie	Densidad (g·cm <sup>3</sup> )	Ubicación	Fuente
<i>Avicennia germinans</i>	0,578		Châve <i>et al.</i> (2006)
	0,90	Puerto Rico	Little <i>et al.</i> (1964)
	0,792	Guyana	Fanshawe (1961)
	0,75	Sudamérica	Zanne <i>et al.</i> (2009)
	0,67	Guyana Francesa	Detienne <i>et al.</i> (1982)
	0,77	Surinam	Vink (1983)
<i>Avicennia tonduzii</i>	0,64	Costa Rica	Malavassi (1992)
<i>Conocarpus erectus</i>	1,00	Puerto Rico	Little <i>et al.</i> (1964)
<i>Laguncularia racemosa</i>	0,61		Châve <i>et al.</i> (2006)
	0,60	Puerto Rico	Little <i>et al.</i> (1964)
	0,62	Guyana Francesa	Detienne <i>et al.</i> (1982)
<i>Rhizophora harrisonii</i>	0,91		Châve <i>et al.</i> (2006)
	0,84	Costa Rica	Malavassi (1992)
	0,88	Brasil	Dettienne y Jacquet (1983)

Especie	Densidad (g·cm <sup>3</sup> )	Ubicación	Fuente
<i>Rhizophora mangle</i>	0,86		Châve <i>et al.</i> (2006)
	0,89	Sudamérica	Chudnoff (1984)
	0,84	Costa Rica	Malavassi (1992)
	1,05	Puerto Rico	Little <i>et al.</i> (1964)
	0,904	Guyana	Fanshawe (1961)
	0,88	Guyana Francesa	Detienne <i>et al.</i> (1982)
<i>Rhizophora racemosa</i>	0,88		Châve <i>et al.</i> (2006)
	0,88	Guyana Francesa	Detienne <i>et al.</i> (1982)

Para calcular la biomasa de árboles muertos se procede de la misma manera indicada anteriormente y se usa el valor del estado de descomposición (Figura 9) como un factor de corrección final.

### Biomasa de raíces

Un último aspecto por considerar al calcular la biomasa de los árboles son los componentes de estos (fuste, ramas, hojas, flores, frutos, raíces fúlcreas y subterráneas) incluidos en los datos utilizados para construir las ecuaciones alométricas. Con algunas excepciones (Cuadro 3), la gran mayoría de los estudios disponibles y citados anteriormente se enfocan en la biomasa sobre el suelo, por los grandes desafíos logísticos que involucra cosechar la biomasa subterránea de raíces en un bosque de manglar. Esto implica que para tener un estimado de la biomasa total de los árboles, se debe utilizar ecuaciones alométricas separadas para la porción sobre el suelo (fuste, ramas, hojas, raíces fúlcreas) y bajo el suelo (raíces subterráneas) de cada árbol y luego sumar los resultados parciales. Por ejemplo, Soares y Schaffer-Novelli (2005) construyeron tres ecuaciones de biomasa con base en cuatro categorías distintas de raíces (leñosas, no leñosas, emergentes y aéreas). De usar solo una de estas ecuaciones, los estimados de biomasa de raíces estarían incompletos y subestimados.

Además de las fuentes originales citadas mencionadas anteriormente y en el Cuadro 3, Kauffman *et al.* (2001) y Komiyama *et al.* (2008) presentan ecuaciones específicas a las raíces de los árboles de mangle. Al igual que con cualquier otra ecuación alométrica, sugerimos buscar las publicaciones originales para asegurar que los cálculos que estemos realizando sean completos y no sobreestimen o subestimen<sup>20</sup> los resultados.

### Biomasa en manglares enanos (“chaparros”)

Los manglares enanos requieren un tratamiento especial para calcular su biomasa debido a su particular fisionomía (Figura 1). Las ecuaciones alométricas disponibles para este tipo de manglares (Cuadro 3) requieren del diámetro de los árboles, medido a 30 cm sobre el suelo o sobre las raíces fúlcreas ( $d_{30}$ ), su altura ( $h$ ), medida desde el suelo hasta el extremo más alto de la copa y el volumen de la copa. Para calcular esta última variable en el campo se debe medir la altura de la copa, desde la base de la copa hasta el ápice, y el área de la copa. El área de la copa, a su vez, se calcula con base en la fórmula del área de un elipsoide, usando dos diámetros de la copa ( $W_1$  y  $W_2$ ; Figura 11) medidos perpendicularmente entre sí:

$$\text{Área (elipsoidal) de la copa} = \left( \frac{W_1 * W_2}{2} \right)^2 * \pi$$

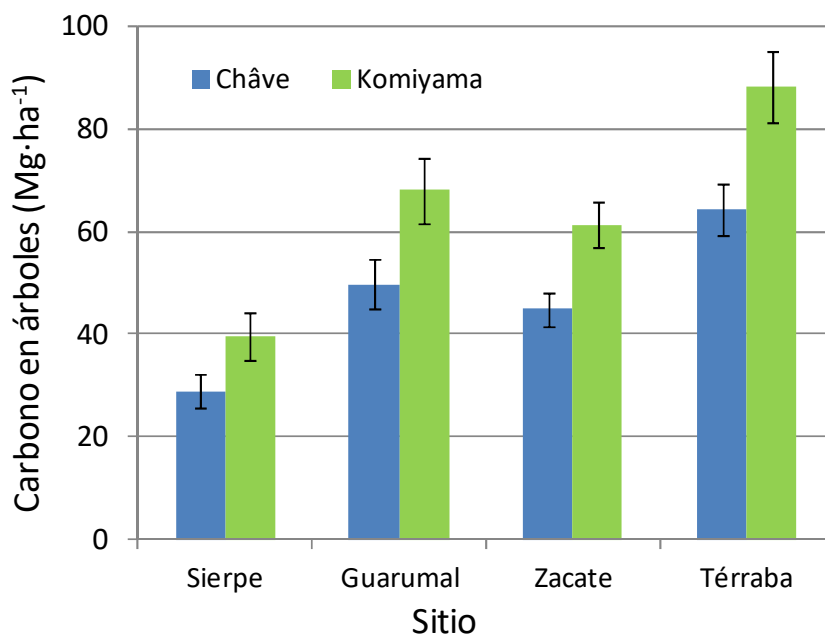
<sup>20</sup> La subestimación, en el contexto de la cuantificación de carbono es consistente con los principios de conservadurismo, así que representa un problema relativamente menor comparada con la sobrestimación.

### Efecto de la selección de los modelos alométricos sobre la biomasa

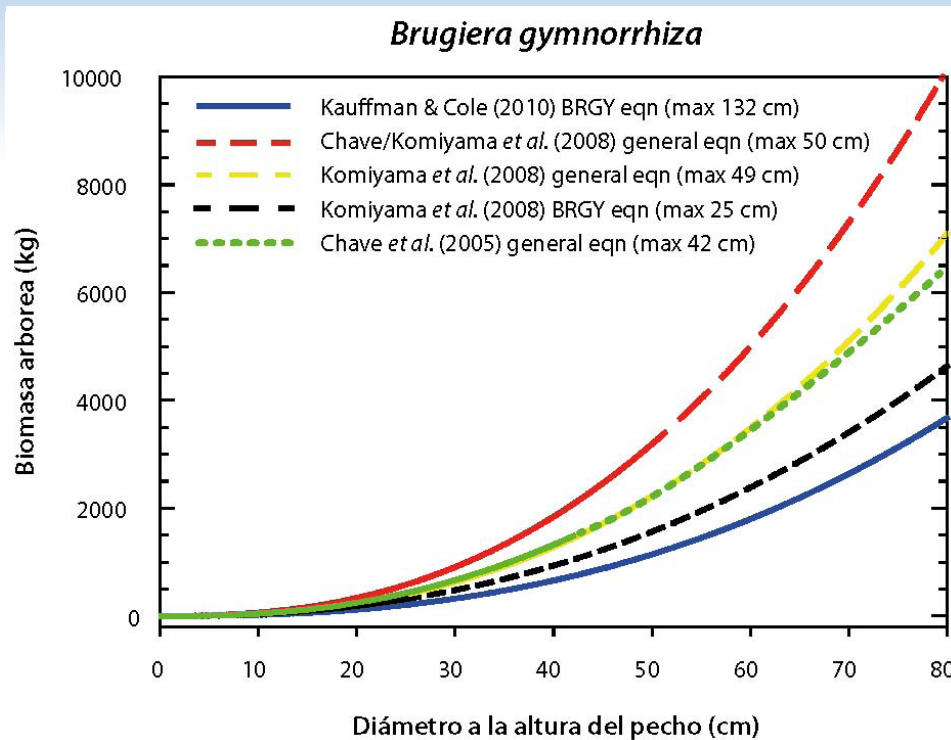
En todo caso recomendamos hacer el esfuerzo necesario por ubicar las referencias originales para evitar errores de transcripción en citas secundarias que puedan alterar considerablemente los resultados. Además, esto sirve para estudiar con detenimiento el ámbito de aplicación de las ecuaciones y evitar errores. Por ejemplo, las ecuaciones desarrolladas por Smith y Whelan (2006) para los Everglades en Florida, no son enteramente apropiadas para los rodales altos de *R. mangle* en Centroamérica, porque los manglares de Florida son de talla considerablemente menor que los manglares en nuestra región.

La selección inadecuada de ecuación alométrica para los cálculos puede resultar en sesgos significativos en los estimados. Por ejemplo, en un estudio en Costa Rica (BIOMARCC 2012) se encontró que las existencias de carbono en árboles calculadas con una ecuación de Komiyama *et al.* (2005) sobreestimaban en un 37% los resultados obtenidos con la ecuación de Châve *et al.* (2005; Figura 27). Sin embargo, la primera ecuación es la más comúnmente utilizada internacionalmente así que su uso es casi obligatorio porque permite realizar comparaciones con estudios realizados en otros sitios y latitudes. El sesgo de las estimaciones de biomasa producto de una ecuación alométrica relativo a su valor real solo puede determinarse comparando los resultados contra datos “reales” derivados de cosechas directas de biomasa en campo, dada la escasez de modelos alométricos para manglares en Centroamérica y el Caribe (Cifuentes *et al.* 2013)

Por otro lado, se debe tener presente el rango diamétrico para el cual las ecuaciones son aplicables, porque fuera de este el error de los estimados puede ser considerable y propagarse según aumenta el tamaño de los árboles (Figura 28).



**Figura 27.** Diferencias en la estimación de las existencias de carbono sobre el suelo según la ecuación alométrica utilizada. Las barras azules representan los resultados de utilizar la ecuación de Châve *et al.* (2005) y las barras verdes la ecuación de Komiyama *et al.* (2005). Tomado de BIOMARCC (2012).



**Figura 28.** La selección inapropiada de ecuaciones alométricas para calcular la biomasa de manglares (en este ejemplo, de la especie *Brugiera gymnorrhiza*, nativa de Asia) puede provocar errores multiplicativos en las estimaciones conforme aumenta el tamaño de los árboles. Tomado de Kauffman *et al.* (2013).

## BIOMASA DE HERBÁCEAS, REGENERACIÓN Y HOJARASCA

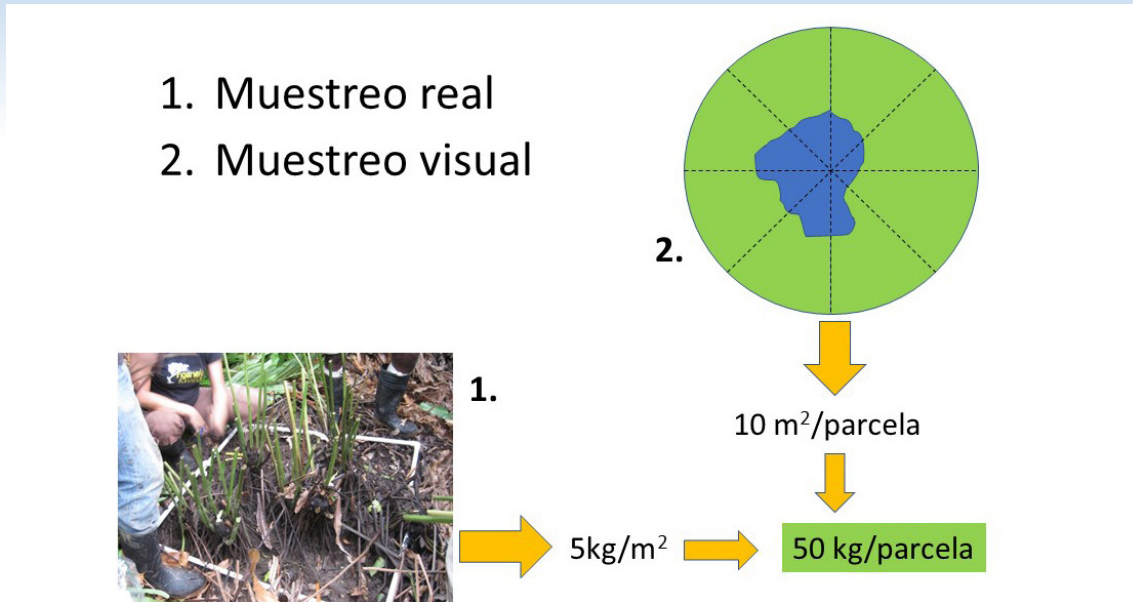
Para estimar la biomasa de herbáceas y regeneración, se multiplica la masa seca del material vegetal cosechado (en unidades de  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) por la superficie de la parcela cubierta por este componente (en  $\text{m}^2$ ) (Figura 29). Aunque es poco común que se mida la cantidad de hojarasca presente en los bosques de manglar, el procedimiento de cálculo es similar, escalando la masa seca por unidad de área cosechada en el campo a unidades de  $\text{m}^2$  y hectáreas.

## BIOMASA DE MADERA CAÍDA

La biomasa de la madera caída se calcula siguiendo las fórmulas y correcciones descritas por Van Wagner (1968) y Brown y Roussopoulos (1974) y tomando en cuenta la gravedad específica de la madera estandarizada por el IPCC (2003) y Zanne *et al.* (2009) para la madera intacta y los valores derivados de las muestras de campo para la madera en descomposición. Para obtener directamente la biomasa de la madera caída se utiliza la siguiente fórmula, que incluye la gravedad específica de la madera ( $\rho$ ) y el largo  $L$  de los transectos (12 m para el método que estamos describiendo; Van Wagner 1982). El diámetro debe ir en centímetros para que las unidades resultantes estén en  $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

$$\text{Biomasa madera caída} = \rho * \frac{\pi^2}{8L} * \sum d^2$$





**Figura 29.** Pasos para cuantificar la biomasa de las herbáceas y la regeneración en manglares, combinando la cosecha de material en el campo y la determinación de su peso seco con estimaciones visuales del área de la parcela cubierta por dichos componentes. Los valores son ilustrativos.

Este cálculo se repite para cada una de las categorías de descomposición de la madera que fueron muestreadas en el campo. Luego, se suman los valores de biomasa de esas categorías para obtener el valor total de la madera caída. Una técnica alternativa para calcular la biomasa de la madera caída es usar el diámetro cuadrático medio de todas las piezas de madera encontradas en cada categoría de descomposición (Kauffman *et al.* 2013).

