

EVALUACIÓN DE CARBONO A NIVEL DE ECOSISTEMA EN EL ÁREA SILVESTRE PROTEGIDA HUMEDAL TÉRRABA-SIERPE



Mayo Pr

Por encargo de:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit



El Proyecto Biodiversidad Marino Costera en Costa Rica, Desarrollo de Capacidades y Adaptación al Cambio Climático es un proyecto en el marco de la Iniciativa Internacional de la Protección del Clima "IKI" del Ministerio de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania

Publicado por: BIOMARCC-SINAC-GIZ

Investigación y Reporte Técnico: Miguel Cifuentes Jara del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE

Coordinación y Revisión: BIOMARCC-SINAC-GIZ

Copyright: © 2012. BIOMARCC-SINAC-GIZ

Esta publicación puede citarse sin previa autorización con la condición que se mencione la fuente

Citar como: BIOMARCC-SINAC-GIZ. 2012. *Evaluación de carbono en el Humedal Nacional Térraba-Sierpe*. San José-Costa Rica. 26 pags.

Fotografías: Humedal Térraba Sierpe/Yamil Saénz

Financiamiento: “ Proyecto Biodiversidad Marino Costera en Costa Rica, Desarrollo de Capacidades y Adaptación al Cambio Climático (BIOMARCC-SINAC-GIZ)”

Las opiniones que el autor expresa en esta publicación no reflejan necesariamente las opiniones del Proyecto BIOMARCC-GIZ-SINAC.

SINAC

El Sistema Nacional de Áreas de Conservación de Costa Rica (SINAC) es un sistema de gestión institucional desconcentrado y participativo, que integra las competencias en materia forestal, de vida silvestre y áreas silvestres protegidas del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET), con el fin de dictar políticas, planificar y ejecutar procesos dirigidos a lograr la sostenibilidad en el manejo de los recursos naturales de Costa Rica. (Ley de Biodiversidad 1998). El SINAC está constituido por once subsistemas denominados Áreas de Conservación y su Sede Central. Un Área de Conservación es una unidad territorial administrativamente delimitada, en donde se interrelacionan actividades tanto privadas como estatales y se buscan soluciones conjuntas, orientadas por estrategias de conservación y desarrollo sostenible de los recursos naturales.

“El SINAC es un concepto de conservación integral que ofrece la posibilidad de desarrollar una gestión pública responsable, con la participación del Estado, la Sociedad Civil, la empresa privada, y de cada individuo del país interesado y comprometido con la construcción de un ambiente sano y ecológicamente equilibrado”.

BIOMARCC

BIOMARCC-SINAC-GIZ, es un proyecto de apoyo al Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC-MINAET) ejecutado por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, por encargo del Ministerio Alemán de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU) en el marco de su Iniciativa Protección del Clima (IKI).

El objetivo principal del proyecto es *“Incrementar las capacidades de adaptación de los ecosistemas marino-costeros de Costa Rica ante las consecuencias del Cambio Climático”* y tiene como objetivos específicos:

1. Contribuir a establecer un Sistema de Áreas Protegidas Marino – Costeros ecológicamente representativo adaptado al cambio climático.
2. Fortalecer las capacidades de gestión de las instituciones responsables del manejo de áreas de conservación marino - costeras y de otros actores locales relevantes, especialmente referentes a los desafíos del cambio climático.
3. Elaborar e implementar conceptos y mecanismos financieros para la adaptación de las Áreas Protegidas Marino – Costeras al Cambio Climático con la participación activa de los actores relevantes.
4. Establecer una plataforma de información, comunicación y cooperación (Mecanismo de Facilitación Nacional) que permita el intercambio y la transferencia de conocimientos y experiencias sobre manejo de los ecosistemas marino - costeros y su adaptación al Cambio Climático entre los actores relevantes (SINAC; MINAET; Instituciones Científicas; grupos y población locales).
5. Validar y transferir conceptos, instrumentos y estrategias desarrollados en el marco del proyecto hacia otros países de la región centroamericana.

333.72
C8374e

Costa Rica. Biodiversidad Marina y Costera de Costa Rica
Evaluación de carbono a nivel de ecosistema en el área silvestre protegida humedal terraba-sierpe / Biodiversidad Marina y Costera de Costa Rica. - - 1ª ed. - - San José, C.R.: Biodiversidad Marina y Costera de Costa Rica, Creación de Capacidades y Adaptación al cambio climático, 2013.
30 p. - (Serie Técnica)

ISBN 978-9930-9485-0-7

1. DIOXIDO DE CARBONO 2. EVALUACION DEL IMPACTO AMBIENTAL 3. RECURSOS NATURALES 4. RIO GRANDE DE TERRABA 5. SIERPE 6. HUMEDALES 7. ECOSISTEMAS- INVESTIGACIONES 8. COSTA RICA
I. Titulo

Contenido

Glosario ii

Abreviaturas..... iii

Resumen ejecutivo..... iv

Antecedentes del proyecto 1

Biomasa y carbono en los manglares 2

Materiales y métodos..... 6

 El Humedal Nacional Térraba–Sierpe 6

 Diseño del inventario..... 8

 Cuantificación de la biomasa sobre el suelo 11

 Muestreo de suelo..... 11

 Análisis de los datos y muestras recolectadas 12

Resultados y discusión..... 14

 Existencias de carbono epigeo 14

 Existencias de carbono del suelo 17

 Existencias de carbono a nivel de ecosistema y flujos históricos de emisiones 19

Desafíos, impactos y pasos futuros 22

Bibliografía 24

Glosario

Almacenamiento de carbono: Capacidad de los ecosistemas naturales de extraer CO₂ de la atmósfera y convertirlo en biomasa

Alometría: Técnica matemática que relaciona las dimensiones de una parte de un organismo vivo o un ecosistema con su totalidad. En el cálculo de carbono se usan modelos (ecuaciones) alométricas que relacionan el diámetro y la altura de un árbol con su biomasa.

Anóxica: Condición referida a la carencia de oxígeno en suelos anegados.

Biomasa: Tejido vegetal producido por la vegetación conforme crece.

Carbono azul: Referente al carbono en ecosistemas marino-costeros (manglares, pastos marinos y marismas).

Emisiones: Cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) que se liberan a la atmósfera a partir de los usos de la tierra o sus cambios.

Epigeo: Referido a la materia orgánica que se encuentra sobre el suelo.

Existencias de carbono: Cantidad de carbono almacenado en los tejidos vegetales y el suelo en un ecosistema. Para este informe en particular, las existencias de carbono a nivel de ecosistema consideran el carbono en el suelo hasta 1 m de profundidad solamente.

Humedal: Un área temporal o permanentemente inundada debido al influjo de aguas superficiales o subterráneas.

Mitigación: Estrategia para enfrentar al cambio climático consistente en procurar reducir las concentraciones de CO₂ en la atmósfera o aumentar las existencias de carbono en la biosfera.

Modelo alométrico: Ecuación matemática que relaciona características de un árbol (diámetro, altura, densidad de la madera) con su biomasa.

Parcela anidada: Método de inventario que permite recopilar información de diferentes componentes de un ecosistema en un mismo sitio.

Productividad primaria neta (NPP): Cantidad neta de materia orgánica sintetizada por los organismos en una superficie determinada y durante un tiempo definido.

Transecto: Línea de longitud definida sobre la cual se toman datos en el campo.

Variables dasométricas: Medidas del tamaño de los árboles (diámetro, altura).

Abreviaturas

ANDEVA: Análisis de varianza

C: carbono

GEI: gas(es) de efecto invernadero

ha: hectárea (10000 m²)

Mg: Megagramo (10⁶ gramos), 1 tonelada

NPP: Productividad primaria neta

Pg: Petagramo (10¹⁵ gramos), 1 mil millones de toneladas

t: tonelada (1000 kg, 1 Mg)

Tg: Teragramo (10¹² gramos), 1 millón de toneladas

Resumen ejecutivo

Los manglares tropicales proveen una gran diversidad de servicios ecosistémicos, entre los cuales se destaca la captura y secuestro del carbono atmosférico. Sin embargo, este potencial no ha sido cuantificado sistemáticamente en Centroamérica. Bajo el auspicio del Proyecto Biodiversidad Marino Costera y Adaptación al Cambio Climático (BIOMARCC) de la GIZ se realizó esta primera iniciativa nacional para cuantificar las existencias de carbono a nivel de ecosistema en el Humedal Nacional Terraba-Sierpe, en el sur de Costa Rica.

Se muestrearon 28 áreas en total, ubicadas a lo largo de los cauces de los 4 principales ríos que drenan el Humedal: Terraba (Diquís), Zacate, Guarumal y Sierpe. En cada sitio de muestreo se cuantificó el carbono en los componentes del ecosistema (árboles en pie, regeneración, herbáceas, hojarasca y madera caída) mediante métodos estandarizados a nivel internacional. Además, se obtuvieron muestras de suelo hasta 1 m de profundidad. En conjunto, los estimados de carbono obtenidos de todos estos componentes representan las existencias de carbono a nivel de ecosistema.

A nivel general, la existencia promedio de carbono epigeo fue de $72.5 \pm 3.2 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ (rango: 9 - $241 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$), valor consistente con otros resultados obtenidos a nivel mundial. En general, entre un 74 y 92% del carbono epigeo se encuentra almacenado en los árboles con $\text{dap} > 5\text{cm}$, mientras que menos del 9% se encuentran almacenados en el resto de componentes del ecosistema. Se encontró una correlación significativa entre el área basal de los árboles con $\text{diámetro} \geq 5\text{cm}$ y el carbono epigeo total. La cantidad de carbono almacenado en el suelo hasta 1 m de profundidad varía entre 141 y $593 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ en todos los sitios. A diferencia del carbono epigeo, no se encontró evidencia de una gradiente latitudinal en el carbono acumulado en los suelos del Humedal.

Las existencias promedio de carbono a nivel de ecosistema en el Humedal Nacional Terraba-Sierpe varían entre $391 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ en la boca del Río Sierpe hasta $438 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en la boca del Río Zacate. El suelo representa un 76% del total de carbono del ecosistema, mientras que los árboles representan el 20%. Aunque se ha dicho que los manglares llegan a acumular entre 2 y 5 veces más carbono a nivel de ecosistema que los bosques terrestres (Kauffman, com.pers.¹), los manglares costarricenses parecen estar en el rango inferior de este enunciado y ser similares a los bosques tropicales terrestres de Costa Rica.

En total, los manglares del Humedal presentan existencias de carbono cercanas a los 8 Tg de carbono, lo que representa aproximadamente 40% del carbono total almacenado en los manglares de Costa Rica. Cálculos preliminares sugieren que en 22 años (entre 1990 y 2012) el país perdió casi 4000 ha de manglares, lo que se traduciría en una emisión histórica de CO_2 de 1.6 Tg. Esto equivale a 1.3 veces la cantidad de emisiones producidas por todo el sector de uso de la tierra en Costa Rica en la década de los 90. Aunque en la actualidad los procesos de deforestación y degradación de los manglares han sido controlados, este cálculo preliminar da un indicativo de la magnitud del potencial de recuperación de existencias de carbono que podría tener el país de incorporarse los manglares dentro de mecanismos y estrategias de recuperación de ecosistemas costeros.

¹ Dr. Boone Kauffman. Presentación en el 3º Taller Internacional de Expertos Científicos de la Iniciativa de Carbono Azul. Quepos, Costa Rica.

