

Propuesta de
**Protocolo para la estimación integral de contenidos
de carbono y biodiversidad en humedales del
Magdalena Medio y Bajo**

**Anexo 4. Resultados del contenido y almacenamiento de carbono
orgánico en suelos y sedimentos del Complejo Cenagoso de Zapatosa**



**Yenny Beatriz Mendoza Plazas
Profesional de Suelos y Sedimentos**



Propuesta de Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo

Ecopetrol S.A

Santiago Martínez Ochoa
Xiomara Sanclemente Manrique
Lorena Ortiz Melo
Maria Juliana Salcedo Hernández
Adriana Velandia Valero
Jorge Gaviria Chicuasque
Apoyo técnico y Administrativo del
Convenio Específico No. 3044288

Fundación Natura Colombia

Clara Ligia Solano Gutiérrez
Directora ejecutiva

Nancy Vargas Tovar
Subdirectora técnica

Lorena Franco Vidal
Subdirectora técnica

Sandra Galán
Subdirectora técnica

Mauricio Rosas Hurtado
Jefe financiero y contable

Andrea Gutiérrez de Piñeres
Jefe administrativa y de gestión
humana

Eliana Marcela Garzón Fierro
Jefe de comunicaciones

Gustavo Andrés Segura Clavijo
Jefe de proyecto CO2 Humedales

Autores

Equipo técnico CO₂ Humedales

Claudia Patricia Andramunio-Acero
Profesional monitoreo de carbono
Líder técnica del protocolo

Yesid Fernando Rondón-Martínez
Profesional de apoyo transversal

Yennifer García-Murcia
Profesional de biomasa y materia
orgánica muerta

Yenny Beatriz Mendoza Plazas
Profesional de suelos y sedimentos

Mónica Tatiana López-Muñoz
Profesional de biodiversidad

Lina María Parada Alzate
Profesional SIG agua y biodiversidad

Jhenny Liliana Salgado Vásquez
Profesional estadístico y gestión de la
información

Luis Alfredo Moreno-Pérez
Profesional de apoyo local

Patricia Téllez Guio
Sidney Adriano Pérez Villegas
Profesionales SIG Datos de Actividad

Colaboradores técnicos

José Andrés Posada-García
Nathalie Morales García
Javier Sunyer MacLennan
Liliana Ospina Calle
Carolina Bustamante-Gil
Osvar Cupitra Gómez
Santiago Cañón Escobar
Profesionales de campo y análisis

Michelle Hernández Fernández
Cristhian Alfonso Pimiento Ordóñez
Luz Patricia Hernández Arango
Sandra Milena Palacio Taborda
Nicolas Romero-Peña
Profesionales Fundación Natura de
apoyo en el proceso de formulación e
implementación

Colaboradores locales

Francisco Villalobos Ríos
Danilson Segovia Zambrano
Rodolfo Segovia Daza
Vicente Buitrago Segovia
Deibis Armando Martínez Martínez
Omaida Rangel Rangel
Genaro Madrid Álvarez
Alvenis Carpio Castro
Elvin Dewin Cabarcas Monterrosa
Jorge Adolfo Rangel Piñeres
Jaider Guerra Guillen
Celso Moreno Mejía
Fabio Moreno Mejía
Omar Antonio Morales Hurtado
Teobaldo Cervantes Cadena
Edilso Iglesia Machado

Edición

Danyth Janneth Fandiño Lerma
Líder de comunicaciones CO2
Humedales

Diego Alejandro Quintero Candela
Lina Daniela Mutis Prado
Diseño gráfico

Andrea Julieth Castellanos Leal
Diagramación

Claudia Campos Roza
Corrección de estilo

Alejandro Peña García
José Manuel Pantoja Surmay
Fotografías

Cítese como:

Andramunio-Acero, C., Rondón-Martínez, Y., García-Murcia, Y., Mendoza, Y., López-Muñoz, M., Parada, L., Salgado, J., Moreno-Pérez, L., Téllez, P. y Pérez, S. (2024). Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*. Fundación Natura Colombia, Ecopetrol S. A.