## CARBONO EN EL SUELO

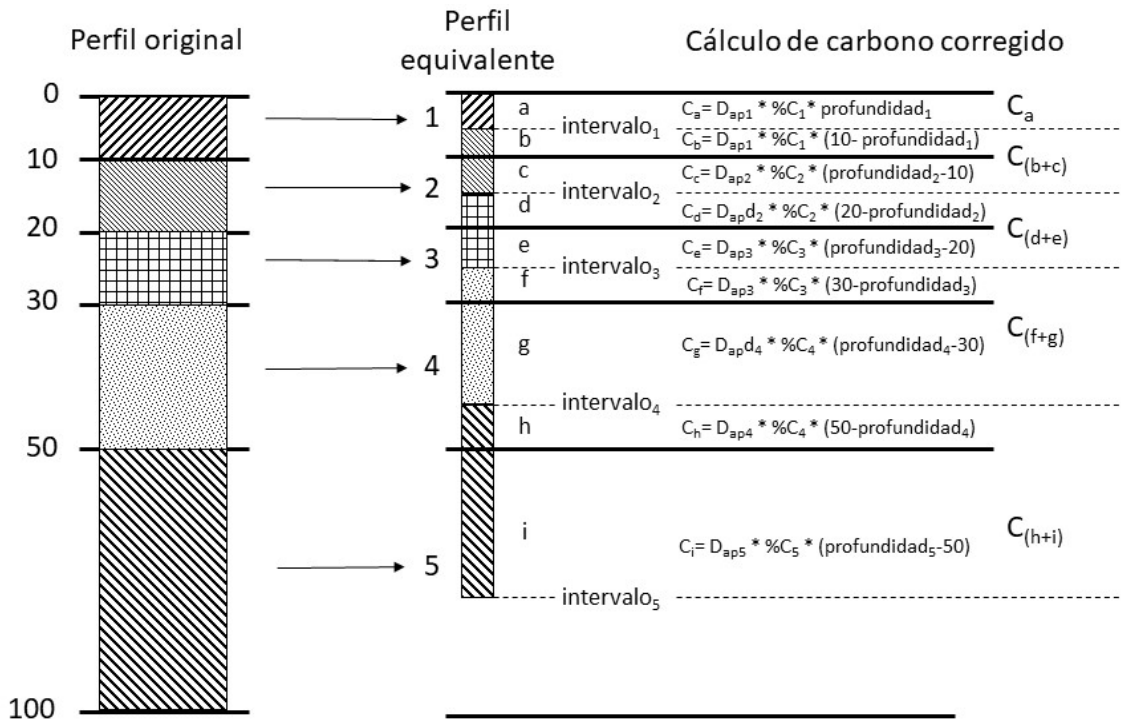
Para calcular el carbono contenido en el suelo se multiplica el porcentaje de carbono resultado de los análisis químicos descritos previamente por el intervalo de profundidad (cm) y por la densidad aparente ( $\text{g}\cdot\text{cm}^3$ ) correspondiente a ese intervalo.

$$\text{Carbono}_{\text{suelo}} = \%C * \text{intervalo profundidad} * \text{densidad aparente}$$

Las unidades resultantes ya están en  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . La sumatoria de los contenidos de carbono por intervalo de profundidad representa la existencia total de carbono en el suelo hasta la profundidad muestreada, para cada punto de muestreo. Dependiendo del diseño muestral y las inferencias que se desee hacer, se pueden calcular los promedios e incertidumbres por intervalo de profundidad, parcela, sitio o estrato muestreado.

El cambio de manglares a otros usos de la tierra provoca variaciones en las propiedades físicas del suelo. Por ejemplo, la descomposición de la materia orgánica en la capa superficial del suelo ocasiona un aumento en la densidad aparente y puede haber también pérdidas por erosión. Por otro lado, el cambio de uso también puede resultar en la compactación activa del suelo debida a la formación de un *hardpan* en el fondo de las piletas de las granjas de camarón o al pisoteo del ganado en áreas convertidas a pastizales.

Esta dinámica hace que, sin mediar cambios en las concentraciones de carbono, cambien artificialmente las existencias en el sitio, por la variación en la densidad aparente del suelo. Por lo tanto, si no se toman en cuenta estos procesos al calcular las existencias de carbono, estaríamos sesgando la magnitud de los flujos de emisiones debidos al cambio de uso (Ayanaba *et al.* 1976). Por esta razón, recomendamos que cuando se trabaje con gradientes de uso del suelo se comparen los datos utilizando la técnica de “masa equivalente de suelo”, descrita por Ellert y Bettany (1995) y Ellert *et al.* (2001, 2002). Esta técnica permite aislar el efecto de la compactación, eludir el sesgo mencionado y encontrar diferencias reales en las existencias de carbono al comparar masas equivalentes de suelo entre los sitios de estudio (Figura 30).



**Figura 30.** El cálculo de carbono en un perfil de suelo con la técnica de «masa equivalente» permite eliminar los sesgos por la compactación del suelo que produce el cambio de manglares a otros usos del suelo. D<sub>ap</sub> = densidad aparente. Elaboración propia.

## CARBONO Y CO<sub>2</sub> PARA EL ECOSISTEMA Y PAISAJE

Para calcular el carbono total del ecosistema de manglar, en primer lugar se debe convertir los datos de biomasa a carbono, multiplicando por la concentración de carbono de cada componente del ecosistema. Murdiyarsó *et al.* (2009) utilizaron 0,464, aunque el valor denotado en las guías más actualizadas del IPCC (2003) es de 0,47. En la hojarasca ese valor varía entre 0,39 y 0,49 (promedio 0,45; Kauffman *et al.* 2013). La concentración de carbono en las raíces es menor que la de otras partes del árbol: 0,36 a 0,42, según Kauffman *et al.* (2013). Aunque la concentración de carbono es constante entre especies y tipos de bosque y los valores descritos son ampliamente utilizados, siempre es recomendable obtener valores locales a partir de muestras de tejido vegetal recolectadas en los sitios de estudio.

El carbono total en el ecosistema es la suma del carbono almacenado en cada uno de sus componentes (Figura 1):

$$\text{Carbono total ecosistema} = C_{\text{árboles}} + C_{\text{herbáceas}} + C_{\text{regeneración}} + C_{\text{madera caída}} + C_{\text{suelo}}$$

Aunque con frecuencia el muestreo de carbono en los suelos de manglar excede 1 m de profundidad, esta profundidad se está tomando paulatinamente como referencia para comparar entre estudios. Todas las unidades (carbono aéreo y del suelo) se expresan en MgC·ha<sup>-1</sup>. Este cálculo se debe realizar para todos los estratos de manglar y categorías de uso del suelo incluidas en el estudio que estemos realizando.

Finalmente, para calcular la reserva de carbono en un área o paisaje de estudio, se multiplica el carbono total del ecosistema (MgC·ha<sup>-1</sup>) para cada estrato muestreado (manglares y usos de la tierra) por su área (ha) correspondiente:

$$\text{Carbono paisaje} = \sum (C_{\text{total}} * \text{Área})_{\text{estrato}}$$

Para que los valores así obtenidos puedan ser utilizados en los reportes nacionales de emisiones de GEI, deben estar en unidades de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2eq</sub>). Para esto, basta con multiplicar el valor de carbono por 3,67, que es la proporción entre el peso molecular del CO<sub>2</sub> (44 kg·mol<sup>-1</sup>) y el carbono (12 kg·mol<sup>-1</sup>).

## MANEJO DE BASES DE DATOS

Para un manejo eficiente de los datos de campo y para facilitar los cálculos y resúmenes de la información recopilada, recomendamos utilizar un formato de base de datos en un programa de hoja electrónica como Excel (Figura 31). En un mismo archivo se pueden separar los datos de cada componente del ecosistema y realizar los cálculos con facilidad, utilizando la herramienta de “tablas dinámicas” (Figura 32) y ligando los resultados en tablas de resumen por medio de fórmulas. Solo se debe tener el cuidado de utilizar el formato “clásico” de dichas tablas para tener un control adecuado de la forma en la que se presentan los resúmenes de los datos.

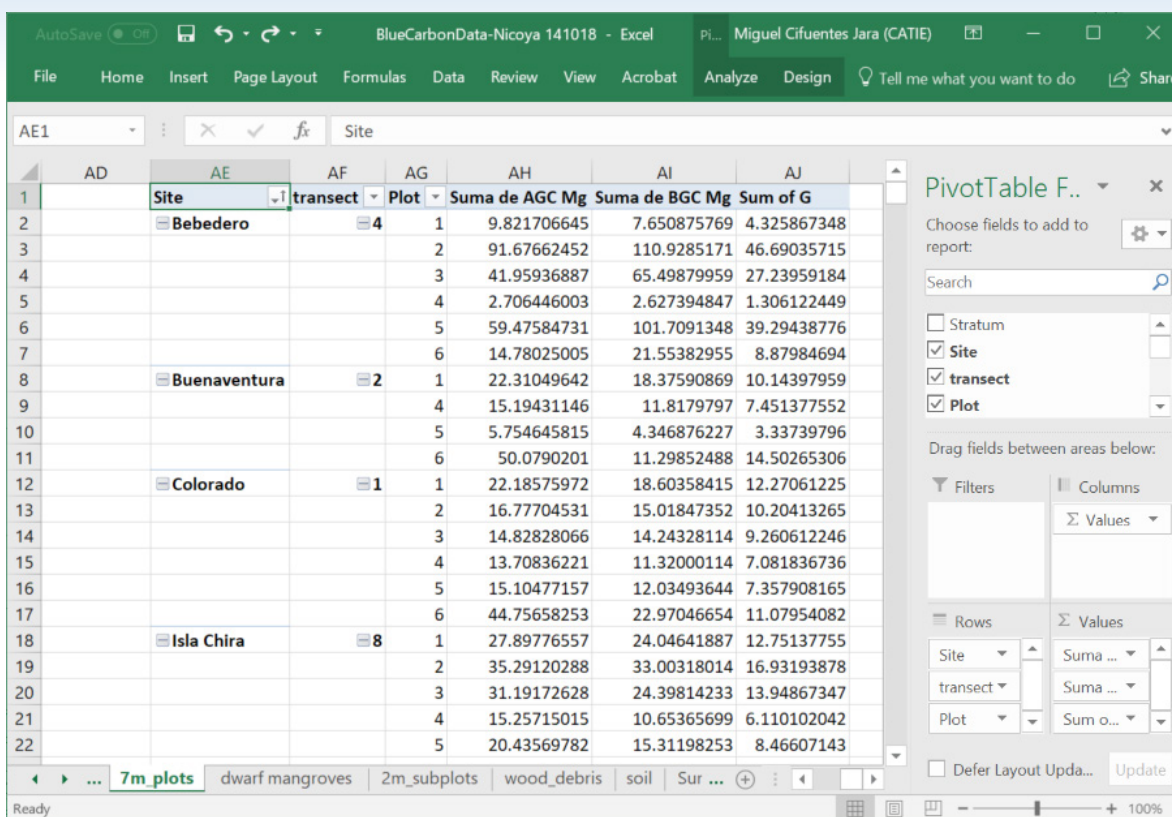
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Estrato	Sitio	Transecto	Parcela	Árbol#	Especie	Nombre	Familia	dap_cm	Vivo/Muerto	Clase Muerto
2	Manglar	Colorado	1	1	1	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	9.0	V	
3	Manglar	Colorado	1	1	2	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	6.2	V	
4	Manglar	Colorado	1	1	3	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	5.9	V	
5	Manglar	Colorado	1	1	4	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	6.1	V	
6	Manglar	Colorado	1	1	5	<i>Laguncularia racemosa</i>	Mangle mariquita	Combretaceae	8.5	V	
7	Manglar	Colorado	1	1	6	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	5.7	M	3
8	Manglar	Colorado	1	1	7	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	7.3	M	3
9	Manglar	Colorado	1	1	8	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	7.2	V	
10	Manglar	Colorado	1	1	9	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	8.1	V	
11	Manglar	Colorado	1	1	10	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	5.5	V	
12	Manglar	Colorado	1	1	11	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	7.4	V	
13	Manglar	Colorado	1	1	12	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	9.0	V	
14	Manglar	Colorado	1	1	13	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	7.2	V	
15	Manglar	Colorado	1	1	14	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	5.0	V	
16	Manglar	Colorado	1	1	15	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	7.8	V	
17	Manglar	Colorado	1	1	16	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	6.1	V	
18	Manglar	Colorado	1	1	17	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	5.5	V	
19	Manglar	Colorado	1	1	18	<i>Rhizophora racemosa</i>	Mangle caballero	Rhizophoraceae	6.3	V	
20	Manglar	Colorado	1	1	19	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	5.0	V	
21	Manglar	Colorado	1	1	20	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	8.0	V	
22	Manglar	Colorado	1	1	21	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	7.2	V	
23	Manglar	Colorado	1	1	22	<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Mangle piña	Theaceae	9.8	L	

**Figura 31.** Ejemplo de base de datos electrónica para el almacenamiento, depuración y control de calidad de los datos y el cálculo de las existencias de carbono en manglares. Los datos procedentes de cada componente del ecosistema se almacenan en hojas separadas dentro del mismo archivo.

La ventaja de utilizar este sistema es que cualquier corrección a los datos base se propaga dentro de la hoja electrónica y las tablas de resumen (Cuadro 5), reduciéndose así el tiempo de análisis y disminuyendo el potencial de errores al copiar valores entre tablas independientes de datos.

Para una discusión detallada de los procesos de organización, depuración y control de calidad de la base de datos de inventario de campo sugerimos consultar las buenas prácticas desarrolladas por Casanoves *et al.* (2017). Allí se describe en detalle y con ejemplos prácticos los pasos para organizar y depurar una base de datos de un inventario de bosques, cómo identificar y tratar datos espurios, y cómo realizar análisis estadísticos básicos y avanzados con esos datos, incluyendo el cálculo de la incertidumbre asociada a los estimados con técnicas básicas y métodos de avanzada, como Montecarlo. El procedimiento completo de manejo de bases de datos y los cálculos descritos en esta sección se describen en la práctica incluida en el Anexo 2.





**Figura 32.** La herramienta de “tablas dinámicas” del programa Microsoft Excel permite resumir rápida y convenientemente los resultados de los cálculos de carbono para manglares y otros usos de la tierra asociados.

**Cuadro 5.** Ejemplo de un cuadro de resultados con las existencias de carbono ( $\text{MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) por componente del ecosistema calculado utilizando la herramienta de tablas dinámicas de Excel.

Estrato	Manglares	Camaroneras	Salineras
N parcelas	84	30	6
Árboles	30,99 ± 4,37	--	--
Arbustos	9,55 ± 2,60	--	--
Madera caída	2,05 ± 0,44	--	--
C total epigeo	42,59 ± 2,28	--	--
Raíces	34,16 ± 2,21	--	--
C <sub>suelo</sub>	297,70 ± 12,89	32,98 ± 3,82	30,24 ± 6,94
C <sub>ecosistema</sub>	408,61 ± 14,12	32,98 ± 3,82	30,24 ± 6,94

# USO DE HERRAMIENTAS SATELITALES

Sergio Velásquez<sup>21</sup> y Christian Brenes<sup>22</sup>

En la actualidad, las imágenes aéreas y de satélite de los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas comunes para apoyar la gestión de los recursos naturales. En el contexto de los estudios de carbono azul, son útiles para generar mapas de cobertura o uso del suelo en las zonas marino-costeras y también para estudiar la dinámica de sus cambios históricos. Lo que sigue no pretende ser una guía metodológica exhaustiva para el uso de dichas herramientas, pues hay otros textos especializados que tratan el tema con mayor especificidad (Velásquez 2015). Aunque mencionamos algunas soluciones de software específicas, existen otras opciones en el mercado (inclusive de software libre) que podrían utilizarse también.