Antecedentes del proyecto

Los manglares son ecosistemas de zonas litorales tropicales y subtropicales. Se distinguen por crecer en la franja costera intermareal, sobre suelos planos y fangosos, inundados periódicamente por las mareas. En ellos habitan especies de árboles, arbustos y otras plantas adaptadas a estas condiciones de anegamiento y alta salinidad (Mainardi 1990, Pizarro et al 2004). Los manglares tropicales proveen una gran diversidad de servicios ecosistémicos, incluyendo el ciclaje de nutrientes, la captura de sedimentos, filtración de toxinas, hábitat para multitud de especies y protección de las costas ante el embate del oleaje, huracanes y marejadas (Jiménez 1994, Danielsen et al 2005, Alongi 2008, Ellison 2008, Lafolley y Grimsditch 2009). Además, los manglares representan una fuente económica importante para las comunidades aledañas, que dependen de la pesca artesanal y de la extracción de madera y otros productos no maderables para su subsistencia (Bossi y Cintrón 1990).

Un servicio ecosistémico importante pero poco estudiado de estos ecosistemas es su capacidad de almacenamiento de carbono. Estimados a nivel mundial indican que la magnitud de este potencial puede representar hasta el 60% de las mayores existencias de carbono reportadas hasta ahora (Keith et al. 2009, Donato et al 2011, Laffoley y Grimsditch, 2011). Considerando además sus altas tasas de productividad primaria neta (NPP), los manglares se constituyen en herramientas potencialmente efectivas en iniciativas de mitigación al cambio climático. Sin embargo, la altísima vulnerabilidad al cambio climático que presenta Centroamérica (Giorgi 2006) y las presiones humanas sobre los humedales costeros amenazan su permanencia. Por esta razón, estudios más detallados de la capacidad de almacenamiento y secuestro de carbono en manglares centroamericanos cobra aún mayor importancia.

En Costa Rica se han desarrollado varios estudios en manglares (Pool 1977, Jiménez 1994, Coll 2001, Fonseca, 2006, Zamora-Trejos, 2006). Sin embargo, aún no hay datos publicados de las existencias de carbono y este es el primer estudio a nivel nacional (y probablemente a nivel regional) donde se contabilizan las mismas a nivel de ecosistema. Investigaciones de este tipo son de primordial importancia y sirven de base para fomentar la inclusión de estos ecosistemas en el régimen internacional de mitigación al cambio climático y para el desarrollo de estrategias de adaptación para comunidades que dependen de los manglares. Localmente, son entonces un componente indispensable para la formulación y puesta en marcha de sistemas de pago por servicios ambientales en zonas costeras. En forma congruente con estas iniciativas, el objetivo de este estudio fue caracterizar las existencias de carbono a nivel de ecosistema en el manglar del Humedal Nacional Terraba-Sierpe, en la costa Pacífica de Costa Rica.

Este proyecto contribuye al Proyecto Biodiversidad Marino Costera y Adaptación al Cambio Climático (BIOMARCC) de la GIZ², el cual seleccionó el Humedal Nacional Terraba-Sierpe como

² El proyecto BIOMARCC-SINAC-GIZ es un proyecto de apoyo al Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC-MINAET) ejecutado por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, por encargo del Ministerio Alemán de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU) en el marco de su Iniciativa Protección del Clima (IKI).

una de sus áreas prioritarias. Se espera que los resultados puedan ser utilizados por autoridades nacionales, locales y comunidades aledañas en la toma de decisiones de estrategias de conservación, adaptación al cambio climático y restauración de estos ecosistemas; como insumo para el diseño de sistemas de pago por servicios ambientales; así como para proveer una línea de base para evaluaciones futuras del ecosistema.

Biomasa y carbono en los manglares

La medición de biomasa y carbono en manglares es una actividad desafiante debido a las condiciones fangosas del suelo y la fisionomía prevalente. Existen 3 formas de medir las existencias de carbono en cualquier ecosistema: a través de cosechas de biomasa, por medio de la técnica del árbol promedio y con ecuaciones alométricas. El primero, por su carácter destructivo, no permite seguimiento de las existencias a través del tiempo. El segundo da mejores resultados en rodales homogéneos, como plantaciones forestales. La tercera técnica se considera la más factible en ecosistemas naturales, puesto que sólo necesita conocerse variables dasométricas y funcionales (por ejemplo: densidad de la madera). Además, es una metodología no destructiva y consistente que puede repetirse en diferentes intervalos para cuantificar cambios en las existencias de carbono.

Se ha determinado que existen diferencias en la alometría de las diferentes especies que crecen en los manglares (Komiyama et al 2008). Idealmente, sería necesario contar con ecuaciones específicas para cada especie. Sin embargo, se han derivado también ecuaciones genéricas para uso global (Chave et al 2005, Komiyama et al 2008). Ambas ecuaciones necesitan solamente el diámetro del individuo y una medida de densidad de la madera para calcular la biomasa. La ecuación de Chave et al (2005) subestima la biomasa con relación a los resultados obtenidos con la ecuación de Komiyama (2008). Siguiendo el “principio conservador” que rige la cuantificación del potencial de mitigación a nivel internacional, debería favorecerse el uso de la primera ecuación. Sin embargo, la ecuación de Komiyama (2005) es prevalente en estudios de manglares. No existen ecuaciones locales para el cálculo de la biomasa y el carbono de manglares.

Para tener un estimado del carbono a nivel de ecosistema, se hace necesario también estimar las existencias en el suelo; procedentes de las raíces y el suelo mineral. Aunque hay ecuaciones alométricas genéricas para estimar biomasa de raíces en bosques tropicales (Cairns et al 1997), la relación tallo:raíz podría ser menor en los manglares debido a su fisionomía dominada por raíces fúlcreas y la necesidad de soportar cargas con sistemas radicales anclados en sustratos no completamente consolidados (Komiyama et al, 2000; Figura 1). Esta es un área de investigación abierta a nivel internacional.

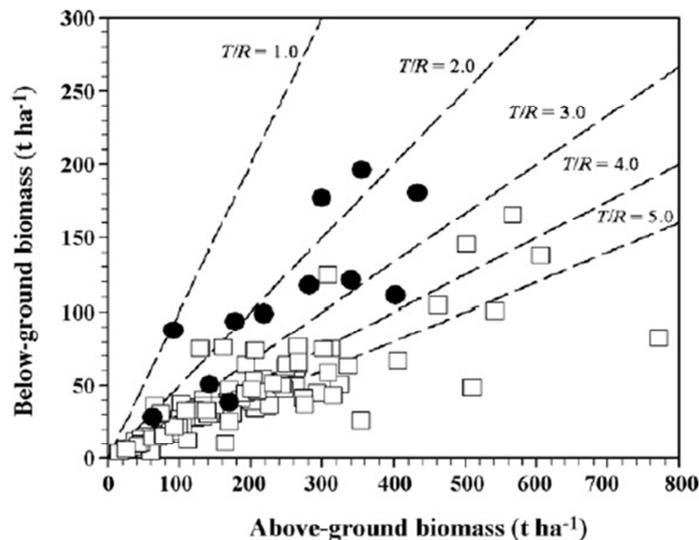


Figura 1. Relación entre biomasa sobre el suelo (eje X, $t\ ha^{-1}$) y biomasa bajo (eje Y, $t\ ha^{-1}$) el suelo entre bosques terrestres (cuadrados) y manglares (círculos). Tomado de Komiyama et al. (2008).

De 54 estudios analizados por Komiyama et al (2008) y publicados desde 1975, sólo 19 han analizado las existencias de biomasa a nivel de ecosistema. Sólo 2 han sido realizados en el continente americano y ninguno en Centroamérica (Cuadro 1). Las existencias promedio de biomasa alcanzan los $340\ Mg\cdot ha^{-1}$ (Megagramos por hectárea³). El valor más bajo de biomasa total medido en América se encontró en Puerto Rico ($127\ Mg\cdot ha^{-1}$), mientras que los manglares con más biomasa exceden los $600\ Mg\cdot ha^{-1}$ y están ubicados en Indonesia. En los manglares estudiados, el 34% de la biomasa está bajo el suelo. Komiyama et al (2008) atribuyen la variación en la biomasa a patrones de distribución asociados con la latitud, especie dominante, distancia a partir de la costa y estado sucesional.

Estudios más recientes han ampliado estas mediciones, incorporando análisis de las existencias de carbono en el suelo. Los suelos de los manglares y otros ecosistemas costeros son muy densos en carbono porque las condiciones anóxicas imperantes impiden la descomposición de la materia orgánica. Además, los sedimentos transportados por las mareas y sistemas aluviales facilitan la acumulación de materia orgánica en el sustrato. En estudios recientes realizados en Indonesia (Murdiyaso et al 2009, Donato et al 2011), se encontró que entre 49 y 98% del carbono almacenado a nivel de ecosistema en manglares se encontraba en el suelo, pudiendo almacenar éstos más de $1000\ MgC\cdot ha^{-1}$, lo que representa entre 2 y 5 veces más carbono que el almacenado en bosques terrestres (Kauffman et al *En prep.*)

La productividad primaria neta (NPP) en manglares varía entre $3.99\ Mg\cdot ha^{-1}\cdot año^{-1}$ en bosques mexicanos de *Avicennia germinans* (Day et al., 1996) hasta $26.7\ Mg\cdot ha^{-1}\cdot año^{-1}$ medida en rodales de *R. apiculata* en Tailandia (Christensen, 1978). Este último valor es considerablemente alto para

³ 1 Mg (megagramo) = 1 tonelada, 1000000g ó 1000 kg.

ecosistemas tropicales, especialmente considerando que bosques terrestres no sobrepasan los 14.3 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ (Clark et al 2001). Estas altas tasas de productividad, combinadas con las altas existencias en manglares sin alteración (Cuadro 1) confirman el altísimo potencial que tienen estos ecosistemas para almacenar carbono y contribuir con esfuerzos de mitigación del cambio climático.

Cuadro 1. Biomasa a nivel de ecosistema y variables dasométricas básicas medidas en manglares del mundo.

Ubicación	Biomasa epigea	Biomasa suelo	Biomasa total	Referencia
	(Mg·ha ⁻¹)	(Mg·ha ⁻¹)	(Mg·ha ⁻¹)	
Indonesia	285.8	36.2	322.0	Murdiyaso et al (2009)
Indonesia	23.6	5.2	28.8	Murdiyaso et al (2009)
Indonesia	207.2	27.4	234.6	Murdiyaso et al (2009)
Indonesia	318.0	161.2	479.2	Donato et al (2011)
Indonesia	436.4	180.7	617.1	Komiyama et al. (1988)
Indonesia	406.6	110.8	517.4	Komiyama et al. (1988)
Indonesia	356.8	196.1	552.9	Komiyama et al. (1988)
Australia	341.0	121.0	462.0	Mackey (1993)
Tailandia	285.5	272.9	558.4	Komiyama et al. (1987)
Indonesia	299.1	177.2	476.3	Komiyama et al (1988)
Tailandia	281.2	11.8	293.0	Tamai et al (1986)
Tailandia	281.2	106.3	387.5	Komiyama et al. (1987)
Tailandia	281.2	68.1	349.3	Komiyama et al. (1987)
Indonesia	216.8	98.8	315.6	Komiyama et al. (1988)
Indonesia	178.2	94.0	272.2	Komiyama et al. (1988)
Indonesia	169.1	38.5	207.6	Komiyama et al. (1988)
Australia	144.5	147.3	291.8	Briggs (1977)
Tailandia	142.2	50.3	192.5	Poungram (2003)
Australia	112.3	160.3	272.6	Briggs (1977)
Tailandia	92.2	87.5	179.7	Komiyama et al. (2000)
Tailandia	62.2	28.0	90.2	Amarasinghe y Balasubramaniam (1992)
Panamá	279.2	306.2	585.4	Golley et al (1975)
Puerto Rico	62.9	64.4	127.3	Ross et al (2001)
Promedio	228.8	110.9	339.7	

Fuente: Adaptado de Komiyama et al. (2008).