ISBN digital: en trámite

Aviso legal

© Fundación Natura Colombia
Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión del contenido de este documento para fines educativos u otros fines no comerciales, con previa autorización de los titulares de los derechos de autor y citando la fuente. Se prohíbe la reproducción de este documento para fines comerciales.

Esta publicación se realizó en el marco del Proyecto CO2 Humedales, Convenio Específico No. 3044288 entre Fundación Natura Colombia y Ecopetrol S.A.

INTRODUCCIÓN

La propuesta de Protocolo que cobija los resultados de este anexo busca generar estrategias de desarrollo, planeación y ordenamiento territorial que promuevan el uso sostenible de los ecosistemas y recursos colombianos, a partir de la caracterización de los compartimientos definidos como relevantes en la dinámica, captura y almacenamiento de carbono (biomasa y materia orgánica, suelos y sedimentos, y biodiversidad) de acuerdo con las directrices del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2006).

La estimación de contenidos de carbono en el compartimiento suelos y sedimentos para la ventana de implementación del Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ) se realizó siguiendo la metodología de la propuesta de *Protocolo para la estimación de contenidos de carbono en humedales del Magdalena Medio y Bajo*¹. Dicha medición se realizó para las profundidades de 0-25 cm y de 25-50 cm, las cuales se integraron para dar un resultado general a una profundidad de 0-50 cm.

Es importante mencionar que este proceso se desarrolló en las zonas de muestreo (ZM) que componen las unidades cartográficas de suelos y cobertura vegetal, seleccionadas por medio de aleatorización estratificada. Allí se llevaron a cabo dos pilotos de validación durante las temporadas seca y de lluvias, con un total de 22 y 27 ZM, respectivamente. Para establecer el contenido de carbono en sedimentos se muestrearon 7 sitios asociados a ZM donde ocurren fluctuaciones del nivel hídrico de la ciénaga. Dichos resultados son cuantitativos y representan una aproximación a la realidad de la zona estudiada, por lo cual se calcula también la incertidumbre asociada a estas estimaciones, proceso inherente al método de colecta de las muestras.

RESULTADOS

HOMOLOGACIÓN DE SUELOS

Este proceso se realiza mediante la identificación de la taxonomía de suelos de cada una de las unidades cartográficas (UCS), con sus propiedades y características relevantes, para definir la asociación más adecuada dentro de

¹ De aquí en adelante, este documento se denominará propuesta de Protocolo.

las clases de suelos establecidas por el IPCC. Estas clases de suelos se relacionan con la taxonomía de suelos proveniente del mapa geopedológico (U. S. Department of Agriculture [USDA], 2017), integrada posteriormente con el tipo de cobertura para definir las zonas de muestreo (Tabla 1).

Tabla 1. Clases de suelos del Complejo Cenagoso de Zapatos, de acuerdo con el proceso de homologación USDA-IPCC.

Unidad cartográfica Suelo (Mapa IGAC 2014)	Taxonomía USDA	Clasificación IPCC	Código IPCC
LWD, PVB, PVD, PVE, PVH, PVJ, RWA, RWC, RWE	Typic Haplusterts Typic Fluvaquents Typic Udorthents Typic Eutrudepts Typic Haplustolls Saladic Natrustalfs	Arcillas de alta actividad	HAC
RWE	Typic Plinthustults	Arcillas de baja actividad	LAC
LWE, LWF, PWF, PWH, RVA	Typic Haplustepts Typic Ustipsamments Typic Udipsamments	Arenales	AR
RWK, LVF, RWD	Typic Endoaquerts Chromic Endoaquerts Vertic Endoaquepts	Humedales	HM
PVC, RVB, LVC, LWC, LWC, MVC, PVA, RWJ	Oxic Dystrudepts Aquic Udifuvents Typic Haplustepts Lithic Humudepts Typic Udorthents Chromic Haplusterts	Otros minerales suelos	OM

Fuente: elaboración propia (2024)

De acuerdo con la metodología planteada en la propuesta de Protocolo para la homologación, en el CCZ se encuentran cinco de las clases de suelos definidas por el IPCC, con las siguientes características determinantes:

- ✦ Arcillas de alta actividad (HAC): clase asociada a suelos con pH neutro a básico y arcillas de tipo 2:1 (expandibles).