## DELIMITACIÓN DE ÁREAS Y RECONOCIMIENTO INICIAL

El uso más común de las imágenes satelitales y las herramientas de SIG es el reconocimiento preliminar y la delimitación de las áreas de estudio. Por medio de imágenes de acceso libre (Google Earth o Landsat), se puede realizar un ejercicio preliminar para definir el ámbito geográfico y las principales categorías de cobertura del suelo con las cuales se trabajará posteriormente. Así se pueden ubicar los principales parches de vegetación (manglares, bosques, cultivos) y estimar visualmente los gradientes estructurales y de potencial composición florística presentes en los manglares del área. Esto permite definir el ámbito de las coberturas y usos del suelo que pueden formar parte de un gradiente de uso y cambio de uso de la tierra asociado a los manglares. Además, se pueden identificar y ubicar comunidades, obras de infraestructura, accesos, etc. La definición del ámbito geográfico de trabajo es fundamental para “cortar” las escenas y delimitar con exactitud los límites de los análisis.

Esta primera aproximación puede refinarse posteriormente con otro tipo de imágenes con mayor resolución (RapidEye o fotografías aéreas, por ejemplo) o, dependiendo de la escala del estudio y el ámbito geográfico del estudio, se convierte en los mapas base. En la sección anterior de *Delimitación de las áreas de estudio* (p. 20) se detallan los objetivos y parámetros para completar esta tarea.

## ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL

Hay diversas fuentes de datos geoespaciales que pueden ser utilizados para analizar los patrones de cobertura y su dinámica histórica en zonas marino-costeras. En general, la información geoespacial disponible puede provenir de las siguientes fuentes:

21 Sergio Velásquez Mazariegos. Consultor Internacional en SIG y Sensores Remotos. Turrialba, Cartago, Costa Rica. e-mail: [velasquez.m.sergio@gmail.com](mailto:velasquez.m.sergio@gmail.com). Tel. +(506) 8704-7509

22 Christian Brenes. Profesor Investigador Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remoto. Programa de Bosques, Biodiversidad y Cambio Climático. 7170 CATIE; Turrialba, Cartago, 30501; Costa Rica. E-mail: [christian.brenes@catie.ac.cr](mailto:christian.brenes@catie.ac.cr). Tel. +(506) 2558-2183.

- Plataforma GoogleEarth<sup>23</sup>
- Imágenes de satélite Landsat 5 TM (*Thematic Mapper*)<sup>24</sup>
- Imágenes de satélite Landsat 7 ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*)
- Imágenes de satélite Landsat 8 OLI (*Operational Land Imager*)
- Imágenes de radar, de los sensores ALOS PALSAR, Sentinel, y otros<sup>25</sup>
- Imágenes de alta resolución de RapidEye, WoldView o Quickbird<sup>26</sup>
- Fotografías aéreas
- Hojas topográficas

Las bandas del sensor OLI son bastante similares a las del sensor Landsat 7 ETM+, pero introducen mejoras a los instrumentos de las misiones Landsat anteriores a través de dos nuevas bandas espectrales: una banda en el azul visible (Banda 1), diseñada para el estudio de recursos hídricos y marino-costeros y un nuevo canal infrarrojo (Banda 9) para la detección de nubes cirrus. Además, se incluye una banda de control de calidad en cada producto generado, que proporciona información más detallada sobre la presencia de nubes, agua y nieve. Por otra parte, el sensor Landsat 8 incorpora un sensor térmico infrarrojo (TIRS – *Thermal Infrared Sensor*), que incluye dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+ (Velásquez 2015). Todas estas características promueven su uso para el trabajo con manglares y zonas marino-costeras.

La selección de una (o varias) de estas opciones dependerá de la resolución espacial buscada, la calidad de las imágenes (en relación con su estado de procesamiento radiométrico previo, la presencia/ausencia de nubes, por ejemplo), la cobertura espacial (tamaño de las escenas) y temporal (frecuencia de las imágenes y que cubran el rango de fechas de interés), el tipo de análisis y la facilidad de uso (el análisis de imágenes de radar, por ejemplo, es más complejo). A menudo es necesario combinar varias fuentes para completar el ámbito espacial o temporal de los mosaicos para los análisis.

## PREPROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Las imágenes satelitales deben someterse a procesos de corrección geométrica y atmosférica antes de utilizarse para establecer la cobertura del suelo y posteriormente hacer un análisis multitemporal (Velásquez 2015). Realizamos la corrección geométrica para evitar desplazamientos horizontales entre las escenas usadas. Esto garantiza que la ubicación de las diferentes entidades u objetos del análisis coincidan geográficamente y minimiza la posibilidad de detectar diferencias debido a errores de desplazamiento espacial en la información y no a cambios reales en el terreno. Para este proceso es habitual utilizar el software Erdas (recomendamos la versión 2013) e imágenes o bases de datos de puntos con ubicación conocida y verificada previamente. Las hojas cartográficas oficiales son un insumo útil para este proceso.

23 Plataforma en línea: <https://www.google.com/earth/>. Consultado nov. 2017.

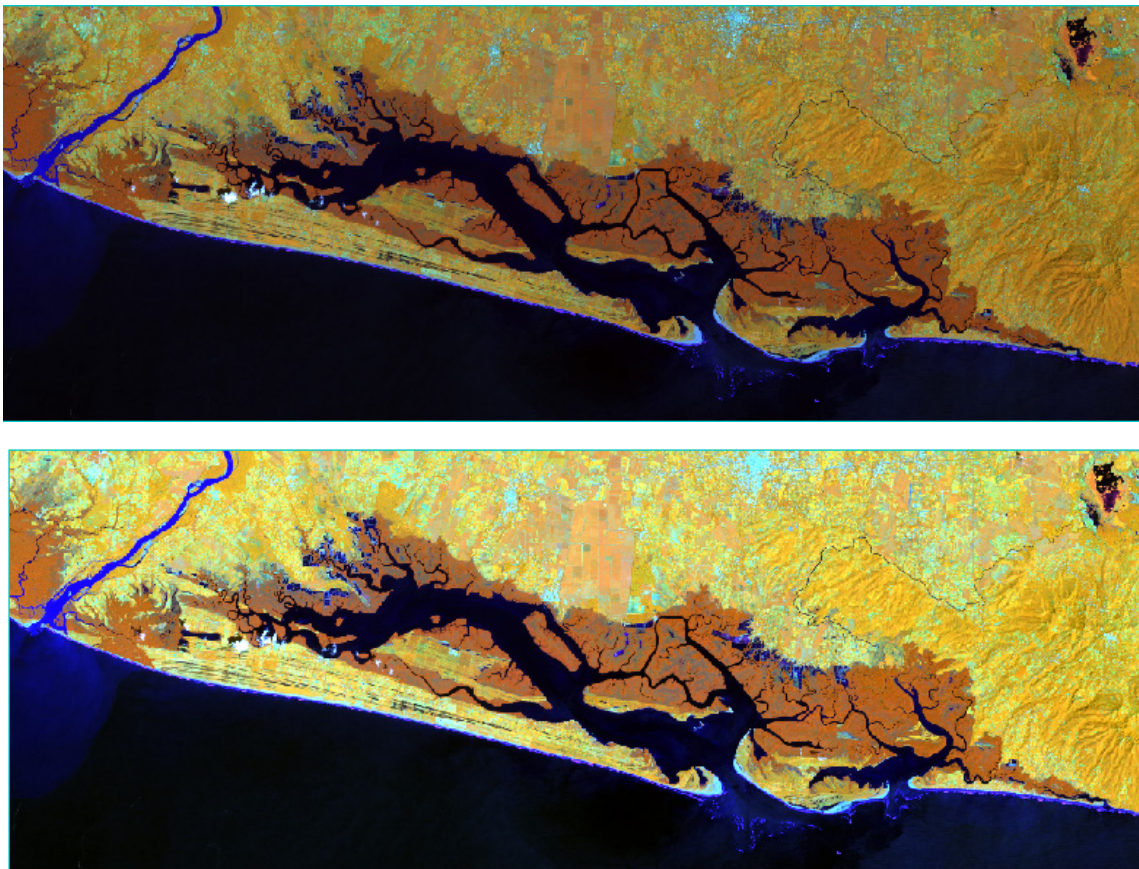
24 Las imágenes del satélite Landsat pueden ser descargadas de las plataformas Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) y GloVis (<https://glovis.usgs.gov/>) del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América (USGS). Para descargar varias de estas imágenes a la vez es necesario instalar una pequeña aplicación, llamada Bulk Download Application, disponible en: <http://earthexplorer.usgs.gov/bulk/>. Consultado nov. 2017.

25 Hay una diversidad de sistemas RADAR operando en la actualidad: AirMOSS (<https://airmoss.jpl.nasa.gov/>), CloudSat (<http://cloudsat.atmos.colostate.edu/>), GPM (<https://pmm.nasa.gov/gpm>), Sentinel-1 y Sentinel-3a ([http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus)) y ALOS PALSAR-2 (<https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>). Consultado nov. 2017.

26 <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/rapideye/>. Consultado nov. 2017.

Es importante verificar la coincidencia entre los sistemas de proyección geográfica originales y la cartografía base del país donde se esté trabajando.

Por otro lado, la corrección atmosférica se lleva a cabo para remover los efectos que la atmósfera tiene sobre la radiación transmitida y reflejada, debido a las nubes, los aerosoles y gases de la atmósfera que interfieren con la representación real del terreno en las imágenes. Esta corrección asegura que la información espectral sea consistente entre las imágenes utilizadas (Figura 33). Esto quiere decir que, implementada la corrección, una cobertura de la tierra tendrá una señal radiométrica idéntica entre dos fechas distintas de análisis. Para completar este proceso, sugerimos la aplicación del algoritmo de corrección atmosférica rápida (QUAC – *Quick Atmospheric Correction*), tal como lo sugiere Velásquez (2015), del software ENVI 5.1 (Cifuentes-Jara *et al.* 2017). Este método produce mejores resultados que otros métodos físicos, generando una reflectancia espectral dentro de un rango de aproximadamente 10% de la reflectancia real en la superficie (Bernstei 2012). Para evitar la variación de la reflectancia de los píxeles, las imágenes pueden ser remuestreadas utilizando el algoritmo de vecino más próximo (*Nearest Neighbor*).

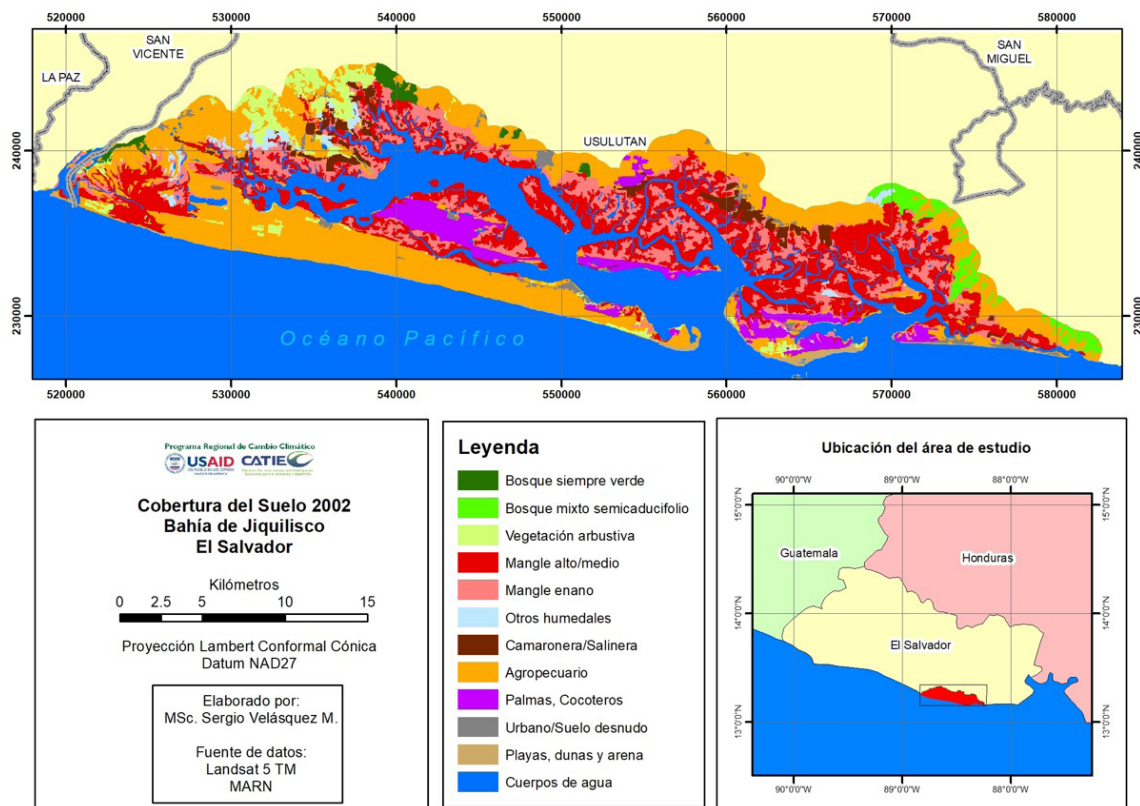


**Figura 33.** La corrección atmosférica de una imagen de satélite original (arriba) permite eliminar la interferencia atmosférica debida a las nubes, aerosoles y gases atmosféricos para brindar una representación consistente de la superficie de estudio (abajo). La imagen corresponde a la Bahía de Jiquilisco, El Salvador. Tomado de Cifuentes *et al.* 2017.



## CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA DE MANGLE Y COBERTURAS ALEDAÑAS

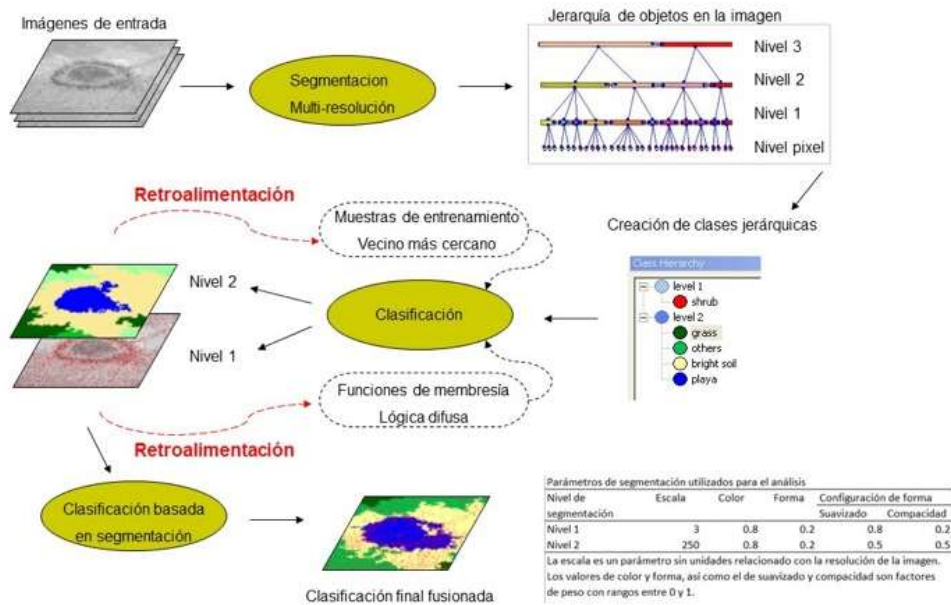
El proceso de clasificación implica reducir la escala continua de los niveles digitales de una imagen de satélite a una escala categórica (tipos de vegetación) u ordinal (densidades de vegetación). Como fruto de la clasificación digital, se obtiene una cartografía e inventario de las categorías objeto de estudio (Velásquez 2015), que se visualiza habitualmente como un mapa del área de estudio y que incluye los distintos usos de la tierra en la zona de interés (Figura 34). El conjunto de categorías de clasificación (conocido como “la leyenda”) debe definirse previamente para responder a los objetivos del estudio y la dinámica de uso de un área (ver en el Cuadro 1 un ejemplo de leyenda de clasificación utilizada en El Salvador).