En todo el mundo, los ecosistemas costeros están amenazados por la presión de uso humano, sobre todo por el cambio de uso de la tierra para el desarrollo de infraestructura, el establecimiento de agricultura y acuicultura, y la contaminación ambiental. Con base en datos de Indonesia, Donato et al (2011) estimaron que el cambio de uso, sólo de los manglares, podría ser responsable de emisiones entre 0.2 y 0.12 PgC·año⁻¹, casi un 10% de las emisiones producidas por deforestación, aunque representan 0.7% de la superficie total de bosques tropicales. En otro

estudio realizado en el estado de California⁴, Estados Unidos, se encontró que en un área de solamente 1800 ha se liberan anualmente de 5 a 7.5 TgC. Esa tasa de emisión implica que, en los últimos 100 años fue emitido 1 PgC⁵, equivalente al carbono acumulado en los sedimentos durante los últimos 4000 años. La pérdida manglares y otros ecosistemas costeros además provoca impactos sobre la resistencia y resiliencia de zonas costeras al embate de tormentas y el aumento del nivel del mar.

Por estos y otros servicios ecosistémicos de gran importancia, se ha propuesto incorporar a los ecosistemas marino-costeros como elementos de las iniciativas internacionales de mitigación al cambio climático. Sin embargo, aún la dinámica de pérdidas y ganancias de carbono en los diferentes ecosistemas no está clara. Más aún, en Centroamérica la información acerca de la dinámica y captura de carbono en manglares, pastos marinos y marismas saladas es limitada. Este proyecto constituye, hasta donde tenemos conocimiento, el primer proyecto de cuantificación de carbono a nivel de ecosistema en manglares de Costa Rica, y quizá en toda la región. Es un primer paso para generar la información necesaria que permitiría incorporar estos ecosistemas como componentes de las agendas nacionales de mitigación al cambio climático y de la incorporación de sus múltiples servicios ecosistémicos dentro de esquemas de compensación.

⁴ Dr. Steven Crooks. Presentación en la 3ª Reunión Anual del Grupo de Trabajo Científico de la Iniciativa de Carbono Azul. Quepos, Costa Rica. Abril 2012.

⁵ 1 Pg (petagramo) = 10^{15} g o 1 mil millones de toneladas; 1 Tg (teragramo) = 10^{12} g o 1 millón de toneladas.

Materiales y métodos

Se utilizaron métodos sugeridos por Murdiyaso et al (2009), Donato et al (2011)⁶ para determinar las existencias de carbono a nivel de ecosistema en el Humedal Nacional Terraba-Sierpe (HNTS). Estos métodos incluyen el muestreo de varios sitios de manglar dentro de la zona, con parcelas ubicadas siguiendo transectos desde la línea costera hacia tierra adentro. El cálculo de las existencias de carbono se basa en la medición de variables dasométricas, el uso de ecuaciones alométricas y el muestreo directo del carbono en el suelo para su posterior análisis en un laboratorio analítico. Aunque no es el énfasis de este estudio, la metodología también permite determinar, además de las existencias de carbono, la composición florística de los manglares. A continuación una descripción detallada del sitio de estudio y la metodología utilizada.

El Humedal Nacional Terraba-Sierpe

Ubicación geográfica

El Humedal Nacional Terraba-Sierpe es un área protegida localizada en la costa pacífica sur de Costa Rica. Pertenece a la provincia de Puntarenas, Cantón de Osa, distritos de Ciudad Cortés, Palmar y Sierpe (Cordero 2000). Se ubica entre las coordenadas 8° 47' y 9° 03' latitud norte y 83° 29' y 83° 38' longitud oeste (Chacón y Ochoa 1998). Sus principales afluentes son el Río Grande de Terraba y el Río Sierpe, así como la Laguna de Sierpe (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2010). Los humedales están delimitados por la Fila brunqueña y la serranía de la Península de Osa en el llamado "Valle del Diquís". (Sánchez, 2010). El Humedal nacional se encuentra a una distancia aproximada de 270 Km de San José. El acceso se puede realizar por vía aérea, terrestre y acuática.

Clima

De acuerdo al Atlas Digital de Costa Rica del año 2008, en el área de estudio se presentan tres zonas de vida de Holdridge:

1. Bosque húmedo tropical transición a perhúmedo, con una temperatura que oscila de 24 a 30 °C y una precipitación anual entre 2000 – 4000 mm.
2. Bosque muy húmedo premontano transición a basal, con una temperatura entre 18 y 24 °C.
3. Bosque muy húmedo tropical, con una temperatura que oscila de 24 a 30 °C y una precipitación anual entre 4000 – 8000 mm.

La precipitación promedio anual para la zona es de 4000 a 6000 mm. La temperatura media es de 26.5°C a 27 °C y la humedad relativa supera el 90% durante casi todo el año, con un período seco moderado de 35-70 días con déficit de agua (Cortés 2002, Sánchez 2010). La estación lluviosa del Pacífico sur se extiende desde abril hasta diciembre, alcanzando su pico en el mes de octubre,

⁶ Al momento del diseño y ejecución del inventario la publicación de Kauffman y Donato (2012) aún no estaba disponible. Este documento es actualmente la guía metodológica internacional para la determinación de las existencias de carbono en manglares.

cuando el promedio mensual de lluvia varía entre los 520 mm y los 860 mm. La precipitación por lo general excede la evaporación durante gran parte del año, lo que mantiene las tierras saturadas de agua (Quesada y Cortés, 2006).

Suelos

De acuerdo con Cortés (2002) y el Atlas Digital de Costa Rica del año 2008, se presentan los siguientes tres órdenes de suelos en el área de estudio:

- *Suelos Entisoles*: Recientes, con poco desarrollo de horizontes, en el área de manglar del Humedal Nacional Térraba-Sierpe. Sólo hay un epipedón ócrico (amarillento) u horizonte mínimos por acción del hombre. Suelos planos con pendientes entre 0 – 2%. Presentan alto contenido de agua, variables de sal y bajo en contenido de oxígeno. Poco consolidados de color gris o negro, con alto contenido de ácido sulfhídrico.
- *Suelos Inceptisoles*: Suelo joven con horizonte B cámbico (apenas forman un B) sin otro horizonte diagnóstico, planos con pendientes entre 0 – 2%. Son en general aluviales con drenaje bueno hasta pobre, derivados de tobas y lahares, sedimentos y cenizas volcánicas.
- *Suelos Ultisoles*: Suelos con horizontes argílicos (20% de aumento en el contenido de arcillas en la sección de control) con menos de un 35% de saturación de bases, fuertemente ondulado, pendientes entre 30 – 60%.

Geología y geomorfología

El área del humedal y su zona de influencia está constituida geológicamente por materiales de los periodos Cretácico, Terciario y Cuaternario, con las siguientes estructuras (Cortés, 2002):

1. Formas de denudación con laderas empinadas y escarpe de la erosión de la Sierra Costeña.
2. Formas de sedimentación aluvial que se subdividen en 5 unidades: marismas, pantano permanente o temporal, planicies aluviales con influencia marina cercana de la costa, planicie aluvial pequeña y delta abanico del Río Térraba.
3. Formas de origen tectónico y erosivo, donde se ubican las unidades:
 - a) Sierra Costeña.
 - b) Plataforma de abrasión fluvio-marina levantada.
 - c) Serranías de la Península de Osa.

Tipos de cobertura y bosques

Los diferentes tipos de cobertura que presenta y rodea al Humedal Nacional Térraba-Sierpe son: manglar, vegetación asociada al humedal, bosque natural, palma aceitera, yolillo, pasturas, arrozales, cultivos y plantaciones, lagos y lagunas, urbanizaciones, entre otros (Figura 2).

De acuerdo con Sánchez (2010), el Humedal Nacional Térraba-Sierpe está conformado por un bosque de manglar con una superficie aproximada de 14637 hectáreas. Quesada y Cortés (2006), por otro lado, señalan que el manglar tiene una extensión aproximada de 16700 ha, el cual está dominado por las especies *Rhizophora racemosa* y *Peliciera rhizophorae*. Estas ocurren juntas, alternando la dominancia en distintos sectores (Figura 2). Existe además un gran número de especies vegetales asociadas a este tipo de ecosistemas, por ejemplo, informan un total de 40 especies de manglar incluyendo especies marginales en la zona de Térraba-Sierpe.

La flora más importante está constituida por especies hidrófitas cuyos ciclos vitales se asocian con el medio acuático, especies halófitas de ambientes palustres, vegetación riparia en los bordes de los ríos y la vegetación de los litorales adaptada al sistema marino. En este humedal pueden distinguirse tres tipos de vegetación: de manglar, palustrina (pantanos y ciénagas permanentes sobre suelos inorgánicos) y herbácea (Cortés, 2002).

Esta región se destaca por una variedad de bosques. Entre ellos destaca el bosque inundado de agua dulce donde predomina la palma yolillo y el cerillo. En los bosques de agua salada se encuentran diferentes especies de mangle como: caballero y gateador, mangle piñuela, palo de sal, mariquita. También se encuentran especies de plantas acuáticas como la lechuga de agua, lirio de playa y platanillo (Álvarez, 1999).

Diseño del inventario

La delimitación de las áreas con manglar se realizó por medio de un sistema de información geográfica (SIG) utilizando fotografías aéreas y coberturas del tipo de uso de la tierra para el Humedal Nacional, proporcionadas por el Proyecto ECOTICOS, a través del CeNAT (Centro Nacional de Alta Tecnología) y el CATIE. No se realizó comprobación de campo de la clasificación por limitaciones de tiempo. Sin embargo, podrían verificarse utilizando las firmas espectrales recopiladas por un equipo del CeNAT-CATIE desarrollando trabajos de sensores remoto de alta resolución en la costa Pacífico.⁷

Se muestrearon 4 áreas dentro del Humedal. Cada una corresponde a una de las bocas principales de los ríos que drenan el Humedal; de norte a sur: Boca del Río Térraba (Diquís), Boca Zacate, Boca Guarumal y Boca Sierpe. Se destaca la selección de la boca del Río Diquís porque permitiría a largo plazo determinar los efectos de la construcción del Proyecto Hidroeléctrico Diquís sobre el manglar.

En cada una de las áreas se establecieron transectos de medición perpendiculares a la línea costera o la orilla del río. Empezando a 25 m de la orilla, y cada 25 m después de éste punto, sobre estos transectos se establecieron parcelas circulares anidadas de 7 m de radio (Murdiyaso et al 2009). La ubicación de los transectos a lo largo de las bocas de los ríos se escogió de forma aleatoria y procurando, con base en los mapas disponibles, ubicar áreas de manglar no perturbado o fragmentado (Figura 3). Se establecieron 28 transectos en toda el área de estudio; 4 en la boca del Río Térraba y 8 en cada una de las bocas de los ríos restantes que drenan el Humedal.

⁷ Proyecto "Identificación y clasificación marino-costero en la costa pacífica de Costa Rica a partir del procesamiento de imágenes de los sensores remoto RapidEye y WorldView 2", financiado por el Proyecto BIOMARCC/GIZ y desarrollado en conjunto entre CATIE y CeNAT.

Cobertura del suelo en el área del Humedal Nacional Térraba-Sierpe y alrededores, Osa, Costa Rica.