- ┆ Arcillas de baja actividad (LAC): suelos con pH ácidos, baja fertilidad y arcillas muy evolucionadas tipo 1:1.
- ┆ Arenales (AR): suelos que presentan texturas arenosas.
- ┆ Suelos de humedales (HM): suelos con un régimen de humedad ácuico, lo que implica que se encuentran saturados la mayor parte del año y evidencian procesos de oxidorreducción (USDA, 2010).
- ┆ Otros suelos minerales (OM): estos suelos no tienen una asociación directa con las clases del IPCC; tienen variabilidad de texturas y arcillas, y se originan a partir de materiales minerales.

DENSIDAD APARENTE

Para este estudio, la densidad aparente es una variable determinante para establecer el contenido de carbono en el suelo; además, es indicador de la pérdida de porosidad del terreno, fenómeno asociado a la compactación generada por procesos de intervención o cambio de uso.

Los resultados para el CCZ muestran un comportamiento similar independiente de la ZM, especialmente a una profundidad de 0-25 cm. Se destaca que suelos intervenidos con cultivos (C) y con coberturas de pastos (G), en las zonas de monitoreo OM-C, AR-G, LAC-G, HAC-C y AR-C, presentan los mayores valores de densidad aparente, lo cual puede estar relacionado con procesos de intervención (cultivos) o con el tipo de partículas de suelos (arenas y arcillas) con poco aporte de materia orgánica (Figura 1).

Los menores valores de densidad aparente en las dos profundidades medidas se presentan en las zonas de muestreo HAC-W, HAC-Hz, HM-G y AR-W. Estas zonas se asocian con mayor contenido de materia orgánica, ya que por el tipo de cobertura (vegetación acuática W) y el tipo de suelos (HM), es probable que haya una acumulación constante de sedimentos aportados por las fluctuaciones del nivel de agua del humedal, con la consecuente disminución en la densidad aparente.

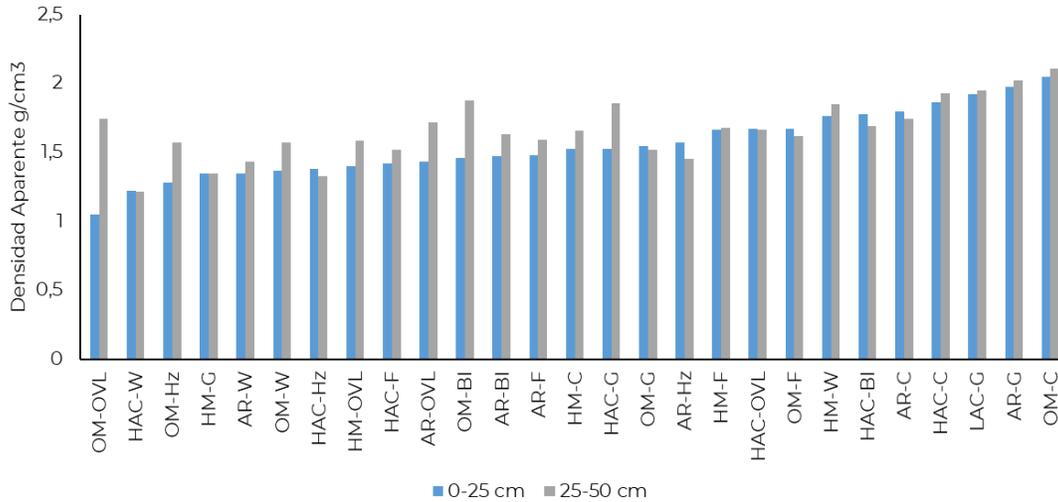


Figura 1. Resultado medio de la densidad aparente del suelo (g/cm^3) para las zonas de muestreo del Complejo Cenagoso de Zapatosá. Fuente: elaboración propia (2024).

CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO Y MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

Los contenidos de carbono orgánico en los suelos (COS) de la zona varían entre 0,3 y 2,0 % en las profundidades medidas. Estos valores, de acuerdo con la interpretación de resultados de laboratorio del IGAC, se consideran bajos para clima cálido.

Los valores más bajos se presentan en las zonas de muestreo AR-C, OM-C, AR-G, HAC-OVL y HAC-OVL, mientras que los valores más altos corresponden a AR-F, OM-G, OM-W, HAC-Hz y HAC-W. Se destaca la zona HAC-W, que tiene valor bajo de densidad aparente y el mayor valor de contenido de carbono (2,0 %) a una profundidad de 0-25 cm; esto pone de manifiesto la relación directa entre estas variables y la presencia de materia orgánica en los sedimentos aportados por el cuerpo de agua. A una profundidad de 25 a 50 cm se destaca la zona HM-F, con el mayor valor reportado para esta profundidad: 1,1 % de carbono; en este caso, el contenido de carbono está asociado con la evolución del suelo, que muestra aportes de materia orgánica en periodos prolongados de tiempo y que generan suelos con condiciones hídricas (HM) (Figura 2).

Dadas las condiciones de la zona, factores como el clima (cálido húmedo y seco), que favorece la mineralización de la materia orgánica, aumentan más la acumulación y el almacenamiento de carbono. Es importante destacar que los

mayores contenidos de carbono se encuentran en superficies donde hay aporte constante de residuos (biomasa).

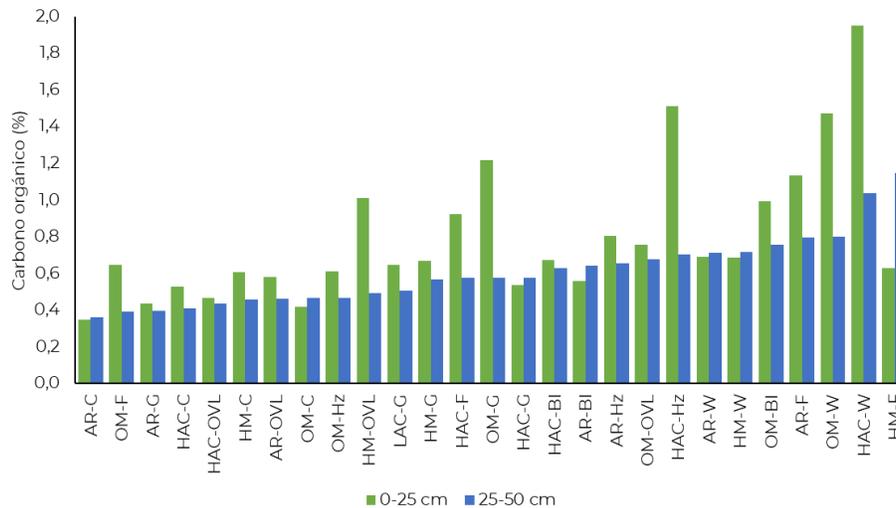


Figura 2. Contenido de carbono en los suelos (%) del Complejo Cenagoso de Zapatosa. Fuente: elaboración propia (2024).

Para determinar el contenido de materia orgánica del suelo (MOS) se toma como referente el contenido de carbono medido en laboratorio. Dado que la materia orgánica está compuesta al menos en un 58 % por carbono orgánico, se usa el factor de corrección igual a 1,724, tal como se presenta en la ecuación 28 de la propuesta de Protocolo para la estimación de contenidos de carbono y biodiversidad; por lo tanto, el comportamiento de los valores calculados sería exactamente el mismo descrito previamente por el Soil Survey Laboratory (SSL, 1996) para COS.