**Figura 34.** Ejemplo de mapa de cobertura del suelo en la Bahía de Jiquilisco, El Salvador, producto de la clasificación digital de una imagen de satélite del área. Tomado de Cifuentes-Jara *et al.* (2017).

Independientemente del método de clasificación de imágenes satelitales utilizado, los mapas resultantes deben ser validados comparándolos con un conjunto de puntos de control levantados directamente en el campo o extraídos de productos geográficos anteriores o imágenes satelitales que permitan la identificación de las coberturas de forma inequívoca.

Para el trabajo con manglares, sugerimos utilizar la “Clasificación Orientada a Objetos” (OBIA, por sus siglas en inglés) y el software ECognition<sup>27</sup> (Figura 35). Este método identifica objetos en la imagen (o segmentos), que son grupos de píxeles espacialmente contiguos con textura, color y tono similares (MacLean y Congalton 2012, Vo *et al.* 2013). La literatura con respecto a la aplicación de esta metodología en manglares y otro tipo de cobertura es abundante (Reddy y Roy 2008, Laongmanee *et al.* 2013, Ahmad 2012; Chaves 2008; Chen *et al.* 2013; Dow 2008, Elmahdy *et al.* 2013; Heumann 2011a y 2011b, Hirata *et al.* 2010; Hussain *et al.* 2013, Lopez *et al.* 2013, Liu *et al.* 2008, Myint *et al.* 2008, Nguyen *et al.* 2013, Rabiatal *et al.* 2012, Sremongkontip *et al.* 2000, Yuvaraj *et al.* 2014), por lo que consideramos que es una opción robusta para la clasificación de las escenas.

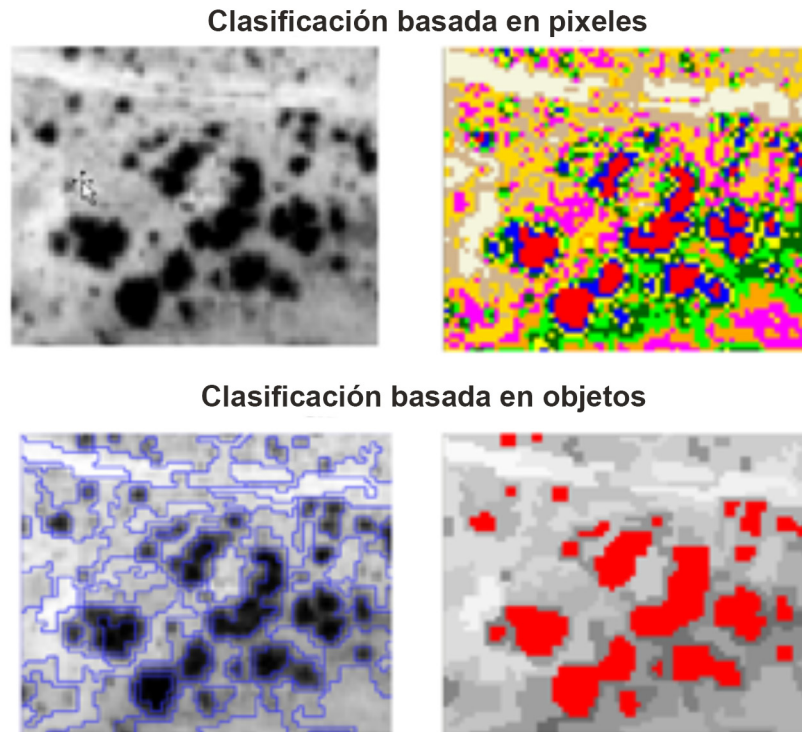


**Figura 35.** Flujo de trabajo del programa eCognition para clasificar imágenes de satélite con base en los métodos de Clasificación Orientada a Objetos.

Esta solución permite considerar la forma, tamaño y contexto, así como el contenido espectral de los objetos. Además, el método toma en cuenta que las relaciones entre los objetos pueden desempeñar un papel importante en su identificación y clasificación. Los métodos orientados a objetos son a menudo mucho más efectivos que los métodos basados en píxeles cuando se clasifican imágenes de alta resolución, ya que conforme la resolución espacial se incrementa, puede haber una mayor variabilidad en los píxeles que pertenecen a la misma clase. La consideración de grupos de píxeles como objetos supera la complejidad incrementada de una escena de alta resolución debido a las sombras, cambios en la densidad de la vegetación, o firmas espectrales similares de elementos distintos.

27 <http://www.ecognition.com/> Consultado Nov. 2017.

Los objetos son una unidad de clasificación más poderosa que los píxeles, ya que pueden ser delineados para corresponder con elementos físicos en el paisaje. Los píxeles, por otro lado, son cajas arbitrarias de contenido espectral. Los clasificadores orientados a objetos imitan de manera más cercana a los elementos interpretados manualmente (Figura 36). De esta forma, los objetos creados por medio de la segmentación tienen tamaños y formas que pueden ser cuantificados, como podría ser la distancia de un tipo de objeto a otro (por ejemplo, un píxel que contiene la firma espectral puede estar cerca de un río o en el centro de una isla).



**Figura 36.** Comparación visual de las diferencias entre la clasificación basada en píxeles (arriba) y la basada en objetos (abajo).

Así, el análisis de clasificación orientado a objetos se divide en tres pasos: la segmentación, la creación de las clases generales y las reglas de clasificación. Durante el primer paso, se definen y calculan los segmentos de imagen. Los parámetros se definen por la escala, las propiedades espectrales y las propiedades de forma. Esta segmentación tiene que ser calculada en varios niveles jerárquicos en un proceso de prueba y error, para que al final se obtenga una imagen que represente los segmentos de los objetos de interés. El resultado de la clasificación es un archivo vectorial en formato *shapefile* de ESRI®, que contiene las clases definidas durante el proceso anterior.

### Postproceso de las imágenes clasificadas

Una vez clasificados los *shapes* (archivos de cobertura) mediante el procedimiento anterior, se debe realizar un postproceso de los mismos porque como producto de la segmentación y la clasificación se pueden obtener subclases de una misma clase (por ejemplo, agua profunda y agua superficial). Para fusionar esas subclases en la categoría de leyenda correspondiente se usa la herramienta *merge*.

Aunque el procedimiento anterior evita el efecto de *sal y pimienta* (píxeles de una clase aislados o embebidos en otra clase), común en las clasificaciones basadas en píxeles, puede ser necesario hacer algunas correcciones manuales a la clasificación para eliminar efectos de borde en algunos de los polígonos. Luego de aplicar estas correcciones, se puede calcular las áreas definitivas de los polígonos de cada una de las clases y generar las tablas de resumen de la clasificación de la cobertura del suelo resultante para cada fecha de estudio.

### Evaluación de la clasificación de las imágenes

Para asegurar la consistencia de todo el proceso, se debe evaluar la exactitud de la clasificación llevada a cabo. Sugerimos el uso de la herramienta *Semi-automatic Classification Plugin* (SSP) de qGIS para calcular la matriz de confusión y las estadísticas respectivas. En esta matriz, la exactitud del usuario muestra los falsos positivos, donde los píxeles se clasifican incorrectamente como una clase conocida, cuando deberían haberse clasificado como algo diferente. Un ejemplo podría ser cuando la imagen clasificada identifica un píxel como mangle, pero la referencia lo identifica como bosque. En este caso, la clase mangle tiene píxeles extra que no debería tener según los datos de referencia. La exactitud del usuario también se conoce como *errores de comisión* o *errores de tipo 1*. Los datos para calcular esta tasa de error se leen en las filas de la tabla. En la fila "Total" se muestra el número de puntos (o píxeles), los cuales deben haber sido identificados como una clase dada, según los datos de referencia.

Por otro lado, la exactitud del productor es un falso negativo, donde los píxeles de una clase conocida se clasifican como algo diferente a una clase. Por ejemplo, cuando la imagen clasificada identifica un píxel como bosque, pero en realidad debería ser mangle. En este caso, a la clase mangle le faltan píxeles según los datos de referencia. La exactitud del productor también se conoce como *errores de omisión* o *errores de tipo 2*. Los datos para calcular esta tasa de error se leen en las columnas de la tabla. En la columna "Total" se muestra el número de puntos (o píxeles) identificados como una clase dada, según el mapa clasificado.

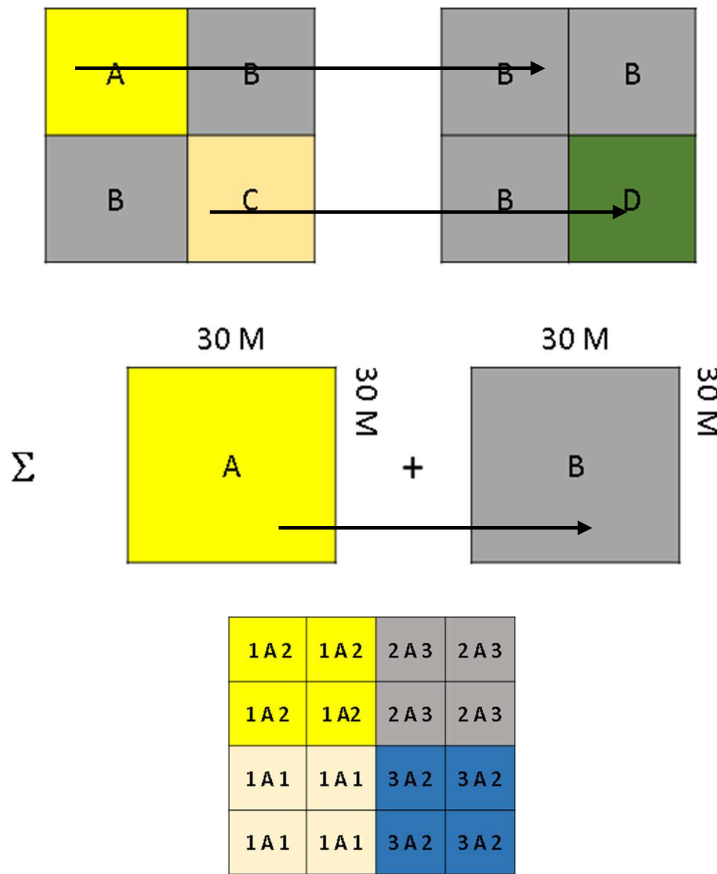
Para la evaluación global de la exactitud de la clasificación se utiliza el índice de concordancia Kappa (Pontius 2000, Pontius *et al.* 2004), que puede tomar valores desde -1 a 1. El valor 1 indica una concordancia completa, mientras que el -1 define una correlación negativa. Valores alrededor de 0 indican que no existe correlación entre las capas. En general, valores por encima de 0,75 indican una muy buena correlación

## ANÁLISIS DE CAMBIOS DE COBERTURA

Para estimar la dirección, magnitud y distribución espacial de los cambios de cobertura fue necesario aplicar operaciones de "álgebra de mapas". Estas operaciones implican la sobreposición de las capas generadas para determinar las diferencias entre las propiedades espectrales de los píxeles y así hacer inferencias acerca de los cambios asociados con la cobertura del suelo (Chen *et al.* 2013). La dirección de los cambios



se refiere a la trayectoria de los cambios o transiciones; por ejemplo, de bosque a pasto, de pasto a uso agrícola, o de bosque a bosque (lo que implica una permanencia en el tipo de cobertura a través del tiempo). La magnitud de los cambios, por otro lado, expresa en términos relativos o absolutos los cambios o la persistencia de superficie asociados a las transiciones observadas. Por último, la distribución espacial de los cambios muestra las localidades en donde han sucedido los cambios, o mantenido los usos durante el periodo de análisis (Figura 37). La estimación de la persistencia, pérdida y ganancia del mangle y otras categorías para los periodos de análisis puede realizarse con cualquier programa de SIG, como por ejemplo ArcGIS10.



**Figura 37.** Propiedades de dirección (A), magnitud (B) y distribución espacial de los cambios en la cobertura de uso del suelo en un paisaje marino-costero.

Hay dos ecuaciones para calcular la tasa anual de cambio para la cobertura de mangle, de tal manera que se pueda comparar con otros estudios. La primera ecuación es recomendada por FAO (1995) y equivale a la tasa de interés utilizada en los cálculos financieros.  $S$  y  $r$  son las tasas de cambio.  $S_1$  es la superficie al inicio del periodo,  $S_2$  es la superficie al final del periodo,  $t_1$  es el año de inicio del periodo y  $t_2$  el año final del periodo):

$$s = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{1/(t_2-t_1)} - 1$$

La segunda ecuación (Puyravaud 2003) tiene un significado matemático y biológico, es decir, es utilizada para cálculos financieros de interés compuesto, pero no subestima la tasa anual de deforestación cuando los cambios son grandes y acelerados. Esta fórmula arroja valores más altos que la tasa sugerida por FAO cuando la deforestación es más alta, ya que toma en cuenta la pérdida de los recursos forestales y su implicación biológica para estos ecosistemas (Peralta-Rivero *et al.* 2015):

$$r = \frac{1}{t_2 - t_1} \times \ln \frac{s_2}{s_1}$$

Para expresar los valores en porcentaje, el resultado debe ser multiplicado por 100. Esta tasa expresa el cambio en términos de porcentaje de la superficie al inicio de cada año.

Para representar los resultados, se construyen matrices de tabulación cruzada o matrices de cambios que resultan de la intersección de los mapas de dos fechas consecutivas (Tiempo 1 y Tiempo 2). En dicha matriz, las filas representan las categorías del mapa en el Tiempo 1 y las columnas las categorías del mapa en el Tiempo 2 (Cuadro 6). De acuerdo con Pontius *et al.* (2004), la matriz permite distinguir las transiciones de las diferentes clases evaluadas y detectar los cambios de la cobertura del suelo, así como analizar los patrones reales que llevan estos cambios.

**Cuadro 6.** Matriz de tabulación cruzada o “matriz de cambio” para dos mapas de diferentes fechas.

Tiempo 2						Total tiempo 1 Pérdidas	
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría n		
<b>Tiempo 1</b>							
Categoría 1	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>13</sub>	P <sub>14</sub>	..... P <sub>1n</sub>	P <sub>1+</sub>	P <sub>1+</sub> -P <sub>11</sub>
Categoría 2	P <sub>21</sub>	P <sub>22</sub>	P <sub>23</sub>	P <sub>24</sub>	..... P <sub>2n</sub>	P <sub>2+</sub>	P <sub>2+</sub> -P <sub>22</sub>
Categoría 3	P <sub>31</sub>	P <sub>32</sub>	P <sub>33</sub>	P <sub>34</sub>	..... P <sub>3n</sub>	P <sub>3+</sub>	P <sub>3+</sub> -P <sub>33</sub>
Categoría 4	P <sub>41</sub>	P <sub>42</sub>	P <sub>43</sub>	P <sub>44</sub>	..... P <sub>4n</sub>	P <sub>4+</sub>	P <sub>4+</sub> -P <sub>44</sub>
Categoría n	P <sub>n1</sub>	P <sub>n2</sub>	P <sub>n3</sub>	P <sub>n4</sub>	..... P <sub>nn</sub>	P <sub>n+</sub>	P <sub>n+</sub> -P <sub>nn</sub>
<b>Total tiempo 2</b>	P <sub>+1</sub>	P <sub>+2</sub>	P <sub>+3</sub>	P <sub>+4</sub>	P <sub>+n</sub>	P	
<b>Ganancia</b>	P <sub>+1</sub> -P <sub>11</sub>	P <sub>+2</sub> -P <sub>22</sub>	P <sub>+3</sub> -P <sub>33</sub>	P <sub>+4</sub> -P <sub>44</sub>	P <sub>+n</sub> -P <sub>nn</sub>		

Fuente: Elaboración propia, basada en Pontius *et al.* (2004).