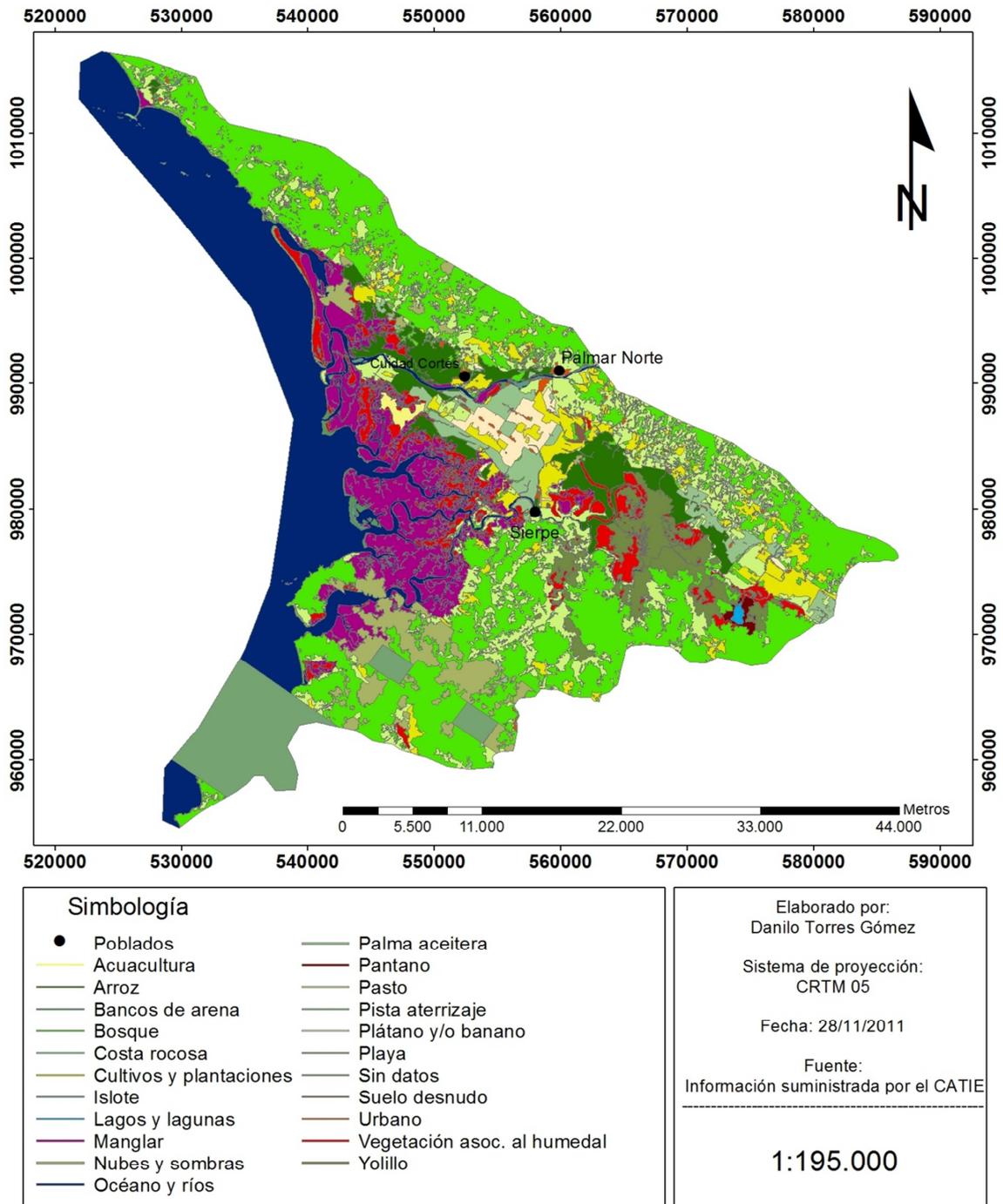


Figura 2. Mapa de uso de la tierra del Humedal Nacional Térraba-Sierpe, Costa Rica. Fuente: Proyecto ECOTICOS. Datos suministrados por el CeNAT.

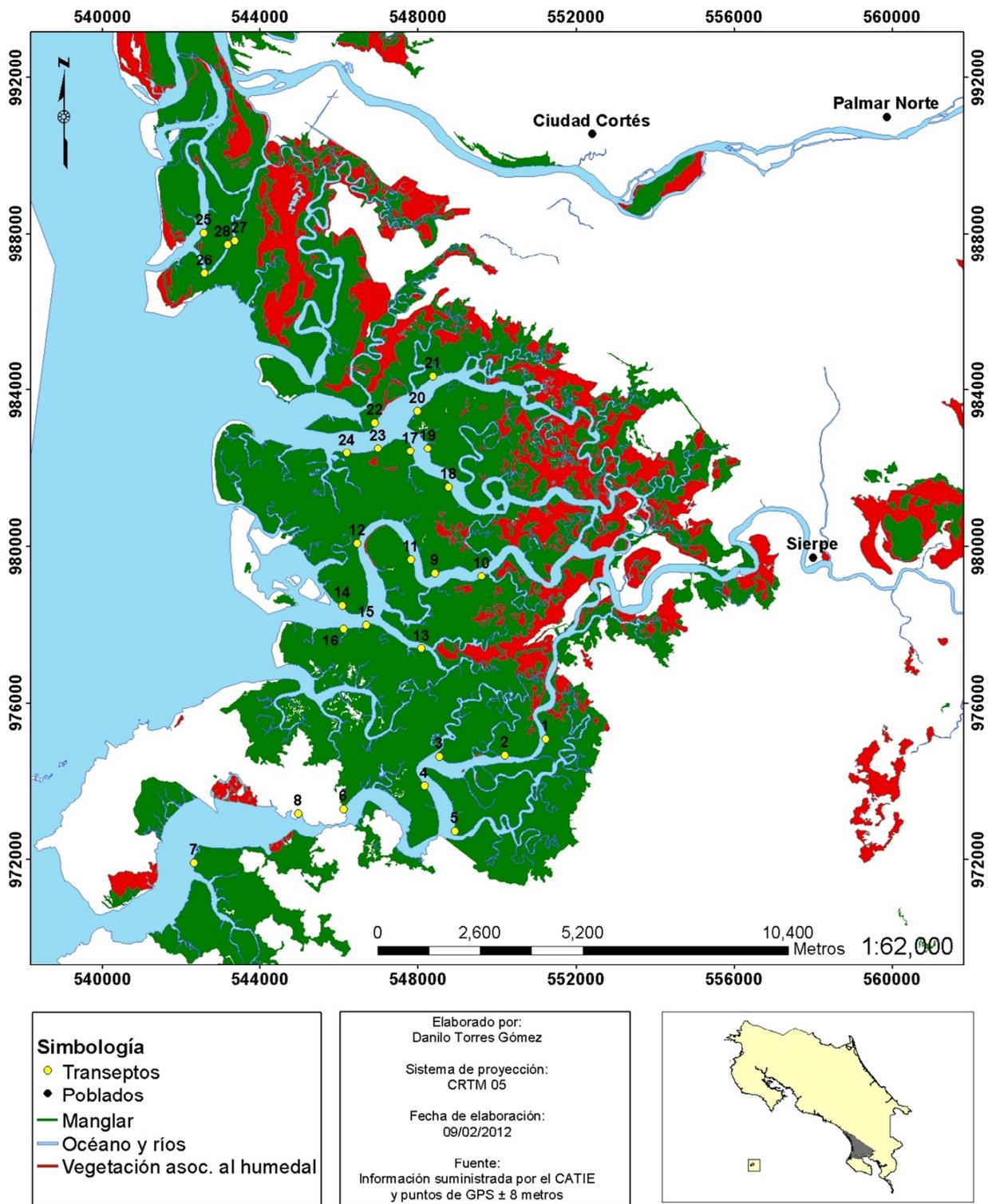


Figura 3. Ubicación de los transeptos para muestreo de las existencias de carbono a nivel de ecosistema en el Humedal Nacional Terraba-Sierpe. Fuente: Proyecto ECOTICOS. Datos suministrados por el CeNAT.

Cuantificación de la biomasa sobre el suelo

Se cuantificó el carbono en los componentes del ecosistema: árboles en pie, regeneración, herbáceas, hojarasca y madera caída. Se midió el dap (diámetro a la altura del pecho, medida a 1.30 m de altura sobre el fuste) de todos los individuos con $\text{dap} \geq 5\text{cm}$ en la parcela principal de 7 m de radio. Además se anotó su condición (vivo/muerto) y se determinó la especie para poder asignar correctamente un valor de densidad específica de la madera durante el cálculo de la densidad de carbono. Se midió la altura (con clinómetro) de todos los tallos muertos en y posición vertical. Se procedió de forma similar para individuos con $\text{dap} < 5\text{cm}$, sólo en una subparcela de 2 m de radio contenida dentro de la principal. En parcelas con presencia del helecho *Acrostichum aureum* se realizó un estimado visual de la proporción de la parcela bajo su cobertura. A través de un muestreo destructivo adicional, se relacionó esa área con el carbono presente por unidad de área.

La madera caída se cuantificó utilizando una modificación a la metodología del plano de intersección (Van Wagner 1968, Brown y Roussopoulos 1974). Esta consiste en medir el diámetro de todas las piezas de madera muerta (con un ángulo $< 45^\circ$ respecto de la vertical) que intersecten un plano de 2m de altura sobre 4 transectos de medición de 12 m de longitud a partir del centro de la parcela y orientados a 45° respecto de la dirección principal del transecto (Figura 2). Se midió la madera caída con diámetro $\geq 7.5\text{ cm}$ a lo largo de todo el transecto. Las piezas con diámetro 7.5 – 2.5 cm se midieron a lo largo de 10 m y las piezas con diámetro $< 2.5\text{ cm}$ sólo en 5 m del transecto (Figura 4). Esta última categoría de diámetro es equivalente al tamaño clasificado comúnmente como hojarasca. Se procedió de esta manera para evitar tener que cosechar hojarasca en un ambiente donde no se tenía disponibilidad de hornos para secar muestras rutinariamente. Para cada pieza de madera, se asignó una categoría de descomposición con base en la “prueba del machete” (IPCC 2003). No se tomó en cuenta la madera semi-enterrada (Murdiyaso et al 2009).

Muestreo de suelo

Se tomaron muestras de suelo hasta 1 m de profundidad en 3 puntos ubicados aleatoriamente alrededor de la parcela. Se utilizó un barrenado abierto, especial para suelo no consolidado⁸ para extraer muestras de 0 – 15, 15 – 30, 30 – 50 y 50 – 100 cm de profundidad (Murdiyaso et al 2009). En uno de los puntos de muestreo, se tomó una muestra de 3 cm de largo del centro de cada intervalo de profundidad para determinar la densidad aparente del suelo⁹ (Figura 5). El material restante fue homogenizado por profundidad y parcela, y una submuestra llevada al laboratorio del CATIE para análisis del contenido de C total. Las raíces gruesas ($\geq 2\text{ mm}$) fueron excluidas de las muestras de suelo.

⁸ 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

Análisis de los datos y muestras recolectadas

La biomasa aérea y de raíces se calculó utilizando una serie de ecuaciones alométricas publicadas en la literatura (Cuadro 2). En lo posible se utilizaron ecuaciones específicas para las especies encontradas durante el inventario. Cuando esto no fue posible, se utilizaron las ecuaciones generales de Chave (2005) y Komiyama et al (2005) y la base de datos mundial de densidad de la madera (Zanne et al 2009). Para árboles muertos en pie se utilizaron las mismas ecuaciones, pero asumiendo un 50% de pérdida por descomposición. La biomasa de la madera caída se calculó siguiendo las fórmulas y correcciones descritas por Van Wagner (1968) y Brown y Roussopoulus (1974) y tomando en cuenta las densidades de la madera estandarizadas por el IPCC (2003). Los datos de biomasa fueron convertidos en contenidos de carbono según la especie (Murdiyaso et al 2009, Kauffman y Donato 2012).