TEXTURA DE SUELOS

Si bien los resultados de textura ayudan a identificar posibles relaciones con la humedad, la porosidad y los contenidos de carbono del suelo, también están asociados con la clase de suelos. En este estudio, debido a la homologación, la textura se toma en cuenta para dar coherencia al proceso y establecer la clase de suelo más afín con las características propias de cada taxonomía.

ZM correspondientes a suelos de las clases Arenales (AR) con coberturas de pastos (G), cultivos (C), bosque inundable (BI) y forestal (F) muestran equivalencia con la clase de suelo definida, en la cual la textura fue la propiedad determinante. Se observa que algunos suelos clasificados como AR en el

proceso de homologación presentaron texturas con dominancia de arenas, excepto la zona AR-Hz, que tiene dominancia de arcilla en las dos profundidades evaluadas (Figuras 3 a y b).

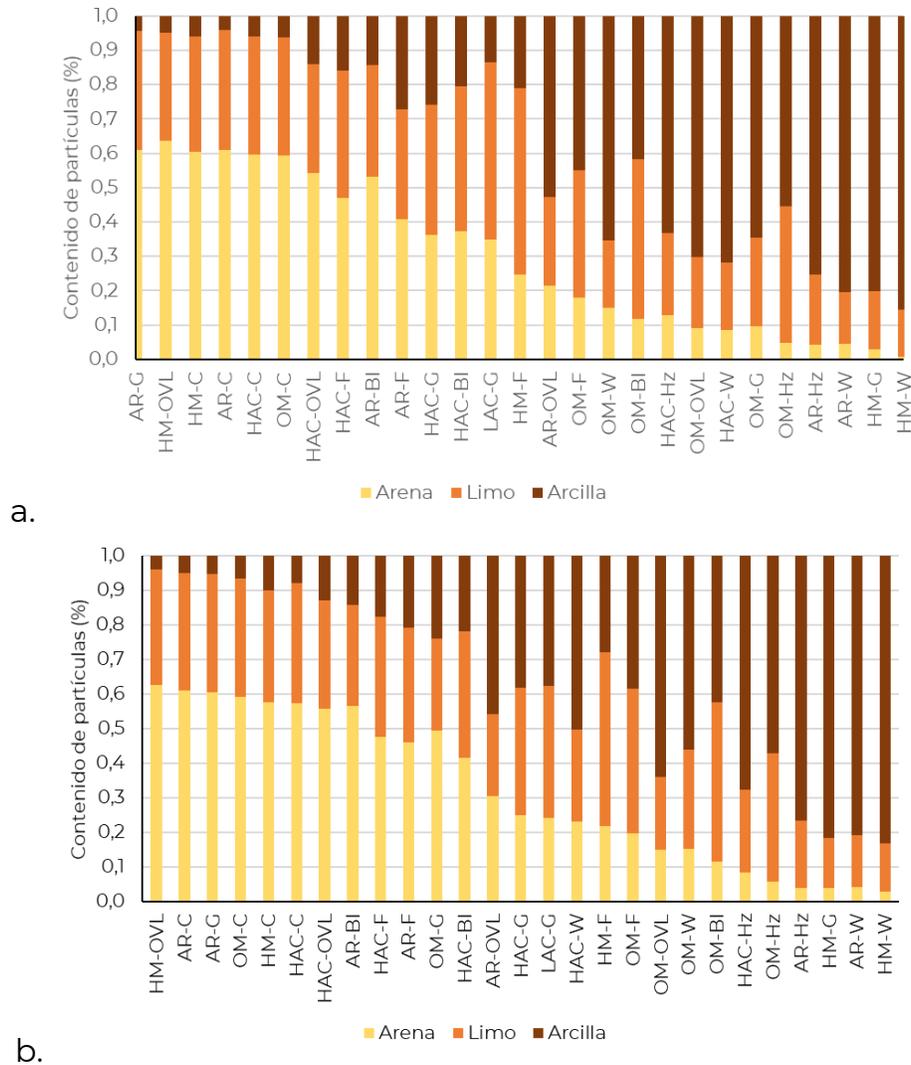


Figura 3. Textura de suelos de las zonas de muestreo del Complejo Cenagoso de Zapotosa a. Textura a profundidad de 0-25 cm. b. Textura a profundidad 25-50 cm. Fuente: elaboración propia (2024).

Los resultados muestran texturas similares con pequeñas variaciones para las dos profundidades medidas en las ZM. Se destacan texturas con mayor contenido de arcillas para los suelos de AR y suelos de HM con cobertura de vegetación acuática; debido a esta última condición, tienen un constante aporte de sedimentos que, para este caso, son muy finos. Sin embargo, estos suelos clasificados como AR no corresponden a la textura identificada en el