## CÁLCULOS DE LOS FLUJOS HISTÓRICOS DE EMISIONES

La dinámica de emisiones de GEI a nivel de paisaje y a través del tiempo requiere de dos componentes de cálculo (IPCC 2003). En primer lugar, están los llamados “datos de actividad”, constituidos por la magnitud de cambio entre las áreas de las distintas coberturas de uso del suelo dentro del área de estimación. Estos se obtienen habitualmente mediante un estudio de uso y cambio de uso de la tierra, como se describe en las secciones anteriores y el Cuadro 6.

Por otro lado, están los “factores de emisión”, derivados de la diferencia en las densidades de carbono por la transición entre dos categorías de uso de la tierra. Para calcular un factor de emisión, primero hay que

determinar las densidades de carbono de las coberturas de uso de la tierra bajo análisis, ya sea por medio de los métodos descritos en este manual o echando mano de datos publicados en la literatura científica (Cuadro 7).

Independientemente de la fuente de información utilizada, se debe tener el cuidado de utilizar valores comparables. En el caso de los manglares, es importante determinar la profundidad máxima de muestreo para la cual se reportan los datos. Los reportes internacionales se han ido estandarizando a 1 m de profundidad; sin embargo, en manglares las profundidades de muestreo pueden llegar hasta los  $\geq 3$  m de profundidad y en los estudios científicos se reporta habitualmente hasta los 2 m de profundidad.

**Cuadro 7.** Ejemplos de densidades de carbono para distintas coberturas de uso del suelo presentes en zonas marino-costeras.

Cobertura	Densidad de carbono (MgC·ha <sup>-1</sup> )	Observaciones	Fuente
Agropecuario	87,37	Ecosistema, 1 m	Cifuentes <i>et al.</i> (2017)
Áreas de REM	208,34	Ecosistema, 1 m	Cifuentes <i>et al.</i> (2017)
Camaronera	32,84	Ecosistema, 1 m	Cifuentes <i>et al.</i> (2017)
Camaronera	32,98	Ecosistema, 1 m	Cifuentes <i>et al.</i> (2015)
Caña de azúcar	154,9	Ecosistema, 1 m	Jobse (2008)
Manglar	72,52	Sobre el suelo	BIOMARCC (2012)
Manglar	391 – 438	Ecosistema, 1 m	BIOMARCC (2012)
Manglar	408,61	Ecosistema, 1 m	Cifuentes <i>et al.</i> (2015)
Manglar	119,29 – 153,25	Sobre el suelo	Manrow y Vílchez (2012)
Manglar alto	290,01	Ecosistema, 1 m	Cifuentes <i>et al.</i> (2017)
Manglar alto	127 – 145,6	Biomasa total	Adame <i>et al.</i> (2013)
Manglar intermedio	314,92	Ecosistema, 1 m	Cifuentes <i>et al.</i> (2017)
Manglar intermedio	80,8 – 82,7	Biomasa total	Adame <i>et al.</i> (2013)
Manglar bajo	289,92	Ecosistema, 1 m	Cifuentes <i>et al.</i> (2017)
Manglar enano	4,9 – 11,7	Biomasa total	Adame <i>et al.</i> (2013)
Marismas	8,5 – 11,7	Biomasa total	Adame <i>et al.</i> (2013)
Marismas	141,80	Ecosistema, 1 m	Cifuentes <i>et al.</i> (2017)
Pasto	93,5	Ecosistema, 1 m	Jobse (2008)
Salineras	79,77	Ecosistema, 1 m	Cifuentes <i>et al.</i> (2017)
Salineras	30,24	Ecosistema, 1 m	Cifuentes <i>et al.</i> (2015)

La magnitud de los flujos históricos de emisiones resulta de multiplicar las áreas de los datos de actividad (para las transiciones de uso de la tierra identificadas) por los factores de emisión correspondientes, entre dos o más fechas de estudio diferentes. El rango de tiempo de las estimaciones dependerá de los objetivos del estudio y de la información espacio-temporal disponible.





## ANEXO I. LISTA SUGERIDA DE EQUIPO Y MATERIALES NECESARIOS PARA REALIZAR INVENTARIOS DE LAS EXISTENCIAS DE CARBONO A NIVEL DE ECOSISTEMA EN MANGLARES

La siguiente lista de materiales y equipo sugerido para realizar inventarios de carbono en manglares está organizada por componente del ecosistema por medir y el tipo de información por recopilar (en aproximadamente 20 sitios de muestreo; Cuadro 8). Los integrantes del equipo de trabajo deben además llevar consigo equipo personal básico, como mínimo: pantalones largos, camisa de manga larga, gorra o sombrero, bloqueador solar, repelente contra insectos, silbato, y suficiente comida y agua.

**Cuadro 8.** Lista sugerida de equipo y materiales necesarios para realizar inventarios de las existencias de carbono a nivel de ecosistema en manglares.

Equipo o material	Uso previsto
• 1 brújula	• Determinar rumbos del transecto principal y los de madera caída
• 1 GPS	• Obtener coordenadas geográficas de los sitios de estudio y unidades muestrales
• 2 cintas diamétricas	• Medir diámetros de árboles
• 2 clinómetros o hipsómetros	• Medir altura de árboles
• 2 vernier plásticos	• Medir diámetros de árboles pequeños y de madera caída
• 2 tijeras podadoras	• Cosecha de material vegetal de regeneración, herbáceas y muestras de madera caída en diferentes estados de descomposición
• 2 cintas métricas, 30 m	• Marcar los límites de las parcelas, los transectos de madera caída y la distancia entre parcelas
• 1 cuerda de 26, con marcas al centro, a los 2, 7, 12 y 25 m	• Forma práctica y de bajo costo para marcar los límites de las parcelas circulares (2 y 7 m de radio), los transectos de madera caída (12 m de largo) y establecer la distancia entre parcelas (25 m)
• Marcos de medición hechos de PVC, metal o madera	• Medir de la biomasa de hojarasca (0,50 x 0,50 m) y de las herbáceas o regeneración (1 x 1 m)
• 1 prensa de herbario, papel periódico y alcohol	• Montar las muestras taxonómicas
• Balanza de resorte, 2,5-5 kg	• Pesar muestras de material fresco y submuestras en el campo
• Cinta métrica de carpintería, 3 m	• Medir la longitud de la muestra de densidad aparente
• 1 barreno para manglar (con extensiones)	• Extraer los núcleos de suelo de manglar a diferentes profundidades
• 1 vara telescópica para avalanchas (“ <i>snow probe</i> ”)	• Medir profundidad total del perfil de suelo del manglar
• 1 barreno para suelo consolidado	• Extraer núcleos de suelo consolidado en áreas bajo uso agropecuario, salineras, camaroneras
• 1 mazo de nylon	• Golpear el barreno para suelo consolidado
• 2 llaves francesas grandes	• Armar y desarmar el barreno y sus extensiones
• 1 tarro de grasa	• Recubrir las roscas del barreno y sus extensiones y evitar la corrosión

Equipo o material	Uso previsto
• 1 cuchillo mediano de cocina	• Limpiar los cortes longitudinales del núcleo de suelo extraído
• 1 cuchillo de mesa o una navaja de hoja delgada (5 cm de largo)	• Aislar y extraer la muestra de densidad aparente del suelo del barreno
• 1 esponja para lavar platos	• Limpiar el barreno
• Bolsas de basura grandes y alcohol	• Preservar las muestras taxonómicas y prevenir su descomposición
• Formularios impresos (con tablas para apuntar) o libretas de campo	• Anotar los datos medidos en el campo. Se recomienda el papel a prueba de agua
• Lápices, lapiceros, marcadores permanentes	• Tomar datos, realizar anotaciones y marcar muestras
• Sacapuntas	• Afilar los lápices
• Bolsas medianas de papel y plástico	• Recolectar las muestras de tejido vegetal
• Bolsas plásticas pequeñas	• Recolectar las muestras de suelos
• Etiquetas de papel	• Rotular muestras de suelos y otros
• Balde o recipiente plástico con agarradera	• Depositar y transportar las muestras de suelo
• Cinta topográfica de colores	• Marcar el transecto y el centro de las parcelas
• Botiquín de primeros auxilios	• Tratar laceraciones, torceduras e inmovilizaciones, así como medicamentos de venta libre contra reacciones alérgicas, dolores, etc.
• 700 bolsas ziplock pequeñas (tamaño sándwich) *	• Almacenar muestras
• 150 bolsas ziplock grandes (tamaño galón) *	• Almacenar bolsas de muestras pequeñas
• 2000 bolsas sencillas pequeñas de papel *	• Almacenar muestras durante el secado en el horno

**Nota:** \* las cantidades sugeridas corresponden a 20 sitios de muestreo, aproximadamente.

## ANEXO 2. EJERCICIO PARA ILUSTRAR EL MANEJO DE DATOS Y CÁLCULOS DE CARBONO PARA INVENTARIOS DE CARBONO AZUL EN MANGLARES

El objetivo de esta práctica es servir de introducción al manejo de datos y a los cálculos de las existencias de carbono en manglares, utilizando el software Microsoft Excel y siguiendo los pasos descritos en este manual. Los cuadros y figuras que se mencionan están ubicados en el cuerpo principal de este documento. El archivo con los datos está disponible en línea en:

<https://www.catie.ac.cr/publicaciones/manual-carbono-azul-anexo-2.rar>

### Descripción de la base de datos

Los datos son parte de inventarios forestales de carbono realizados en manglares de Centroamérica y están organizados en hojas de Excel, separados por componente del ecosistema medido en el campo (árboles  $d < 5$  cm, árboles  $d \geq 5$  cm, madera caída, suelos).

### Procedimiento

Para calcular las existencias de carbono en los distintos componentes del ecosistema de manglar y el total, se deben seguir los pasos siguientes. La intención del ejercicio es ilustrar los lineamientos generales de los métodos descritos en este manual y cómo cumplir con los principios de buenas prácticas. La sintaxis de las fórmulas aquí descritas asume que las opciones internacionales del sistema operativo de su computadora están configuradas para utilizar el punto decimal (y no la coma).

#### Paso 1 – Control de calidad

Debe revisarse la base de datos para verificar que no haya problemas y los datos estén íntegros. Entre los problemas comunes encontramos nombres científicos escritos de diferentes formas y diámetros fuera de los rangos de medición.

Para localizar estos problemas, utilice la función de Filtros en Excel. Una vez corregidos los nombres, determine si hay diámetros fuera de los rangos de medición. La forma más rápida de hacerlo es ordenando la base de datos de menor a mayor, teniendo el cuidado de seleccionar todo el bloque de datos. Recomendamos utilizar los métodos descritos por Casanoves *et al.* (2017).

#### Paso 2 - Cálculo de la biomasa aérea de árboles

Se recomienda leer los pasos 2 y 3 antes de comenzar a trabajar con la hoja de datos.

Para calcular la biomasa de los árboles se utilizan ecuaciones alométricas (Cuadro 3). La alometría permite relacionar medidas relativamente fáciles de determinar en el campo (diámetro, altura) con otras variables de más compleja medición directa (biomasa y carbono). En los manglares, los diámetros se miden a la altura del pecho (dap a 1,3 m de altura de la base del árbol) o por sobre la última raíz o deformidad del tallo. Las ecuaciones alométricas son específicas por especie, así que se debe usar la identificación de cada individuo para asignar las ecuaciones. Lo ideal es elegir ecuaciones desarrolladas en la región del área de estudio. Cuando eso no es posible, se usan ecuaciones generales construidas en áreas biogeográficas similares. También debe cuidarse el intervalo de validez de las ecuaciones y no calcular la biomasa para árboles que sobrepasen dicho intervalo.

Algunas ecuaciones alométricas usan valores de densidad de la madera ( $S_g$ ). Utilice los valores que encontrará en Cuadro 4 y el procedimiento descrito en este manual.

Para asignar los valores de densidad de la madera, utilizaremos la función condicional (IF o SI) de Excel. La fórmula condicional sigue la siguiente lógica:

=IF(Condición 1,valor de respuesta,valor alternativo)

Es decir, si el valor de una celda determinada es igual a la Condición 1, la fórmula desplegará el “valor de respuesta”. Caso contrario, desplegará el “valor alternativo”. Esta fórmula permite anidar condiciones para satisfacer varias secuencialmente. Con base en el siguiente ejemplo:

=IF(C2="Rhizophora mangle",0.945,IF(C2="Rhizophora racemosa",0.88,IF(C2="Laguncularia racemosa",0.6,IF(C2="Avicennia germinans",0.9,AVERAGE(0.898,0.88,0.66,0.806))))))

Si en la celda C2 está escrito *Rhizophora mangle*, el valor de  $S_g$  desplegado será 0.945. Si en la celda C2 no se encuentra ninguna de las especies listadas, entonces la fórmula calculará una  $S_g$  equivalente al promedio (función AVERAGE o PROMEDIO) de todas las  $S_g$  de las especies encontradas en el sitio. Si se tuvieran más especies que el límite condicional de la función, habría que utilizar la función VLOOKUP, basada en tener disponible una larga lista de especies con sus respectivos valores de  $S_g$ .

*¿Qué haría si en la base de datos no se encuentra la especie que usted necesita?*

Una vez completados los valores de  $S_g$ , escogeremos ecuaciones alométricas para cada especie a partir de la información del Cuadro 3. Debe ingresar dichas ecuaciones en la Columna biom\_a. Para facilitar el ingreso, vamos a filtrar los datos por nombre de especie. Para asegurar que el rango de validez de las ecuaciones coincida con los datos, vamos a ordenarlos de mayor a menor y asignar las ecuaciones tomando en cuenta sus valores de diámetro máximo ( $D_{max}$ ).

Lo ideal sería tener ecuaciones locales o, si se usan ecuaciones generales, que hayan sido validadas para el país. Sin embargo, si no encuentra ecuaciones para especies en su inventario, siga las instrucciones previas al Cuadro 3.

### Paso 3 – Corrección de biomasa muerta en pie

Para calcular la biomasa de los árboles muertos en pie, se utiliza un factor de corrección según el estado de descomposición del árbol (Figura 9). Esta corrección puede hacerse en una columna aparte, o al mismo tiempo que se calcula el paso anterior. La corrección consiste en multiplicar el valor de la biomasa del árbol muerto por el porcentaje de biomasa remanente, determinado visualmente en el campo y codificado en la base de datos. Para el ejemplo que estamos desarrollando, la ecuación sería:

(ecuación seleccionada para la especie)\*IF(G2=1,0.975,IF(G2=2,0.8,IF(G2=3,0.5,1)))

Esto para el código de la categoría de descomposición (1, 2 ó 3) con el porcentaje de biomasa remanente (97,5%, 80%, 50%, respectivamente). Si en la columna de la categoría de descomposición no hay un valor, entonces el resultado de la ecuación alométrica se multiplica por 1, preservando así el estimado original de la biomasa.



Es más eficiente escribir la ecuación alométrica junto con la fórmula para la corrección de la biomasa muerta en pie que hacer el cálculo de biomasa y luego editar las ecuaciones para agregar la corrección.