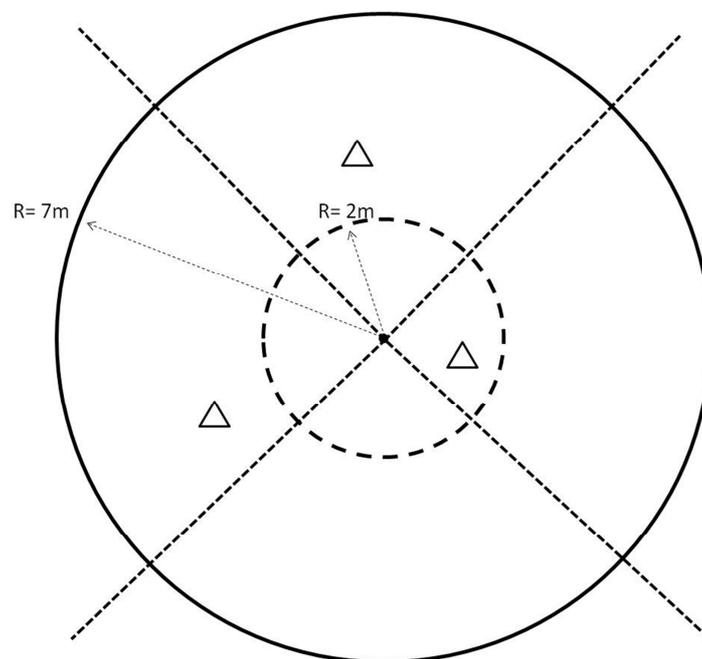


Figura 4. Esquema de parcela anidada de muestreo utilizada para la medición de biomasa y carbono en manglares del Humedal Nacional Terraba-Sierpe, Costa Rica. Adaptado de Murdiyaso et al. (2009). Árboles con $d_{ap} \geq 5$ cm se miden en la parcela principal de 7m de radio; los de $d_{ap} < 5$ cm en una subparcela de 2 m de radio; la madera caída con diámetro ≥ 2.5 cm en 4 transectos de 12 m de longitud a partir del centro (líneas rectas punteadas). Los suelos se extraen de 3 puntos aleatorios (triángulos) en la parcela principal. Una de estas parcelas se ubicó cada 25 m sobre un transecto de 125 m de largo.

Las muestras de densidad aparente fueron secadas al horno a 110 °C por 72 horas, mientras que las muestras para determinar el contenido de nutrientes se secaron primero al aire y luego a 65 °C hasta obtener peso constante. El contenido de carbono total fue obtenido por el método de combustión seca (Nelson y Sommers 1996) en un analizador Thermofinnigan. Junto con la determinación de la densidad aparente, estos análisis se realizaron en el laboratorio de suelos del CATIE.

El cálculo de carbono contenido en el suelo se obtuvo multiplicando el contenido de carbono, por el intervalo de profundidad, por la densidad aparente correspondiente a ese intervalo. La sumatoria de los contenidos de carbono por intervalo de profundidad constituye la existencia total de carbono en el suelo hasta la profundidad muestreada. La suma de los componentes epigeos y el suelo hasta 1 m de profundidad constituyen las existencias totales de carbono a nivel de ecosistema. Todas las unidades (carbono aéreo y del suelo) se expresan en $\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$. Se utilizaron ANDEVA no balanceados y pruebas de medias para determinar las diferencias entre las 4 áreas de muestreo, los transectos y las distancias a partir de la línea costera. Los datos se analizaron estadísticamente con el software InfoStat/P (Di Rienzo et al 2012) y siguiendo procedimientos estadísticos usuales. Diferencias significativas fueron determinadas a un nivel de significancia de 0.05.



Figura 5. Demostración del muestreo de suelo, con el detalle de la extracción de una muestra de volumen conocido para la determinación de densidad aparente del suelo en el Humedal Nacional Térraba-Sierpe. Foto: Miguel Cifuentes.

Resultados y discusión

Existencias de carbono epigeo

A nivel general, las existencias promedio de carbono epigeo fueron de $72.52 \pm 3.17 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ (rango: 9 - 241 $\text{MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$), valor consistente con otros resultados obtenidos a nivel mundial (Cuadro 1). Se encontraron diferencias significativas entre sitios ($p= 0.0001$) para el carbono epigeo. Parece haber una gradiente latitudinal entre las bocas del Río Sierpe (extremo sur del Humedal) y la del Río Térraba (extremo norte), aunque no existen diferencias significativas entre los sitios intermedios (Cuadro 3). No hay indicación que exista una gradiente de carbono epigeo a lo largo de los canales de los ríos, desde la desembocadura y río arriba ($p= 0.0870$), ni entre las parcelas ubicadas a la orilla de los ríos y aquellas ubicadas tierra adentro ($p= 0.2521$), aunque hay una tendencia localizada a cambiar la estructura del bosque.

En general, entre un 74 y 92% del carbono epigeo se encuentra almacenado en los árboles con $\text{dap} > 5\text{cm}$, mientras que sólo un promedio de 2%, 5% y 9% se encuentran almacenados en el sotobosque, los individuos con $\text{dap} < 5\text{cm}$ y la madera caída, respectivamente (Figura 6).

Cuadro 2. Ejemplos de ecuaciones alométricas disponibles para el cálculo de biomasa en manglares.

Above-ground tree weight (W_{top} in kg)	Below-ground tree weight (W_{R} in kg)
<i>Avicennia germinans</i> $W_{\text{top}} = 0.140\text{DBH}^{2.40} r^2 = 0.97, n = 45, D_{\text{max}} = 4 \text{ cm}, \text{Fromard et al. (1998)}^{\text{a}}$ $W_{\text{top}} = 0.0942\text{DBH}^{2.54} r^2 = 0.99, n = 21, D_{\text{max}}: \text{unknown}, \text{Imbert and Rollet (1989)}^{\text{a}}$	<i>Avicennia marina</i> $W_{\text{R}} = 1.28\text{DBH}^{1.17} r^2 = 0.80, n = 14, D_{\text{max}} = 35 \text{ cm}, \text{Comley and McGuinness (2005)}$
<i>A. marina</i> $W_{\text{top}} = 0.308\text{DBH}^{2.11} r^2 = 0.97, n = 22, D_{\text{max}} = 35 \text{ cm}, \text{Comley and McGuinness (2005)}$	<i>Bruguiera</i> spp. $W_{\text{R}} = 0.0188(D^2H)^{0.909} r^2: \text{unknown}, n = 11, D_{\text{max}} = 33 \text{ cm}, \text{Tamai et al. (1986)}$ c.f., $H = D/(0.025D + 0.583)$
<i>Laguncularia racemosa</i> $W_{\text{top}} = 0.102\text{DBH}^{2.50} r^2 = 0.97, n = 70, D_{\text{max}} = 10 \text{ cm}, \text{Fromard et al. (1998)}^{\text{a}}$ $W_{\text{top}} = 0.209\text{DBH}^{2.24} r^2 = 0.99, n = 17, D_{\text{max}}: \text{unknown}, \text{Imbert and Rollet (1989)}^{\text{a}}$	<i>Bruguiera exaristata</i> $W_{\text{R}} = 0.302\text{DBH}^{2.15} r^2 = 0.88, n = 9, D_{\text{max}} = 10 \text{ cm}, \text{Comley and McGuinness (2005)}$
<i>Rhizophora apiculata</i> $W_{\text{top}} = 0.235\text{DBH}^{2.42} r^2 = 0.98, n = 57, D_{\text{max}} = 28 \text{ cm}, \text{Ong et al. (2004)}$	<i>Ceriops australis</i> $W_{\text{R}} = 0.159\text{DBH}^{1.95} r^2 = 0.87, n = 9, D_{\text{max}} = 8 \text{ cm}, \text{Comley and McGuinness (2005)}$
<i>Rhizophora mangle</i> $W_{\text{top}} = 0.178\text{DBH}^{2.47} r^2 = 0.98, n = 17, D_{\text{max}}: \text{unknown}, \text{Imbert and Rollet (1989)}^{\text{a}}$	<i>R. apiculata</i> $W_{\text{R}} = 0.00698\text{DBH}^{2.61} r^2 = 0.99, n = 11, D_{\text{max}} = 28 \text{ cm}, \text{Ong et al. (2004)}$ c.f., $W_{\text{stik}} = 0.0209\text{DBH}^{2.55} r^2 = 0.84, n = 41$
<i>Rhizophora</i> spp. $W_{\text{top}} = 0.128\text{DBH}^{2.60} r^2 = 0.92, n = 9, D_{\text{max}} = 32 \text{ cm}, \text{Fromard et al. (1998)}^{\text{a}}$ $W_{\text{top}} = 0.105\text{DBH}^{2.68} r^2 = 0.99, n = 23, D_{\text{max}} = 25 \text{ cm}, \text{Clough and Scott (1989)}^{\text{a}}$	<i>Rhizophora stylosa</i> $W_{\text{R}} = 0.261\text{DBH}^{1.86} r^2 = 0.92, n = 5, D_{\text{max}} = 15 \text{ cm}, \text{Comley and McGuinness (2005)}$
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i> $W_{\text{top}} = 0.186\text{DBH}^{2.31} r^2 = 0.99, n = 17, D_{\text{max}} = 25 \text{ cm}, \text{Clough and Scott (1989)}^{\text{a}}$	<i>Rhizophora</i> spp. $W_{\text{R}} = 0.00974(D^2H)^{1.05} r^2: \text{unknown}, n = 16, D_{\text{max}} = 40 \text{ cm}, \text{Tamai et al. (1986)}$ c.f., $H = D/(0.02D + 0.678)$
<i>Bruguiera parviflora</i> $W_{\text{top}} = 0.168\text{DBH}^{2.42} r^2 = 0.99, D_{\text{max}} = 25 \text{ cm}, n = 16, \text{Clough and Scott (1989)}^{\text{a}}$	<i>Xylocarpus granatum</i> $W_{\text{R}} = 0.145\text{DBH}^{2.55} r^2 = 0.99, n = 6, D_{\text{max}} = 8 \text{ cm}, \text{Poungpam et al. (2002)}$
<i>Ceriops australis</i> $W_{\text{top}} = 0.189\text{DBH}^{2.34} r^2 = 0.99, n = 26, D_{\text{max}} = 20 \text{ cm}, \text{Clough and Scott (1989)}^{\text{a}}$	Common equation $W_{\text{R}} = 0.199p^{0.899}D^{2.22} r^2 = 0.95, n = 26, D_{\text{max}} = 45 \text{ cm}, \text{Komiyama et al. (2005)}$
<i>Xylocarpus granatum</i> $W_{\text{top}} = 0.0823\text{DBH}^{2.59} r^2 = 0.99, n = 15, D_{\text{max}} = 25 \text{ cm}, \text{Clough and Scott (1989)}^{\text{a}}$	
Common equation $W_{\text{top}} = 0.251pD^{2.46} r^2 = 0.98, n = 104, D_{\text{max}} = 49 \text{ cm}, \text{Komiyama et al. (2005)}$ $W_{\text{top}} = 0.168p\text{DBH}^{2.47} r^2 = 0.99, n = 84, D_{\text{max}} = 50 \text{ cm}, \text{Chave et al. (2005)}$	

Tomado de Komiyama et al (2008).