proceso de homologación; por tanto, la textura es una propiedad que aporta a la caracterización de los suelos, aunque para la homologación se requiere información más detallada de la zona.

ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LOS SUELOS DEL COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA

Para calcular el almacenamiento de COS del CCZ se tomaron en cuenta los resultados obtenidos de las variables de densidad aparente y contenido de carbono (%) mediante la metodología planteada para las profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm en la propuesta de Protocolo. El total de carbono almacenado en suelos a profundidad de 0-50 cm se establece a través de la sumatoria de los contenidos anteriores (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados del contenido de carbono almacenado en el suelo, RCOS (tC/ha), según las profundidades evaluadas en el Complejo Cenagoso de Zapatososa.

Zona de muestreo	0-25 cm	25-50 cm	TOTAL 0-50 cm
AR-BI	21,7	24,1	45,8
AR-C	16,7	17,7	34,4
AR-F	44,3	32,1	76,4
AR-G	22,5	21,8	44,3
AR-Hz	34,5	23,8	58,2
AR-OVL	19,4	20,2	39,6
AR-W	22,4	26,9	49,3
HAC-BI	37,1	19,4	56,5
HAC-C	24,1	19,8	43,9
HAC-F	33,1	23,7	56,9
HAC-G	22,2	26,7	48,9
HAC-Hz	38,5	20,2	58,8
HAC-OVL	20,2	21,9	42,1
HAC-W	59,5	32,6	92,1
HM-C	22,4	17,7	40,1
HM-F	63,4	47,1	110,5
HM-G	24,4	19,1	43,5
HM-OVL	30,8	19,1	49,9
HM-W	27,5	28,2	55,7
LAC-G	31,1	24,5	55,5
OM-BI	70,8	33,8	104,6
OM-C	20,2	22,3	42,5
OM-F	26,5	15,5	42,0
OM-G	44,4	45,0	89,4
OM-Hz	18,9	19,5	38,5
OM-OVL	20,0	26,5	46,5

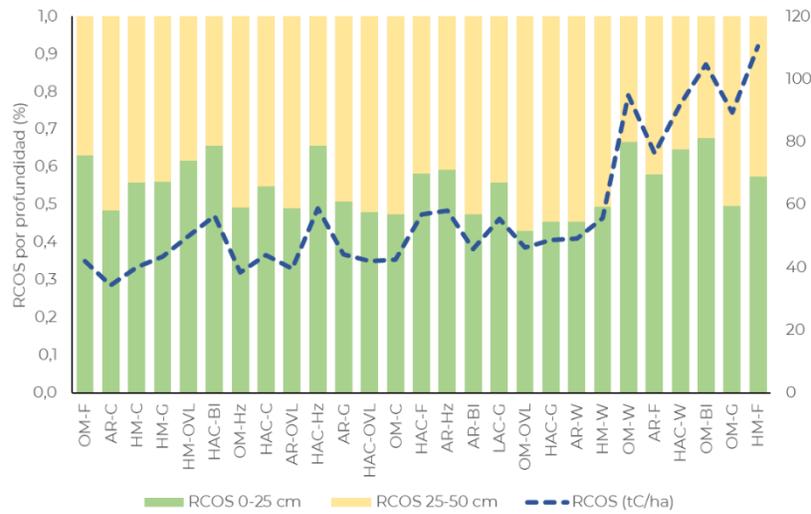
Zona de muestreo	0-25 cm	25-50 cm	TOTAL 0-50 cm
OM-W	63,1	31,7	94,8