*¿Qué otra alternativa podría haber para realizar la corrección?*

#### Paso 4 - Cálculo de biomasa de raíces

Para calcular la biomasa de raíces, encuentre la ecuación de Komiyama *et al.* (2008) en el Cuadro 3.

#### Paso 5 – Convertir valores a hectárea

Los valores hasta ahora calculados corresponden a valores de masa (kg) de árboles individuales por parcela (153,94 m<sup>2</sup>). Para el reporte internacional, las unidades que se utilizan son MgC·ha<sup>-1</sup> (megagramos por hectárea). Recuerde que 1 Mg = 1 tonelada métrica. El factor de conversión se deriva de la siguiente manera, con biom\_a como ejemplo:

$$\frac{\text{valor biom}_a \text{ kg}}{153 \text{ m}^2} * \frac{10000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ Mg}}{1000000 \text{ g}} =$$

$$\frac{\text{valor biom}_a}{153} * \frac{10}{1} = 2.61 \frac{\text{Mg}}{\text{ha}}$$

Introduzca esta fórmula en las columnas BIOM\_A y BIOM\_R.

#### Paso 6 – Conversión de biomasa a carbono

Pese a que el IPCC (2003) sugiere utilizar un factor de 0,5 para convertir biomasa a carbono, la información más reciente sugiere que el contenido de carbono en la biomasa ronda alrededor de 0,47 y varía por especie y componente del ecosistema. Para efectos de la conversión de la biomasa aérea (biom\_a) y de raíces (biom\_r), utilizaremos la siguiente fórmula en las columnas Carbono\_A:

=IF(C2="Rhizophora mangle",K2\*0.4752,IF(C2="Pelliciera rhizophorae",K2\*0.4669,K2\*0.5))

Adapte la fórmula para Carbono\_R.

Como paso final, actualice la tabla dinámica que se encuentra en la hoja de cálculo. Esta tabla brinda la suma de las existencias de carbono para cada parcela dentro de un sitio.

**Repita este procedimiento (pasos 2-6) para los árboles con  $d < 5\text{cm}$ . ¿Todas las ecuaciones utilizadas anteriormente funcionaron bien? ¿Qué ajustes tendría que hacer y por qué?**

#### Paso 7 – Necromasa

El cálculo de la necromasa requiere un paso intermedio que utiliza la herramienta de tablas dinámicas para calcular la suma de los cuadrados del diámetro para cada categoría de tamaño de las piezas de necromasa.

Note que las piezas de madera se clasifican en la base de datos de acuerdo con su tamaño y su estado de descomposición.

Para calcular el volumen de la necromasa ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ), utilizaremos la fórmula de Brown & Roussopoulos (1974):

$$V = \frac{\pi \sum d^2}{8L}$$

Esta fórmula sencilla implica usar una tabla dinámica intermedia para calcular el cuadrado de todos los diámetros encontrados en un plano de intersección de 2 m de altura y  $L$  metros de largo (ya calculados en la base de datos como " $d^2$ "). Actualice la tabla dinámica. El contenido de carbono se obtiene multiplicando el resultado de la fórmula anterior por el la gravedad específica ( $Sg$ ) promedio de cada categoría de descomposición de la necromasa, y luego por 0,5. El cálculo se hace por categoría de tamaño de las piezas de necromasa y por categoría de descomposición, lo cual requiere usar nuevamente fórmulas condicionales. Los valores obtenidos ya están en unidades de  $Mg \cdot ha^{-1}$ .

Primero, para asignar el valor de  $Sg$ :

=IF(L2="2.5-7.5",0.5,(IF(M2="podrido",0.2,IF(N2="intermedio",0.35,0.5))))

Esta fórmula asigna una  $Sg$  de 0,5 a todas las piezas de madera de  $D$  entre 2,5 y 7,5 cm. Para las piezas con  $d > 7,5$  cm, la  $Sg$  es 0,2 si está podrida o 0,35 si está medianamente descompuesta, o 0,5 si está sólida.

Las piezas de necromasa se miden en el campo sobre el mismo transecto. Sin embargo, por efectos de representatividad en su muestreo, los largos efectivos de los transectos son diferentes. Por lo tanto, hay que calcular el valor de  $L$  para cada tamaño de piezas de necromasa. Esto se logra mediante la fórmula:

=IF(L2="2.5-7.5",(5\*4),(12\*4))

En este caso en particular, solo se utilizaron 2 longitudes de transectos: las piezas con  $D$  entre 2,5 y 7,5 cm se midieron en 4 transectos de 5 m de largo, y las piezas con  $d > 7,5$  cm en 4 transectos de 12 m de largo.

Como se mencionó anteriormente, para calcular la biomasa, se multiplica la fórmula del volumen por el valor de  $Sg$  de cada pieza de necromasa (Van Wagner 1982). Por tanto, usamos la fórmula:

=S2\*PI()\*N2/(8\*T2)

Para simplificar los cálculos, usaremos un factor de 0,5 para convertir biomasa en carbono en la columna siguiente.

=U2\*0.5

Como paso final, actualice la tabla dinámica que se encuentra en la hoja de cálculo. Esta tabla brinda la suma del carbono contenido en la necromasa para cada parcela dentro de un sitio.

## Paso 8 – Carbono total en el suelo

Para calcular la masa de carbono total en suelos es necesario conocer su profundidad, densidad aparente y concentración de carbono en las muestras. La densidad aparente se obtiene a través de muestras de volumen conocido que se secan hasta peso constante en un laboratorio. La concentración de carbono se obtiene en un laboratorio analítico, ya sea por combustión seca (lo más recomendable) o usando el método de pérdida por ignición (combustión de la muestra a 550 °C). La fórmula general para calcular el carbono en el suelo (en  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) es:

Carbono del suelo = %C \* densidad aparente ( $\text{g}\cdot\text{cm}^3$ ) \* intervalo de muestreo (cm)

Esto se traduce para la columna C\_suelo en:

=D2\*E2\*IF(C2="0-15",15,IF(C2="15-30",15,IF(C2="30-50",20,IF(C2="50-100",50,100))))

Nótese la función condicional para asignar el espesor del suelo en cada intervalo de profundidad muestreado:

0-15: 15 cm  
 15-30: 15 cm  
 30-50: 20 cm  
 50-100: 50 cm  
 100-300: 200 cm

La masa total de carbono en un perfil de suelo se obtiene sumando las masas de carbono de los intervalos de profundidad considerados. Para sumar el carbono hasta 1 m de profundidad (C\_suelo\_1m), use la función SUM y sume los primeros 4 intervalos de profundidad en la columna Profundidad. Para sumar el carbono hasta 3 m de profundidad (C\_suelo\_3m), sume los 5 intervalos de profundidad. Repita estas sumas para cada perfil, en la misma fila del intervalo de profundidad 0-15.

## Paso 9 – Construir una tabla general de resumen

En una hoja nueva, se pueden copiar los valores de las tablas dinámica de resumen de los componentes medidos: árboles  $\geq 5\text{cm d}$ ,  $< 5\text{cm d}$  (arriba del suelo y raíces), necromasa, suelo. Sin embargo, lo ideal es hacer una fórmula de referencia a partir de las tablas dinámicas, para que cualquier actualización a la base de datos se vea reflejada en la tabla de resumen. Esta tabla contendrá los promedios de los valores de los componentes del ecosistema, por cada sitio. Para esto, se utiliza la función de AVERAGE (PROMEDIO) de Excel.

El nivel de detalle de estas últimas tablas depende de cómo se requiera o se deseen presentar los datos. En este ejercicio se trabajará sólo con el promedio de la suma de carbono para cada componente, por parcela, pero las tablas dinámicas permiten separar ese valor entre sus componentes. Así, por ejemplo, podría tenerse el detalle del carbono aéreo y el carbono de las raíces. Se podría, además, hacer los cálculos de estructura horizontal o reportar el carbono por categoría diamétrica.

Para calcular el carbono total y del ecosistema, debe sumar los componentes independientes entre sí.

### Notas finales

Para convertir carbono en unidades de CO<sub>2</sub>, se multiplica por 3,67 (la razón 44/12 kg·mol<sup>-1</sup> de peso molecular entre el CO<sub>2</sub> y el C).

Es una buena práctica reportar los valores de carbono acompañados de su incertidumbre. Se pueden utilizar los estadísticos habituales: desviación estándar, error estándar o intervalos de confianza. En particular para el carbono total conformado por la suma de todos los componentes, son necesarios los procedimientos estadísticos particulares, descritos en Casanoves *et al.* (2017).

# APÉNDICE - RUTA PARA INCORPORAR LAS BASES CIENTÍFICAS DEL CARBONO AZUL EN LOS MARCOS POLÍTICOS E INSTITUCIONALES

Dado el reconocimiento de los ecosistemas relacionados con el carbono azul como elementos de respuesta ante los desafíos del cambio climático, los países necesitan esbozar y seguir una serie de fases, pasos y acciones enfocadas en desarrollar componentes técnicos, político-institucionales, financieros y sociales que permitan promover el desarrollo de acciones de carbono azul (Herr *et al.* 2016, UICN 2012). A continuación, exponemos los lineamientos generales para alcanzar esos objetivos, organizados bajo cuatro ámbitos o contextos de trabajo y ajustados a las condiciones de Centroamérica y el Caribe.

## ÁMBITO POLÍTICO-INSTITUCIONAL

Este ámbito contempla la necesidad de consolidar el apoyo político en los diferentes niveles de decisión del país, desde la institucionalidad de los Ministerios de Ambiente hasta las unidades técnicas regionales de las distintas instituciones involucradas en los procesos requeridos. Este respaldo político es imprescindible para asegurar que las iniciativas de carbono azul sean congruentes con otros planes, estrategias y acciones adoptadas y ya en curso en el sector ambiental de los países. El primer paso para lograr esto debe ser una socialización de los conceptos de carbono azul y promover una incidencia política del tema a lo largo de la verticalidad de las dependencias relevantes. Socializar los conceptos básicos del carbono azul permitirá manejar un lenguaje común y evitar malentendidos y expectativas falsas al momento de promover acciones de mitigación y adaptación al cambio climático. Por ejemplo, ayudaría a entender por qué los corales no están incluidos dentro de las discusiones internacionales sobre carbono azul.

Será necesario realizar un análisis de los marcos jurídicos existentes para incluir y/o construir el tema de carbono azul en las acciones nacionales. Esto permitirá, por un lado, determinar el contexto operativo de los conceptos y acciones de carbono azul que podrían desarrollarse, buscar interacciones con iniciativas en curso y, por otro, identificar los vacíos que deben ser saldados desde el punto de vista jurídico e institucional. En el caso de encontrar conflictos entre leyes vigentes, será necesario abordar procesos de armonización de las mismas. De la mano con este análisis, será importante identificar a los actores relevantes (del gobierno, academia, ONG, privados) y analizar sus capacidades institucionales y técnicas, actuales y futuras, para implementar iniciativas de carbono azul a nivel nacional.

A lo largo de este proceso, se debe tener en mente plantear una ruta crítica para consolidar nociones y acciones de carbono azul en el país. Además, podría considerarse la posibilidad de hacer “planteamientos país” acerca del tema en instancias internacionales como la CMNUCC, la CBD, RAMSAR y otras (BCPWG 2011). De hecho, varios países de Centroamérica y República Dominicana mencionan los ecosistemas marino-costeros como parte de sus contribuciones determinadas ante dicha convención (Herr y Landis 2016), lo cual abre las puertas para incluirlos en procesos globales de mitigación y adaptación al cambio climático. Aunque los sistemas de gobernanza local son diferentes a los de Centroamérica y el Caribe, las lecciones aprendidas de Pakistán, Vietnam y Tailandia (Bereznev *et al.* 2016) podrían contribuir en alguna medida a este proceso.



## ÁMBITO TÉCNICO

Los lineamientos técnico-científicos del carbono azul son promovidos por el Grupo de Trabajo Científico de la Iniciativa Internacional de Carbono Azul, del cual CATIE forma parte. Hay una serie de elementos que deben ser tomados en cuenta para promover acciones en este ámbito. El primero es recopilar todas las iniciativas en mangle y humedales que se han realizado en el país, y especificar a través de cuáles se han llevado a cabo inventarios de las existencias de carbono azul en manglares. Esta revisión ayudará a priorizar sitios y acciones de índole científico y técnico.

Las acciones relacionadas con el carbono azul tienen claros beneficios para la adaptación y la mitigación al cambio climático, así que habrá que definir sus alcances y priorizar acciones en una u otra dirección. Una alternativa sería potenciar iniciativas que busquen generar sinergias entre ambas acciones ante el cambio climático. En el ámbito de la mitigación, será imprescindible que las intervenciones en las áreas de manglar estén alineadas con la estrategia nacional de REDD+.

Para ello, el primer paso debe ser aclarar la definición nacional del concepto de manglar y si estos son considerados bosques o no bajo las definiciones legales y los mecanismos internacionales a los que están adscritos los países. A partir de ahí, se pueden definir cuáles ecosistemas se van a monitorear y si su clasificación ya existe en los mapas de uso de la tierra (dónde están los ecosistemas, cuánta área representan y su estado). En este sentido, es imprescindible que las metodologías de clasificación de uso de la tierra estén alineadas con el inventario nacional forestal (que vayan en la misma ruta de implementación y que la información generada pueda aportar al país y al sistema de MRV para REDD+) y las buenas prácticas internacionales.

Finalmente, y con base en lo anterior, se podrán oficializar las metodologías para realizar inventarios de carbono azul, otras para monitorear los recursos, y organizar bases de datos (plataformas, páginas web, sistema nacional de monitoreo de bosques, sistemas de información ambiental, etc.) y otras herramientas que permitan sistematizar la información y ponerla a disposición de distintos tipos de actores relevantes. Las metodologías guías de buenas prácticas recomendadas para cuantificar el carbono azul han sido desarrolladas, pilotadas y oficializadas en este manual y por CIFOR (Kauffman y Donato 2012, Kauffman *et al.* 2013), CATIE (BIOMARCC 2012, Cifuentes *et al.* 2015) y la Iniciativa Internacional de Carbono Azul (Howard *et al.* 2014). Por otra parte, las adiciones contenidas en el presente manual permiten no solo cuantificar las existencias actuales de carbono en los manglares y otros ecosistemas de carbono azul, sino también su evolución a lo largo del tiempo (tanto en área como en magnitud de existencias y emisiones).

## ÁMBITO FINANCIERO

Será necesario desarrollar al menos las siguientes cinco acciones. En primer lugar, debe promoverse una revisión y sistematización de opciones y mecanismos financieros existentes que podrían aprovecharse para diseñar e implementar iniciativas de carbono azul en el país. Esto permitirá iniciar la consideración del potencial de financiamiento y los mecanismos necesarios para lograr acceso a esos fondos. Segundo, casi en paralelo, se debe analizar la factibilidad de incorporar carbono azul a los mecanismos financieros existentes en el país, y tercero, realizar un análisis de prefactibilidad para determinar el potencial y las necesidades de financiamiento externo.

En cuarto lugar, de la mano de estas acciones, se debe elaborar una iniciativa de búsqueda de fondos a nivel internacional, o plantear el desarrollo de esquemas nacionales novedosos que permitan canalizar fondos

hacia la conservación y manejo de los ecosistemas marino-costeros. Finalmente, tras exponer la posición del país en círculos internacionales, y afianzar el interés en esas esferas, se pondría en marcha la estrategia de búsqueda de fondos.