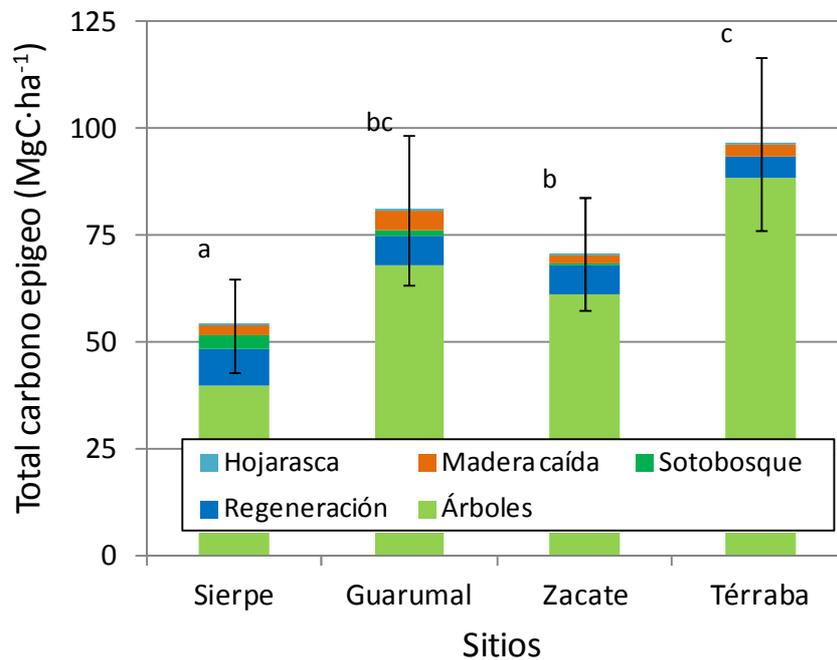


Figura 6. Existencias epigeas de carbono en 4 sitios de manglar en el Humedal Nacional Térraba-Sierpe, Costa Rica. Los sitios están ordenados de izquierda a derecha siguiendo un gradiente latitudinal de sur a norte. Las letras representan medias estadísticamente similares.

La presencia de hojarasca es mínima en los manglares; no sobrepasa $1.3 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ (un 0.02% del carbono epigeo total), debido quizá a la influencia de las mareas que arrastran la hojarasca depositada sobre la superficie del manglar y la acción de cangrejos y otros animales que se alimentan de los detritos. Esto es consistente con observaciones de campo donde, aparte de la alta densidad de raíces de los árboles de mangle, no hay mayor presencia de regeneración, hojarasca o madera caída (Figura 7).



Figura 7. Alta densidad de raíces en un sitio de manglar en el Humedal Térraba-Sierpe, Costa Rica (izquierda). Muestra de la poca de regeneración y hojarasca sobre el suelo (derecha). Fotos: Miguel Cifuentes.

El área basal de los árboles con $dap \geq 5\text{cm}$ está significativamente correlacionada con el contenido de carbono epigeo (TAGC) a través de la regresión:

$$\text{TAGC} = 3.41 + 0.14 * \text{AB}_{\geq 5\text{cm}} \quad (r^2 = 0.71; p < 0.0001)$$

Esto sugiere que para futuras experiencias dentro de manglares, se podría obviar la recopilación de datos dasométricos del sotobosque, la hojarasca y la madera caída. Esto facilitaría la logística del trabajo de campo, sin repercutir negativamente sobre los estimados de carbono epigeo. Sin embargo, antes de implementar esta sugerencia debería evaluarse si esta relación es robusta en otras localidades del país con manglares de fisionomía distinta.

A diferencia de la anterior ecuación, la correlación entre el área basal y el carbono total a nivel de ecosistema (TEC), aunque significativa, es bastante débil:

$$\text{TEC} = 1.10 + 0.03 * \text{AB}_{\geq 5\text{cm}} \quad (r^2 = 0.19; p < 0.0001)$$

Por lo tanto, no sería factible estimar con alto nivel de certidumbre las existencias de carbono a nivel de ecosistema utilizando únicamente el área basal. Esto se debe a la proporción del carbono contenida en el suelo relativo al carbono epigeo y su alta variabilidad entre sitios.

Cuadro 3. Existencias de carbono a nivel de ecosistema (en MgC·ha⁻¹) por componente en 4 sitios del Humedal Nacional Térraba-Sierpe, Costa Rica.

Componente	Sitio							
	Sierpe		Guarumal		Zacate		Térraba	
Árboles	55.45 ± 6.10		92.22 ± 8.45		86.12 ± 5.72		120.12 ± 8.95	
Regeneración	13.75 ± 3.59		10.79 ± 4.06		10.43 ± 3.13		8.20 ± 2.62	
Sotobosque	3.18 ± 1.48		1.48 ± 0.96		0.38 ± 0.28		0.00 ± 0.00	
Madera caída	2.19 ± 0.45		4.41 ± 0.81		2.15 ± 0.38		2.96 ± 0.62	
Hojarasca	0.26 ± 0.03		0.26 ± 0.03		0.28 ± 0.04		0.26 ± 0.06	
Total epigeo	53.88 ± 4.56	a	80.94 ± 7.29	bc	70.71 ± 4.45	b	96.59 ± 7.49	c
Suelos	316.05 ± 9.48	b	326.62 ± 12.94	b	338.52 ± 12.64	b	267.81 ± 17.60	a
C total ecosistema	390.88 ± 10.84	a	435.80 ± 17.45	b	437.88 ± 13.04	b	399.35 ± 20.30	ab

Nota: Las letras representan agrupaciones estadísticas entre las medias.

Idealmente, se deberían utilizar modelos alométricos locales (o al menos regionales para Centroamérica) para calcular el carbono epigeo. Sin embargo, estas ecuaciones no están disponibles. La selección de modelos alométricos tiene una influencia significativa sobre los estimados de carbono epigeo (Figura 8). Aunque la ecuación de Komiyama et al (2005) sobreestima en un 37% las existencias de carbono comparado con los resultados obtenidos con la ecuación de Châve et al (2005), 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. Se recomienda por tanto incluir este tema en la agenda de investigación y de financiamiento regional.

Las existencias promedio de carbono epigeo medidas en el Humedal Térraba Sierpe representan un 62% de aquellas medidas en los manglares de Moín y Gandoca y el 53% de las medidas en Indonesia (Figura 9). A nivel de ecosistema, sin embargo, las existencias de carbono en Térraba-Sierpe son 1.4 a 1.8 veces mayores que las medidas en Moín y Gandoca. Lo anterior es asumiendo que las existencias de carbono en el suelo en los sitios del Caribe representan el 98% de las existencias a nivel de ecosistema (Donato et al 2011). La dominancia y la dinámica de especies con fisionomías diferentes, unida a diferencias en la dinámica de las mareas entre ambas costas de Costa Rica podrían ayudar a explicar estas diferencias.

Existencias de carbono del suelo

El carbono del suelo comprende el carbono almacenado en la biomasa (raíces) y en el suelo mineral. El primer componente representa el 39% de la biomasa sobre el suelo. Esa proporción es básicamente constante entre sitios puesto que se deriva de una ecuación alométrica dependiente del mismo dap con el que se calculan las existencias epigeas.

La concentración de carbono (%) aumenta significativamente ($p < 0.0001$), entre 7.1% y 11.8, a lo largo de los transectos de estudio (desde la orilla del canal hacia adentro del manglar)¹⁰. Esto sugiere una dinámica de sedimentación y acumulación de materia orgánica mayor lejos del canal del río, debida probablemente a la mayor intensidad de los flujos de la marea cerca del canal. La concentración de carbono además aumenta con la profundidad del suelo, de 8.5% en los primeros 15 cm hasta 10 - 11 % en lo que resta del perfil. No hay diferencias significativas en la concentración de carbono entre los 15 y los 100 cm de profundidad.

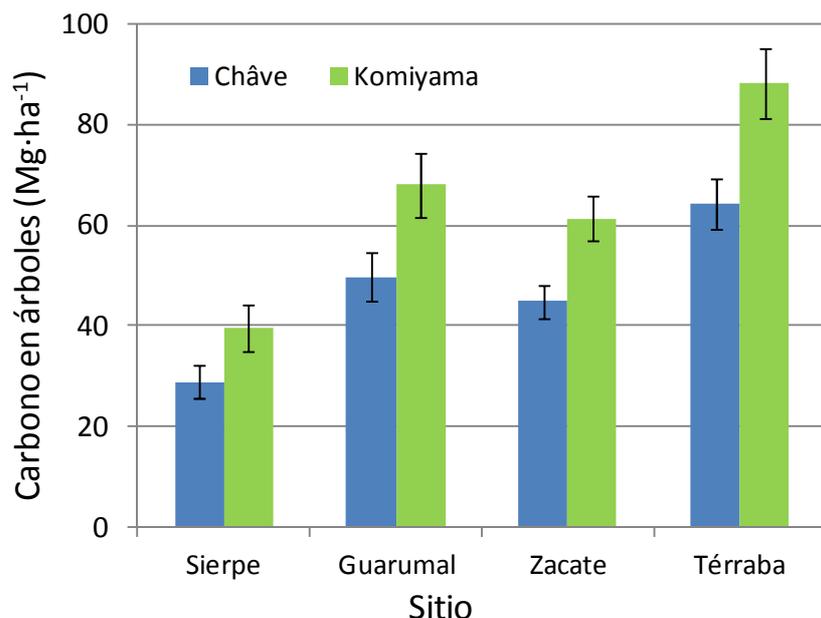


Figura 8. Diferencias en la estimación de las existencias de carbono epigeo según la ecuación alométrica utilizada. Las barras azules representan los resultados de utilizar la ecuación de Châve et al (2005) y las barras verdes la ecuación de Komiyama et al (2005).

La densidad aparente del suelo sigue un patrón similar al anterior ($p < 0.0001$), disminuyendo entre $0.49 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ cerca del canal hasta $0.38 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ al final del transecto. Por otra parte, la mayor densidad ($0.46 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) se encontró en los primeros 15 cm del perfil, existiendo diferencias significativas ($p= 0.0073$) al aumentar la profundidad. En las demás profundidades, la densidad ronda los $0.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. La mayor densidad aparente cerca de la superficie podría ser un reflejo del menor contenido de material orgánico cerca de la superficie.

La cantidad de carbono almacenado en el suelo hasta 1 m de profundidad varía entre 141 y $593 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ en todos los sitios. A diferencia del carbono epigeo, no hay una gradiente latitudinal en el carbono acumulado en los suelos del Humedal (Cuadro 3). Hay un ligero aumento ($p= 0.0226$) en la cantidad de carbono almacenado a lo largo de los transectos. El promedio de almacenamiento en las parcelas más cercanas a la orilla del canal sobrepasa ligeramente los $71 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$. En las parcelas restantes el carbono del suelo varía entre 80 y $83 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$, sin haber

¹⁰ Queda pendiente un re-análisis de una submuestra de los suelos para verificar la magnitud de las concentraciones de carbono.

diferencias significativas entre ellas. Hay además un significativo aumento en la cantidad de carbono almacenado conforme aumenta la profundidad del perfil. En los primeros 30 cm del suelo, se almacenan aproximadamente en promedio 93 MgC·ha⁻¹, sin haber diferencias en el almacenamiento entre los 0 – 15 y 15 – 30 cm de profundidad. En el resto del perfil se acumulan 225 MgC·ha⁻¹, de las cuales el 70% corresponde a los últimos 50 cm del perfil (Figura 10).