## ÁMBITO SOCIAL

Las acciones en el ámbito social estarían centradas en la generación de capacidades nacionales y locales en el tema de carbono azul. Esto involucra talleres, cursos y otros eventos de formación e intercambio de experiencias con tomadores de decisión, técnicos y pobladores locales. Este conocimiento básico posibilitará sumar al lenguaje social que debe desarrollarse en el país para poner en marcha intervenciones de carbono azul. Además, permitirá empoderar a las comunidades locales y facilitar su involucramiento en la medición y monitoreo de las existencias de carbono y otros recursos en las áreas marino-costeras. El rescate del conocimiento y las costumbres locales en el manejo de los recursos será también un elemento importante para asegurar que las nuevas nociones de carbono azul puedan ser adoptadas en el quehacer local.

## VINCULACIÓN CON LA ESTRATEGIA NACIONAL REDD+ Y LOS INVENTARIOS NACIONALES DE GEI

La Iniciativa Internacional de Carbono Azul promueve el desarrollo de conocimiento y práctica para incluir los ecosistemas marino-costeros seleccionados (manglares, pastos marinos y marismas saladas) dentro de mecanismos y acuerdos internacionales de mitigación al cambio climático (Howard *et al.* 2014). Es claro además que proyectos de esta índole tienen el potencial de brindar beneficios de adaptación y desarrollo a las poblaciones rurales costeras (Arguedas *et al.* 2015).

Los manglares, en particular, son los ecosistemas con mayor potencial de inclusión a REDD+, puesto que este es un mecanismo forestal y los manglares caben dentro de la mayoría de las definiciones oficiales de “bosque” que se han comprometido a adoptar los países (basados en mínimos de área mínima, altura a la madurez y cobertura de copas). Se requiere que los manglares sean incluidos como una categoría o estrato particular de los inventarios o evaluaciones nacionales forestales (INF/ENF), para que sus datos de actividad y factores de emisión puedan ser incorporados dentro de los sistemas de MRV y los inventarios nacionales de GEI. Dependiendo de la dinámica de uso y cambio de uso de la tierra, los manglares pueden incluirse al menos dentro de los ámbitos de REDD+ bajo las categorías de deforestación y degradación evitada, conservación de existencias y regeneración. Es positivo que al menos 3 de los 16 países que mencionan a los manglares en sus documentos de preparación para REDD+ se encuentren en nuestra región (Costa Rica, Nicaragua, Panamá; BCPWG 2011).



# BIBLIOGRAFÍA

- Aceituno, MA; Cifuentes, CA; Cojóm, JI; Bosarreyes, AR. 2016. Estimación del contenido de carbono en el componente arbóreo del ecosistema manglar en el pacífico de Guatemala. Proyecto de Graduación. Diplomado Iniciativas REDD+ con énfasis en MRV y Salvaguardas. Ciudad de Guatemala, Guatemala. PNUD, CATIE. 22 p.
- Adame, MF; Kauffman, JB; Medina, I; Gamboa, JN; Torres, O. 2013. Carbon stocks of tropical coastal wetlands within the karstic landscape of the Mexican Caribbean. PLoS ONE 8(2) e56569. Consultado 21 nov. 2017. Disponible en: [doi:10.1371/journal.pone.0056569](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056569)
- Ahmad, F. 2012. Detection of change in vegetation cover using multi-spectral and multi-temporal information for district Sargodha, Pakistan. *Sociedade & Natureza* (en línea) 24(3):557–571. Consultado 21 nov. 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S1982-45132012000300014>
- Alongi, DM. 2002. Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation* 29(3):331-349.
- Arguedas, M; Medellín, C; Bouroncle, C. 2015. Asegurando los medios de vida en la península de Nicoya, Costa Rica, a través de la conservación y restauración del manglar. *Conservación Internacional*. San José, Costa Rica. 51 p. (Serie Técnica No. 2).
- Ayanaba, A; Tuckwell, SB; Jenkinson, DS. 1976. The effects of clearing and cropping on the organic reserves and biomass of tropical forest soils. *Soil biology & biochemistry* 8(6):519-525.
- BCPWG (Blue Carbon Policy Working Group). 2011. Blue Carbon Related Activities in International Agreements and Fora to Date. 24 p. (Background Document.)
- Beresnev, N; Phung, T; Broadhead, J. 2016. Mangrove related policy and institutional frameworks in Pakistan, Thailand and Viet Nam. Bangkok, Tailandia. FAO. 51 p.
- Bernstein, LS. 2012. Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades (en línea). *Optical Engineering* 51(11):111719. Consultado 24 Oct. 2017. Disponible en <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.11.111719>
- BIOMARCC-SINAC-GIZ. 2012. Evaluación de carbono en el Humedal Nacional Terraba-Sierpe. San José. Costa Rica. 33 p. (Serie Técnica 01).
- Brown, JK; Roussopoulos, PJ. 1974. Eliminating biases in the planar intersect method for estimating volumes of small fuels. *Forest Science* 20(4):350-356.
- Casanoves, F; Cifuentes Jara, M; Chacón, M. (eds.) 2017. Manual de buenas prácticas para la recolección, manejo y análisis de datos para la estimación de carbono en Inventarios Nacionales Forestales. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 110 p. (Serie Técnica, Informe Técnico no. 140).
- Castaneda, LF. 2015. Fortalecimiento de capacidades para la estimación de carbono azul como parte de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero e inventario forestal en El Salvador. Proyecto de Graduación. Diplomado Regional en Monitoreo de Servicios de los Ecosistemas con Énfasis en Acciones de Mitigación al Cambio Climático. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 20 p.

- Châve, J; Andalo, C; Brown, S; Cairns, MA; Chambers, JQ; Eamus, D; Fölster, H; Fromard, F; Higuchi, N; Kira, T; Lescure, JP; Nelson, BW; Ogawa, H; Puig, H; Riéra, B; Yamakura, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145:87-99.
- Châve, JC; Muller Landau, HC; Baker, TR; Easdale, TA; ter Steege, H; Webb, CO. 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2,456 neotropical tree species. *Ecological Applications* 16:2356-2367.
- Chaves, A 2008. Remote Sensing and GIS-Based Integrated Study and Analysis for Mangrove-Wetland Restoration in Ennore Creek, Chennai, South India (en línea). Proceeding of Taal 2007: The 12th World Lake Conference. pp. 685-690. Consultado 21 Oct. 2017. Disponible en <http://moef.nic.in/modules/recent-initiatives/nlcp/D - Remote Security GIS Application/D-9.pdf>
- Chen, C-F; Son, N-T; Chang, N-B; Chen, C-R; Chang, L-Y; Valdez, M; Aceituno, J. 2013. Multi-Decadal Mangrove Forest Change Detection and Prediction in Honduras, Central America, with Landsat Imagery and a Markov Chain Model (en línea). *Remote Sensing* 5(12):6408–6426. Consultado 9 nov. 2017. Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs5126408>
- Chudnoff, M. 1984. *Tropical Timbers of the World*. Washington, DC, USDA Forest Service. 826 p. Consultado Nov. 2017. Disponible en [http://www.esf.edu/wus/documents/TropicalTimbersoftheWorld-chud\\_total.pdf](http://www.esf.edu/wus/documents/TropicalTimbersoftheWorld-chud_total.pdf).
- Cifuentes Jara, M; Morales, D; Henry, M. 2013. Inventory of Volume and Biomass Tree Allometric Equations for Central and South America. UN-REDD MRV report 11, CATIE, Turrialba, Costa Rica, Food & Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 76 p.
- Cifuentes-Jara, M; Henry, M; Réchain, MR; Wayson, C; Zapata-Cuartas, M; Piotto, D; Alice Guier, F; Castañeda Lombis, H; Castellanos, E; Cuenca Lara, R; Cueva Rojas, K; del Águila Pasquel, J; Duque Montoya, Al; Fernández Vega, J; Jiménez Galo, A; López, OR; Marklund, LG; Michel Fuentes, JM; Milla, F; Návar Chaidez, J de J; Ortiz Malavassi, E; Pérez, J; Ramírez Zea, C; Rangel García, L; Rubilar Pons, R; Saint-André, L; Sanquetta, C; Scott, C; Westfall, J. 2014. Guidelines for documenting and reporting tree allometric equations. *Annals of Forest Science* (en línea) Consultado nov. 2017. Disponible en DOI: 10.1007/s13595-014-0415-z
- Cifuentes-Jara, M; Brenes, C; Manrow, M; Torres, D. 2015. Dinámica de uso de la tierra y potencial de mitigación de los manglares del Golfo de Nicoya. Conservación Internacional, San José, Costa Rica. 41 p. (Serie Técnica No. 1.)
- Cifuentes-Jara, M; Rivera, C; Magaña, J; Velázquez Mazariegos, S; Torres, D; Molina, O. 2017. Dinámica de cobertura del suelo y potencial de mitigación de los manglares de El Salvador. Memoria Técnica. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 174 p.
- Cintrón, G; Schaeffer-Novelli, Y. 1984. Methods for studying mangrove structures. *En: The mangrove ecosystem: research methods*. S.C. Saenger y J.G. Snedaker (eds.). Monographs in Oceanographic Methodology 8. UNESCO. pp. 91-113.
- Clough, BF; Scott, K. 1989. Allometric relationships for estimating aboveground biomass in six mangrove species. *Forest Ecology & Management* 27:117–127.
- Coll, M; Fonseca, AC; Cortés, J. 2001. El manglar y otras asociaciones vegetales de la laguna de Gandoca, Limón, Costa Rica. San José, Costa Rica, UCR, Escuela de Biología. Consultado: 22-11-2011. Disponible en <http://www.ots.ac.cr/rbt/attachments/suppl/sup49-2%20EACR%20II/31-COLLEL.pdf>.



- Comley, BWT; McGuinness, KA. 2005. Above- and below-ground biomass, and allometry of four common northern Australian mangroves. *Aust. J. Bot.* 53:431–436.
- Córdova-Ortiz, DA. 2015. Estudio de Línea Base de los Servicios Ecosistémicos de Provisión y Aportes a Modelos de Gobernanza Local de Conservación y Restauración Inclusiva en el Ecosistema de Manglar del Bajo Lempa, Estero Jaltepeque. San Salvador, El Salvador. CATIE. 178 p.
- Coronado-Molina, C; Day, J; Reyes, E; Perez, B. 2004. Standing crop and aboveground biomass partitioning of a dwarf mangrove forest in Taylor River Slough, Florida. *Wetlands Ecology and Management* 12:157–164.
- Costanza, R; D'Arge, R; de Groot, R; Farber, S; Grasso, M; Hannon, B; Limburg, K; Naeem, S; O'Neill, RV; Paruelo, J; Raskin, RG; Sutton, P; van del Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253-260.
- Costanza, R; de Groot, R; Sutton, P; van der Ploeg, S; Anderson, SJ; Kubiszewski, I; Farber, S; Turner, RK. 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change* 26:152-158.
- Day, JW; Conner, WH; Ley, LF; Day, RH; Navarro, AM. 1987. The productivity and composition of mangrove forests, Laguna de Terminos, Mexico. *Aquat. Bot.* 27:267–284.
- Detienne, P; Jacquet P; Mariaux, A. 1982. Manuel d'Identification des Bois Tropicaux, Tome 3: Guyane Francaise. Centre Technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne, France. 315 p.
- Detienne, P; Jacquet, P. 1983. Atlas d'Identification des Bois de l'Amazonie et des Regions Voisines. Centre Technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne, France. 640 p.
- Donato D; Kauffman, JB; Murdiyarso, D; Kurnianto, S; Stidham, M; Kanninen, M. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience* 4:293-294.
- Dow, E.J. 2008. The Effect of Land Use/Land Cover on Mangrove Forest in the Northeastern Panama Canal Region. *Development Impacts on Mangrove Forest.* (en línea). Berkeley, California. University of Berkeley. Consultado 24 Oct. 2017. 23p. Disponible en [https://nature.berkeley.edu/classes/es196/projects/2008final/Dow\\_2008.pdf](https://nature.berkeley.edu/classes/es196/projects/2008final/Dow_2008.pdf)
- Ellert, B.H.; Bettany, J.R. 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science* 75(4):52-38.
- Ellert, B. H.; Janzen, H.H.; McConkey, B.G. 2001. Measuring and comparing soil carbon storage. Chapter 10. *Assessment methods for soil carbon.* En: *Assessment methods for soil carbon.* R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follet y B.A. Stewart (eds.). Boca Raton, Florida. Lewis Publishers. pp. 13-46.
- Ellert, B.H.; Janzen, H.H.; Entz, T. 2002. Assessment of a method to measure temporal change in soil carbon storage. *Soil Science Society of America Journal* 66:1687-1695.
- Elmahdy, S. I.; Mohamed, M. M.; Emirates, U. A. 2013. Change detection and mapping of mangrove using multi-temporal remote sensing data: a case study of Abu Dhabi, UAE. *Journal of Geomatics* 7(1):41–46.
- Emmer, I.; von Unger, M.; Needelman, B.; Crooks, S.; Emmet-Mattox, S. 2015. Coastal blue carbon in practice: A manual for using the VCS methodology for tidal wetland and seagrass restoration VM0033. *Restore America's Estuaries.* Arlington, VA, USA. 82 p.
- Fanshawe, D.B. 1961. Forest products of British Guiana I: principal timbers. *Forestry Bulletin (New Series).* Forest Department, Georgetown, British Guiana By H ter Steege.

- FAO. 1995. Forest resources assessment 1990. Global Synthesis. FAO Forestry Paper 124. Roma, Italia. FAO. Consultado Nov. 2017. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/007/v5695e/v5695e00.htm>
- FAO. 2007. The World's Mangroves 1980–2005; FAO Forestry Paper 153; FAO: Roma, Italia. Consultado Nov. 2017. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1427e/a1427e00.pdf>
- Fonseca, A; Cortés; Zamora, P. 2006. Monitoreo del manglar de Gandoca, Costa Rica (sitio CARICOMP). *Biología Tropical* 55(1): 23-31. Consultado 21 nov. 2017. Disponible en: <http://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v55n1/3603.pdf>.
- Fromard, F.; Puig, H.; Mougin, E.; Marty, G.; Betoulle, J.L.; Cadamuro, L. 1998. Structure above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: New data from French Guiana. *Oecologia* 115 39–53.
- Gilman, E.; Van Lavieren, H.; Ellison, J.; Jungblut, V.; Wilson, L.; Areki, F.; Brighthouse, G.; Bungitak, J.; Dus, E.; Henry, M.; Sauni Jr., I.; Kilman, M.; Matthews, E.; Teariki-Ruatu, N.; Tukia, S.; Yuknavage, K. 2006. Pacific Island Mangroves in a Changing Climate and Rising Sea. UNEP Regional Seas Reports and Studies No. 179. Nairobi, Kenia. United Nations Environment Programme, Regional Seas Programme. 58 p.
- Giorgi, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33(L08707). 4 p. Consultado 21 nov. 2017. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006GL025734/epdf>
- GOFC-GOLD. 2016. A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation. GOFC-GOLD Report version COP22-1. Wageningen University. Holanda. GOFC-GOLD Land Cover Project Office. 268 p.
- Herr, D.; Pidgeon, E.; Laffoley, D. (eds.) 2012. Blue carbon policy framework 2.0. Gland, Suiza. UICN. 39 p.
- Herr, D.; Landis, E. 2016. Coastal blue carbon ecosystems. Opportunities for Nationally Determined Contributions. Policy Brief. Gland, Suiza. IUCN. 277p.
- Heumann, B. W. 2011a. An object-based classification of mangroves using a hybrid decision tree-support vector machine approach. *Remote Sensing* 3(11):2440-2460. Consultado 9 Nov. 2017. Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs3112440>
- Heumann, B. W. 2011b. Remote Sensing of Mangrove Composition and Structure in the Galapagos Islands. Ph.D. Dissertation. Chapel Hill, USA. University of North Carolina, Department of Geography. 154 p.
- Hewson, J.; Steininger, M.K.; Pesmajoglou, S. (eds.) 2014. REDD+ Measurement, Reporting and Verification (MRV) Manual, Version 2.0. USAID-supported Forest Carbon, Markets and Communities Program. Washington, DC, USA. 199 p.
- Hirata, Y.; Tabuchi, R.; Patanaponpaiboon, P.; Pongpam, S.; Yoneda, R.; Fujioka, Y. 2010. Estimation of Aboveground Biomass in Mangrove Forest Damaged by the Major Tsunami Disaster in 2004 in Thailand Using High Resolution Satellite Data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science* XXXVIII:643–646.
- Howard, J.; Hoyt, S.; Isensee, K.; Telszewski, M.; Pidgeon, E. (eds.) 2014. Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses. Arlington, Estados Unidos, Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Washington, DC, USA. 182 p.
- Hussain, M.; Chen, D.; Cheng, A.; Wei, H.; Stanley, D. 2013. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches (en línea). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 80:91–106. Consultado Nov. 2017. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006>

- Imbert, D; Rollet, B. 1989. Phytmassaerienne et production primaire dans la mangrove du Grand Cul-de-sac marine (Guadeloupe, Antilles Francaises). Bull. Ecol. 20:27–39.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. En: J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, F. Wagner (eds). Hayama, Japón. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. 590 p. Consultado Nov. 2017 Disponible en [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpoglulucf/gpoglulucf\\_files/GPG\\_LULUCF\\_FULL.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpoglulucf/gpoglulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf)
- Jiménez, JA. 1994. Los manglares del Pacífico centroamericano. Heredia, Costa Rica, UNA. 352 p.
- Jobse, CJ. 2008. Impacts of forest-to-agriculture conversion on aboveground and soil carbon and nitrogen stocks along bioclimatic gradient in Costa Rica. Dr. Phil. thesis. Oregon State University.
- Kauffman, J.B.; Cole. T. 2010 Micronesian mangrove forest structure and tree response to a severe typhoon. Wetlands 30:1077-1084.
- Kauffman, J; Donato, D 2012. Protocols for the measurement, monitoring, and reporting of structure, biomass, and carbon stocks in mangrove forests. Working Paper 86. Bogor, Indonesia. CIFOR. 40 p.
- Kauffman, J; Donato, D; Adame, M F. 2013. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. Documento de Trabajo 117. Bogor, Indonesia. CIFOR. 48 p.
- Kauffman, J ; Heider, C; Norfolk, J; Payton, F. 2014. Carbon stocks of intact mangroves and carbon emissions arising from their conversion in the Dominican Republic. Ecological Applications 24(3):518–527.
- Komiyama, A ; Havanond, S; Srisawatt, W; Mochida, Y; Fujimoto, K; Ohnishi, T; Ishihara, S; Miyagi, T. 2000. Top/ root biomass ratio of a secondary mangrove (*Ceriops tagal* (Perr.) C. B. Rob.) forest. Forest Ecology and Management 139:127–134.
- Komiyama, A; Pongparn, S; Kato, S. 2005. Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. Journal of Tropical Ecology 21:471–477.
- Komiyama, A; Ong J; Pongparn, S. 2008. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. Aquatic Botany 89:128–137.
- Kuenzer, C; Bluemel, A; Gebhardt, S; Quoc, T; Dech, S. 2011. Remote Sensing of Mangrove Ecosystems: A Review. Remote Sensing 3:878-928. Consultado Nov. 2017. Disponible en DOI:10.3390/rs3050878
- Laongmanee, W; Vaiphasa, C; Laongmanee, P. 2013. Assessment of Spatial Resolution in Estimating Leaf Area Index from Satellite Images: A Case Study with *Avicennia Marina* Plantations in Thailand. International Journal of Geoinformatics 9(3):69-77.
- Larios, N. 2017. El rol de los servicios ecosistémicos de los manglares en la generación de medios de vida locales en el estero de Jaltepeque, Bajo Lempa, El Salvador. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 56 p.
- Little, E; Wadesworth, FH. 1964. Common trees of Puerto Rico and the Virgin Islands. US Department of Agriculture, Superintendent of Documents, US Government Printing Office. Washington, D.C., USA. 548 p. (Agricultural Handbook 249).
- Liu, K; Li, X; Shi, X; Wang, S. . 2008. Monitoring forest changes using remote sensing and GIS data with decision-tree learning. Wetlands 28(2) 336-346.
- Lopez, R; Lyon, J; Lyon, L; Lopez, D. 2013. Wetland Landscape Characterization: Practical Tools, Methods, and Approaches for Landscape Ecology (en línea). 2 ed. Boca Raton, Estados Unidos, CRC Press. 297 p. Consultado Nov. 2017. Disponible en <https://doi.org/10.1201/b14057>

- MAE (Ministerio del Ambiente del Ecuador). 2012. Manual de campo: Estratos de bosque: manglares y moretales. Ministerio del Ambiente del Ecuador. Quito, Ecuador. 88 p.
- Manrow, M; Vílchez, B.; 2012. Estructura, composición florística, biomasa y carbono arriba del suelo en los manglares Laguna de Gandoca y Estero Moín, Limón, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 9(23):1-18.
- MacLean, M; Congalton, R G. 2012. Map accuracy assessment issues when using an object-oriented approach. *Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. Marzo 19-23. Sacramento, California, USA. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 5 p. Consultado Nov. 2017. Disponible en <https://www.asprs.org/a/publications/proceedings/Sacramento2012/files/MacLean.pdf>
- Malavassi, C. 1992. Maderas de Costa Rica: 150 Especies forestales. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 338 p.
- McLeod, E; Rodney, VS. 2006. *Managing Mangroves for Resilience to Climate Change*. Gland, Suiza. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. 63 p. (IUCN Resilience Science Group Working Paper No. 2).
- MiAmbiente (Ministerio de Ambiente de Panamá); PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2017. Implementación del Protocolo de Medición de Carbono en Ecosistemas de Manglares en los Distritos de Remedios, San Félix y San Lorenzo: Informe de resultados. (*En prep.*) Proyecto Protección de Reservas y Sumideros de Carbono en los Manglares y Áreas Protegidas de Panamá. PNUD, Ciudad del Saber, Panamá. 25 p.
- Mills, H; Jones, J B. 1996. *Plant analysis Handbook II*. Micro macro Publishing, Inc. U.S.A. 422 p.
- Murdiyarto, D; Donato, D; Kauffman, J; Kurnianto, S; Stidham, M; Kanninen, M. 2009. Carbon storage in mangrove and peatland ecosystems: A preliminary account from plots in Indonesia. Bogor, Working Paper 48. Indonesia. CIFOR. 35 p.
- Myint, S W; Giri, C; Wang, L; Zhu, Z; Gillette, S C. 2008. Identifying Mangrove Species and Their Surrounding Land Use and Land Cover Classes Using an Object-Oriented Approach with a Lacunarity Spatial Measure (en línea). *GIScience & Remote Sensing* 45(2):188–208. Consultado 9 Nov. 2017. Disponible en <https://doi.org/10.2747/1548-1603.45.2.188>
- Nelson, DW; Sommers, LE. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *En*: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltapour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston, M.E. Sumner (eds.) *Methods of soil analysis: Part 3, chemical methods*. Madison, Wisconsin, USA. Soil Science Society of America, Inc. y American Society of Agronomy. pp. 961-1010 (SSSA Book Series 5.3.)
- Nguyen, H; McAlpine, C; Pullar, D; Johansen, K; Duke, N C. 2013. The relationship of spatial-temporal changes in fringe mangrove extent and adjacent land-use: Case study of Kien Giang coast, Vietnam (en línea). *Ocean and Coastal Management* 76:12–22. Consultado 9 Nov. 2017. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.01.003>
- Ong, J; Gong, W; Wong, C H. 2004. Allometry and partitioning of the mangrove, *Rhizophora apiculata*. *Forest Ecol. Manage.* 188:395–408.
- ONU-REDD. 2013. *Sistemas Nacionales de Monitoreo de los bosques: monitoreo, medición, reporte y verificación (M y MRV) en el contexto de actividades de REDD+*. Programa ONU-REDD, FAO; PNUD, PNUMA, Roma. 27 p.

- Pearson, T; Walker, S; Brown, S. 2015. Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects. BioCarbon Fund y Winrock International. Maryland, USA. 57 p.
- Penman, J; Gytarsky, M; Hiraishi, T; Krug, T; Kruger, D; Pipatti, R; Buendia, L; Miwa, K; Ngara, T; Tanabe, K; Wagner, F. (Eds.). 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. Consultado 24 Oct. 2017. Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.html>
- Peralta-Rivero, C; Torrico-Albino, J.; Vos, V; Galindo-Mendoza, M G.; Contreras-Servín, C. 2015. Tasas de cambios de coberturas de suelo y deforestación (1986-2011) en el municipio de Riberalta, Amazonía boliviana (en línea). *Ecología en Bolivia* 50(2):91–114. Consultado 24 Oct. 2017. Disponible en [http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v50n2/v50n2\\_a03.pdf%5Cfile:///scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1605-25282015000200003&lang=pt](http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v50n2/v50n2_a03.pdf%5Cfile:///scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282015000200003&lang=pt)
- Picard N; Saint-André L. Henry M. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). Roma, Italia. 223 p.
- Pool, DJ; Snedaker, SC; Lugo, AE. 1977. Structure of mangrove forests in Florida, Puerto Rico, Mexico, and Costa Rica. *Biotropica* 9: 195-212. Consultado el 22-11-2011. <http://www.mangroverestoration.com/pdfs/Pool%20et%20al%201977.pdf>
- Pontius Jr., RG. 2000 Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66:1011-1016.
- Pontius, RG.; Shusas, E; McEachern, M. 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence (en línea). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 101(2–3):251–268. Consultado 9 Nov. 2017. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Poungparn, S. 2003. Common allometric relationships for estimating the biomass of mangrove forests. Ph.D. dissertation. Gifu, Japón. Gifu University. 87 p.
- Puyravaud, J P. 2003. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation (en línea). *Forest Ecology and Management* 177(1–3):593–596. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3)
- Rabiatul Khairunnisa, M R.; Mohd Hasmadi, I. 2012. Biomass and Carbon in Mangrove: Measuring and Managing through Remote Sensing Technique. *Malaysia Geospatial Forum* 6-7:12.
- Reddy, S; Roy, A. 2008. Assessment of Three Decade Vegetation Dynamics in Mangroves of Godavari Delta, India, Using Multi-Temporal Satellite Data and GIS (en línea). *Research Journal of Environmental Sciences* 2(2):108-115.
- República Dominicana. 2015. NS-189 – Blue carbon NAMA: Conserve and restore mangroves in the Dominican Republic. Santo Domingo, República Dominicana. Consejo Nacional de Cambio Climático y del Mecanismo de Desarrollo Limpio, Gobierno de República Dominicana. 4 p.
- Rodríguez, C. 2017. La mitigación al cambio climático del Parque Nacional Sipacate-Naranjo. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 50 p.
- Ross, M; Ruiz, P; Telesnicki, G; Meeder, JF. 2001. Estimating above-ground biomass and production in mangrove communities of Biscayne National Park, Florida (USA). *Wetlands Ecology and Management* 9:27–37.



- Saenger, P. 2002 *Mangrove ecology, silviculture, and conservation*. Dordrecht, Holanda. Kluwer Academic Publishers. 360 p
- Smith III, T.J.; Whelan, K T. 2006. Development of allometric relations for three mangrove species in South Florida for use in the Greater Everglades Ecosystem restoration. *Wetlands Ecology and Management* 14:409–419.
- Soares, M G.; Schaeffer-Novelli, Y. 2005. Above-ground biomass of mangrove species. I. Analysis of models. *East. Coast Shelf Sci.* 65:1–18.
- Soil Survey Staff. 1996. *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 3.0. USDA-NRCS-NSSC. Estados Unidos. 693 p.
- Spalding, M. 1997. The global distribution and status of mangrove ecosystems. *Int. Newslett. Coast. Manage* 1:20–21.
- Sremongkontip, S; Hussin, Y; Groenindijk, L. 2000. Detecting changes in the mangrove forests of southern Thailand using remotely sensed data and GIS (en línea). *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33(Part B7):567-574. Consultado 21 Nov. 2017. Disponible en [http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part7/567\\_XXXIII-part7.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part7/567_XXXIII-part7.pdf)
- Tam, N Y.; Wong, Y ; Lan, C ; Chen, G Z. 1995. Community structure and standing crop biomass of a mangrove forest in Futian Nature Reserve, Shenzhen, China. *Hydrobiología* 295:193–201.
- Tamai, S; Nakasuga, T; Tabuchi, R; Ogino, K. 1986. Standing biomass of mangrove forests in southern Thailand. *J. Jpn. Forest Soc.* 68:384–388.
- ThermoScientific. 2001. *Flash EA 1112 Elemental Analyzer Operation Manual*, 3ra. ed. ThermoFinnigan Italia. Milan, Italia. 338 p. (Technical Publications)
- UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). 2012. *Guidance for national blue carbon activities: Fast-tracking national implementation in developing countries*. Washington, D.C., USA. UICN. 6 p.
- Valiela, I; Bowen, J; York, J K. 2001. Mangrove forests: One of the world’s threatened major tropical environments. *Bioscience* 51:807-815.
- Van Wagner, C E. 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. *Forest Science* 14(1):20-25.
- Van Wagner, C E. 1982. *Practical aspects of the line intersect method*. Information report PI-X-12. Petawa National Forestry Institute. Ontario, Canada. 18 p.
- VCS (Verified Carbon Standard). 2015. *VM0033 Methodology for Tidal Wetland and Seagrass Restoration*, version 1.0. Restore America’s Estuaries. Arlington, VA, USA. Verified Carbon Standard. 115 p.
- Vink, A T. 1983. *Surinam Timbers*. State Forest Industries, Paramaribo, Suriname By H Muller-Landau.
- Velásquez, S. 2015. *Aplicaciones de teledetección para el análisis de cambios de uso del suelo y cuantificación de flujos de carbono*. Curso-Taller “Mediciones de carbono azul en El Salvador”. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 225 p.
- Vo, QT; Oppelt, N; Lienekugel, P; Kuenzer, C. 2013. Remote sensing in mapping mangrove ecosystems — an object-based approach. *Remote Sensing* 5:183-201.
- Wells ,S; Ravilous, C; Corcoran, E. 2006. *In the Front Line: Shoreline Protection and Other Ecosystem Services from Mangroves and Coral Reefs*. Cambridge, Reino Unido. United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre. 33 p.

- Yuvaraj, E; Dharanirajan, K; Karpoorasundarapandian, N. 2014. Evaluation of Vegetation density of the Mangrove Forest in South Andaman Island using Remote Sensing and GIS techniques. *International Research Journal of Environment Sciences* 3(8):19–25.
- Zamora-Trejos, P; Cortés, J. 2009. Los manglares de Costa Rica: el Pacífico Norte. *Revista Biología Tropical* 57(3):473-488.
- Zanne, A E; Lopez-Gonzalez, G; Coomes, D A; Ilic, J; Jansen, S; Lewis, S L; Miller, R B; Swenson, N G; Wiemann, M C; Chave, J. 2009. Global wood density database. Dryad. (en línea) Consultado Nov. 2017. Disponible en <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>



CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) y el Estado de Acre en Brasil.



ISBN: 978-9977-57-679-4



9 789977 576794