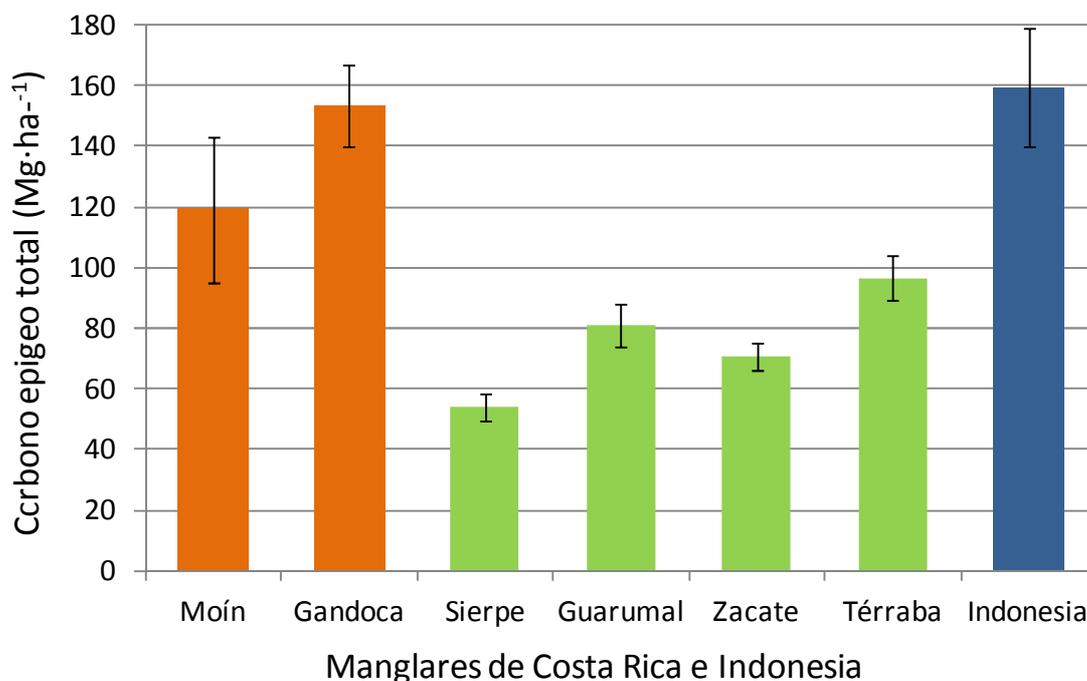


Figura 9. Existencias de carbono epigeo en manglares de Costa Rica. Las barras anaranjadas son datos del Caribe costarricense (Manrow 2012). Las barras verdes corresponden al muestreo realizado en el Humedal Térraba-Sierpe (Costa Pacífico). Los sitios están ordenados de izquierda a derecha siguiendo un gradiente latitudinal de sur a norte. La barra azul son datos de Indonesia (Donato et al 2011).

Existencias de carbono a nivel de ecosistema y flujos históricos de emisiones

Las existencias promedio de carbono a nivel de ecosistema en el Humedal Nacional Térraba-Sierpe varían entre 391 MgC·ha⁻¹ en la boca del Río Sierpe hasta 438 MgC·ha⁻¹ en la boca del Río Zacate (Cuadro 3). Aunque se encontraron diferencias significativas entre los sitios ($p= 0.0298$), no hay indicios de una distribución espacial entre los sitios ubicados de norte a sur en el Humedal. Tampoco parece haber una gradiente espacial a lo largo de los cauces de los ríos donde se ubicaron los transectos, ni entre parcelas a lo largo de los transectos de estudio. No se podría, por tanto, con la información disponible distinguir áreas de mayor concentración de carbono dentro del Humedal.

Los componentes más importantes de las existencias de carbono a nivel de ecosistema son los suelos y los árboles. El suelo representa un 76% del total del ecosistema, mientras que los árboles representan el 20% (Figura 11).

Aunque se ha dicho que los manglares llegan a acumular entre 2 y 5 veces más carbono a nivel de ecosistema que los bosques terrestres (Kauffman, com.pers.¹¹), los bosques costarricenses parecen estar en el rango inferior de este enunciado (Figura 12). El rango máximo de este enunciado se alcanza sólo cuando para Indonesia se consideran las existencias de carbono en suelo hasta 3 m de profundidad. Por otro lado, los manglares de Indonesia contienen existencias de carbono a nivel de ecosistema sólo 60% mayores que los manglares en Sierpe (Figura 12). Durante entrevistas con los pobladores locales, es evidente que los procesos de degradación de los manglares del Humedal han sido considerables. Es posible que éstos hayan perdido cantidades considerables de carbono durante la época cuando se extraía libremente productos maderables y no maderables de los manglares de la zona, y se daban mayores procesos de cambio de uso de la tierra en zonas costeras. La escogencia de ecuaciones alométricas no locales podría también estar influyendo en la menor magnitud de las existencias calculadas.

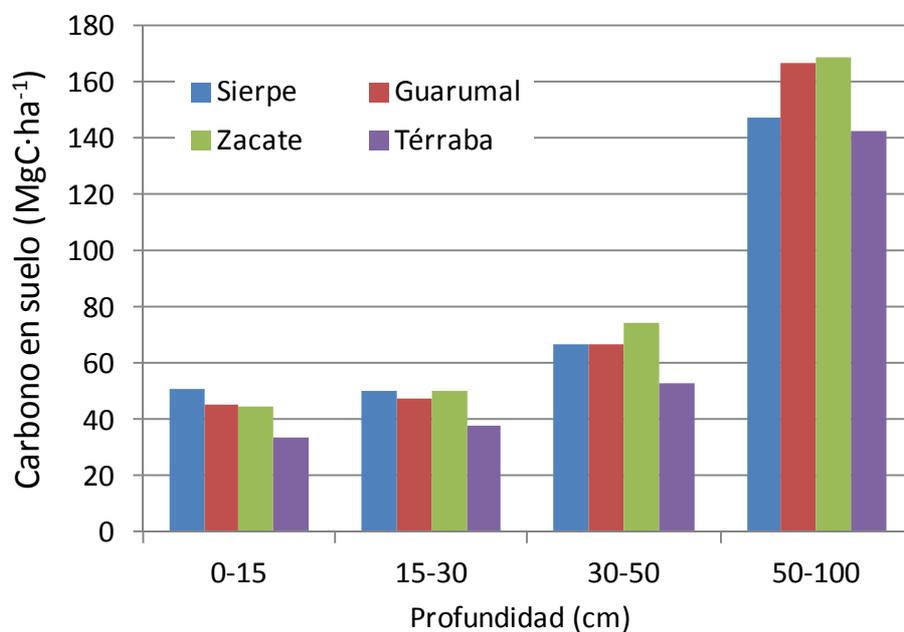


Figura 10. Existencias de carbono según el intervalo de profundidad del perfil de suelo en el Humedal Nacional Térraba-Sierpe.

En total, los manglares del Humedal presentan existencias de carbono cercanas a los 8 Tg de carbono, lo que representa cerca del 40% del carbono total almacenado en los manglares de Costa Rica (Cuadro 4). Cálculos preliminares sugieren que en 22 años (entre 1990 y 2012) el país ha perdido casi 4000 ha de manglares, lo que se traduciría en una emisión histórica de CO₂ de 1.6 Tg (Cuadro 4). Esto equivale a 1.3 veces la cantidad de emisiones producidas por todo el sector de uso de la tierra en Costa Rica en la década de los 90 (Costa Rica 2000). Aunque en la actualidad los procesos de deforestación y degradación de los manglares han sido controlados, este cálculo preliminar da un indicativo de la magnitud del potencial de recuperación de existencias de

¹¹ Dr. Boone Kauffman. Presentación en el 3º Taller Internacional de Expertos Científicos de la Iniciativa de Carbono Azul. Quepos, Costa Rica.

carbono que podría tener el país de incorporarse los manglares dentro de mecanismos y estrategias de recuperación de ecosistemas costeros. Esta situación debe ser analizada por las autoridades nacionales.

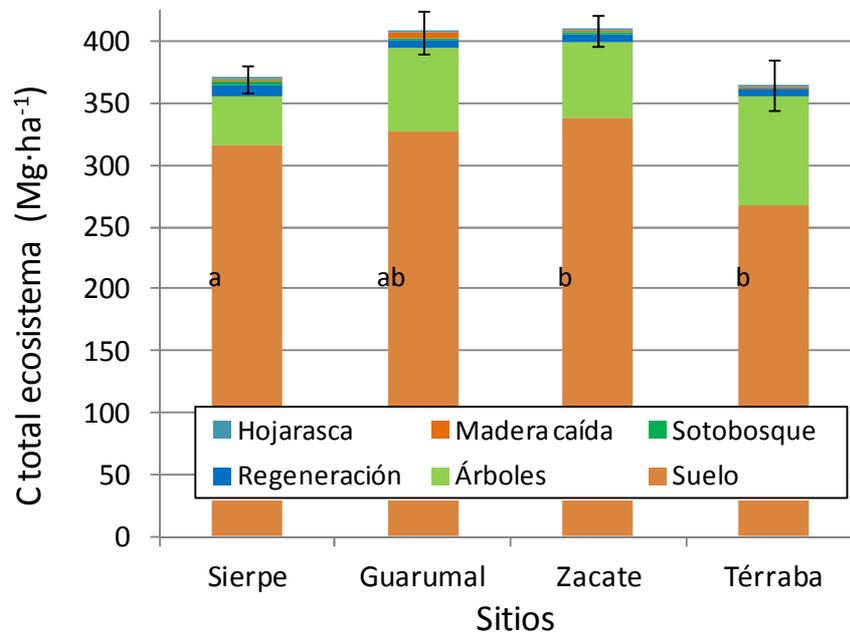


Figura 11. Existencias de carbono a nivel de ecosistema (con suelo hasta 1 m de profundidad) en manglares del Humedal Nacional Térraba-Sierpe. Los sitios están ordenados de izquierda a derecha siguiendo un gradiente latitudinal de sur a norte. Las letras representan medias estadísticamente similares.

Cuadro 4. Estimación de las existencias de carbono a nivel nacional (en Tg) para Costa Rica

Ubicación	Área	%	Densidad C	Existencias C
	(ha)		(MgC·ha ⁻¹)	(Tg)
1 Térraba-Sierpe	18753	38.8	446.1	8.37
2 Nicoya (Gulf)	17217	35.6	446.1	7.68
3 Central Pacific	4932	10.2	446.1	2.20
4 Golfo Dulce	2909	6.0	446.1	1.30
5 Nicoya (Península)	2432	5.0	446.1	1.08
6 Caribe	2056	4.3	269.8	0.55
Total 2012	48299			21.18
Total 1990	52130			22.86

Nota: La densidad de carbono es a nivel de ecosistema. Área de manglares para Costa Rica fue extraída de Corrales et al (2012) y de registros históricos de uso de la tierra facilitados por el SINAC. Las densidades de

carbono para el Caribe provienen del presente estudio y de Manrow (2012).
1 Tg (teragramo) = 10^{12} g ó 1 millón de toneladas

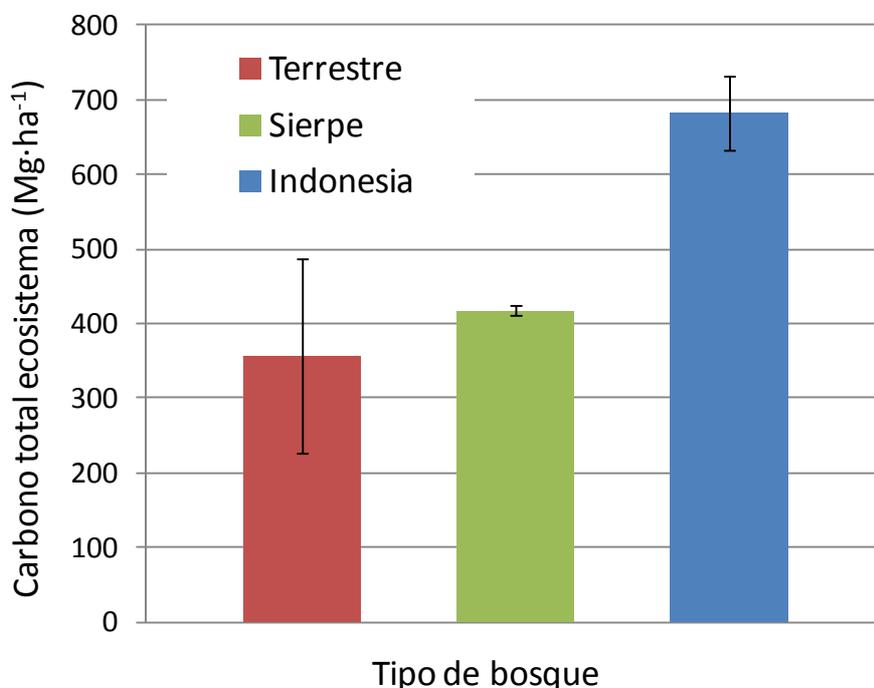


Figura 12. Comparación de las existencias de carbono a nivel de ecosistema en manglares y bosques terrestres de Costa Rica y de Indonesia. Los datos de los bosques terrestres son de Kauffman et al (En prep.) y los de Indonesia de Donato et al (2011), considerando el suelo hasta 1 m de profundidad. Los datos de manglares provienen del presente estudio.

Desafíos, impactos y pasos futuros

Este estudio fue el primero de su clase en Costa Rica, y probablemente en toda la región Centroamericana. Un obstáculo inicial para su ejecución fue la falta de orientación metodológica y la ausencia de capacidad local que enfrentamos. La primera fue subsanada con apoyo de especialistas del CIFOR. Para solucionar la segunda se capacitó en técnicas de inventarios de carbono en manglares a 2 personas con especialidad en Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico y a 2 asistentes de campo, quienes residen en el área de Sierpe.

Las diferencias significativas entre el carbono epigeo calculado usando diferentes ecuaciones alométricas pone en evidencia la necesidad de generar este tipo de herramientas a nivel local (y/o regional)¹². No existen además otros factores locales para el correcto cálculo de las existencias de carbono en manglares: factores de expansión de biomasa, razones raíz:tallo o ecuaciones

¹² Para un estudio completo que evidencia los efectos de utilizar ecuaciones alométricas no indicadas sobre los estimados de carbono, ver Álvarez et al (2012).

alométricas para raíces, concentraciones de carbono en tejido vegetal y gravedad específica de la madera. Además, es necesario clarificar la taxonomía de las especies puesto que la identificación dendrológica en el campo no es definitiva (ver Cerón-Souza 2010). En futuras experiencias podría considerarse además implementar transectos de mayor longitud, puesto que por ahora el muestreo está sesgado hacia las áreas más cercanas a los canales de los ríos y se desconoce si hay variabilidad espacial a mayor escala dentro del Humedal.

Resultados preliminares de este estudio fueron presentados en el 3^{er} Taller Internacional de Expertos Científicos de la Iniciativa de Carbono Azul. Quepos, Costa Rica, celebrado del 19 al 24 de marzo en Quepos, Costa Rica. Se contribuyó de esta forma a fortalecer la propuesta de posicionar a Costa Rica como un sitio demostrativo piloto de la iniciativa de carbono azul.

Como seguimiento a la presente iniciativa se propone ampliar el muestreo de carbono en manglares y otros ecosistemas marino-costeros del país. Los manglares del Golfo de Nicoya, por ejemplo, representan el 36% del área de manglar a nivel nacional y sus existencias de carbono no han sido cuantificadas. Por otro lado, la cuantificación de carbono realizada en la costa Caribe se hizo sólo tomando en cuenta los árboles. Sería necesario complementar esas mediciones con los demás componentes del ecosistema, sobre todo con los suelos. Existen otras iniciativas locales en el Golfo Dulce que podrían beneficiarse de la cuantificación de carbono dentro de un esquema más amplio de cuantificación de servicios ecosistémicos.

Sería útil realizar un estudio más detallado de los patrones históricos de cambio de uso de la tierra en los ecosistemas costeros del país para estimar con mayor confiabilidad el flujo histórico de emisiones a partir de estos ecosistemas. Con esta información se podría también estimar el potencial de recuperación de estas existencias, dentro de un marco de restauración ecológica y gestión comunitaria de zonas previamente bajo manglar.

Más allá del carbono, se deberían también ampliar iniciativas de cuantificación de servicios ecosistémicos de los ecosistemas marino-costeros para su potencial inclusión en estrategias de desarrollo local. Estas podrían eventualmente en el futuro incluir esquemas de pago por servicios ambientales y, en el caso del carbono, inclusive apoyar al desarrollo de la estrategia REDD+ nacional. Estas y otras experiencias podrían servir de base para ser diseminadas en la región.

Bibliografía

- Alongi, D.M. 2008 Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76: 1–13
- Alvarez, M. 1999. Humedales de Costa Rica. (en línea). Consultado el 27 noviembre del 2011. Disponible en <http://www.guiascostarica.com/humeda.htm#h11>
- Álvarez, E. 2012. Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*. 267:297-308.
- Bossi, R. & Cintrón, G. 1990. Manglares del Gran Caribe: Hacia un manejo sostenible. Trad. J Gonzalez. Barbados Nairobi. Washington DC. Asociación para la Conservación del Caribe (CCA), Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo (PNUMA),.35 p
- Cerón-Souza, I. 2010. Hybridization and introgression in new world red mangroves, *Rhizophora* (Rhizophoraceae). *American Journal of Botany*. 97(6):945-957.
- Chacón, D; Ochoa, E. 1998. Un plan para el manejo sostenido del humedal Sierpe-Térraba. Ubicación y contexto. 25p
- Christensen, B., 1978. Biomass and productivity of *Rhizophora apiculata* B1 in a mangrove in southern Thailand. *Aquat. Bot.* 4, 43–52.
- Clark, D.A. et al. 2001. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecol. Appl.* 11, 371–374.
- Coll et al. 2001. El manglar y otras asociaciones vegetales de la laguna de Gandoca, Limón, Costa Rica (en línea). Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. Consultado: 22-11-11. Disponible en <http://www.ots.ac.cr/tropiweb/attachments/suppls/sup49-2%20EACR%20II/31-COLLEL.pdf>.
- Contraloría General de la República de Costa Rica. 2010. Informe sobre la ocupación y explotación de terrenos en Isla Garza de Osa. Informe No. DFOE-SM-IF-15-2010. San José, C.R. 13 p
- Cordero, P. 2000. El manglar más grande de Costa Rica: experiencias de la UICN en el Proyecto DANIDA-MANGLARES de Térraba Sierpe. El manglar Térraba - Sierpe. 1ª ed. San José, C.R: UICN. 48 p
- Corrales L., Castro M., Castillo M.2012. Evaluación del cambio en la extensión de ecosistemas costeros en Centroamérica entre 1973 y 2008 por medio de sensores remotos. En preparación.

-
- Cortés, X. 2002. Importancia socio-económica del Humedal Sierpe-Térraba en las familias residentes de la zona sur del país. Informe de proyecto para optar al grado de bachiller. Alajuela, C.R: Instituto Tecnológico de Costa Rica. 108 p
- Costa Rica. 2000. Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. República de Costa Rica. Ministerio del Ambiente y Energía. Instituto Meteorológico Nacional (IMN). San José. 177p.
- Danielsen, F. et al. 2005 The Asian tsunami: a protective role for coastal vegetation. *Science* 310: 643
- Day, J.W. et al. 1996. A 7-year record of above-ground net primary production in a southeastern Mexican mangrove forest. *Aquat. Bot.* 55, 39–60.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Donato D. et al. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*. 4:293-294.
- Bouillon, 2011. Carbon cycle: Storage beneath mangroves. *Nature Geoscience*. 4:282-283.
- Giorgi, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33(L08707): 4 p.
- Jiménez J, 1994. Los manglares del Pacífico Centroamericano. Heredia, C. R. EFUNA, Universidad Nacional. 336 p
- Kauffman, J.B.; Donato, D. 2012. Protocols for the measurement, monitoring, and reporting of structure, biomass, and carbon stocks in mangrove forests. Working Paper 86. CIFOR. Bogor, Indonesia. 40p.
- Keith, H. et al. 2009. Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests. *PNAS*. 106(28):11635-11640.
- Komiyama, A. et al. 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., Pongpan, S., Kato, S., 2005. Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *J. Trop. Ecol.* 21, 471–477.
- Komiyama, A et al. 2008. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany* 89 (2008) 128–137.

-
- Laffoley, D.d'A. & Grimsditch, G. 2009. Laffoley, D.d'A. & Grimsditch, G. (eds). The management of natural coastal carbon sinks (en línea). Gland, Switzerland. IUCN. 53 pp. Consultado: 22-11-11. Disponible en: <http://data.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/2009-038.pdf>.
- Mainardi V. 1996. El Manglar de Terraba-Sierpe en Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 91p.
- Murdiyarsa, D. et al. 2009. Carbon storage in mangrove and peatland ecosystems: A preliminary account from plots in Indonesia. Center for International Forestry Research Center for International Forestry Research CIFOR. Bogor Barat, Indonesia. 37p.
- Nelson, D. W. and L. E. Sommers (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis: Part 3, Chemical Methods. D. L. Sparks. Madison, Wisconsin, USA., Soil Science Society of America, Inc. and American Society of Agronomy, Inc. Number 5 in SSSA Book Series.: 961-1010.
- Ortiz, E. 2008. Atlas digital 2008. Capas de cantones, zonas de vida y poblados. (CD-ROM). Cartago, CR: Instituto Tecnológico de Costa Rica. 1 CD-ROM.
- Pizarro, F et al. 2004. Manual de Procedimientos para el Manejo de los Manglares de Costa Rica. Heredia, C. R. EFUNA. Universidad Nacional. 132 P.
- Pool, D.J., S.C. Snedaker & A.E. Lugo. 1977. Structure of mangrove forests in Florida, Puerto Rico, Mexico, and Costa Rica (en línea). *Biotropica* 9:195-212. Consulta 11-22-11. Disponible en: <http://www.mangroverestoration.com/pdfs/Pool%20et%20al%201977.pdf>
- Quesada, M; Cortés, J. 2006. Los ecosistemas marinos del pacífico sur de Costa Rica: estado del conocimiento y perspectivas de manejo. *Revista Biología Tropical*. Vol. 54 (Supl. 1). 101-145 p
- Sánchez, J. 2010. Informe final de investigación: Estudio regional sobre el desarrollo local de los cantones (trans) fronterizos del pacífico sur de Costa Rica. Situación y elementos socio-ambientales a nivel subregional y cantonal de la subregión sur-sur. San José, C.R: Universidad Estatal a Distancia. 68p
- Zamora-Trejos, P. 2006. Ambientes Marino Costeros de Costa Rica. Comisión Interdisciplinaria Marino Costera de la Zona Económica Exclusiva de Costa Rica, Informe Técnico. Capítulo III, Manglares: 23-39. V. Nielsen-Muñoz y M.A. Quesada-Alpizar (Eds.). San José, Costa Rica. CIMAR, CI, TNC. Consulta 11-22-11. Disponible en: http://www.mespinozamen.com/uploads/4/5/7/6/4576162/infome_tecnico_ambientes_marinos_cr-czee_2006.pdf
- Zanne, A.E. et al 2009. Global wood density database. Dryad. Identifier: <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>
-