Fuente: elaboración propia (2024).

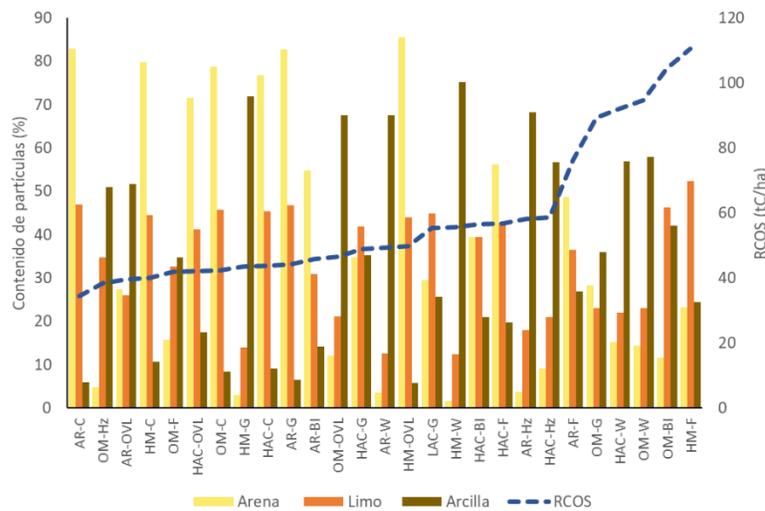
Se encontró que el carbono almacenado en los suelos es similar en las dos profundidades evaluadas (Figura 4a): a una profundidad de 0 a 25 cm, los menores contenidos de carbono se encuentran en las zonas de monitoreo AR-C, OM-Hz y AR-OVL, con 16,7; 17,7 y 19,4 tC/ha respectivamente. Con base en estos resultados se puede asociar la textura arenosa con el bajo contenido de carbono, ya que estas partículas tienen poca superficie específica y, con ello, poca absorción de nutrientes, agua y materia orgánica.

En esta profundidad superficial se destacan las zonas de muestreo HAC-W, OM-W, HM-F y OM-BI, con los mayores contenidos de carbono almacenado, con valores de 59,5, 63,1, 63,4 y 70,8 respectivamente. En estas zonas también la textura muestra una significativa participación en la absorción del carbono, ya que suelos con arcillas de alta actividad (HAC) tiene mayor interacción y capacidad de intercambio con elementos químicos presentes en el suelo. Por otro lado, la cobertura forestal y arbórea (F y BI) es determinante, pues no solo aporta la materia orgánica para ser almacenada en forma de carbono, sino que genera hábitats adecuados para que los organismos que viven en el suelo hagan la transformación requerida en este caso. En cuanto a coberturas de vegetación acuática, es evidente que el aporte constante de sedimentos es la característica determinante para favorecer el almacenamiento de carbono, incluso en suelos poco evolucionados o con baja capacidad de transformación como Otros suelos Minerales (OM) (Figura 4b).

Para el contenido de carbono almacenado a una profundidad de 25 a 50 cm se destaca la zona OM-F, que presenta el menor valor obtenido, 15,5 tC/ha, así como suelos con coberturas de cultivos como AR-C y HAM-C, con 17,7 tC/ha. En este último resultado el bajo contenido de carbono almacenado se asocia con el cambio de uso que se dio a cultivos (C), condición que pudo generar degradación del suelo por pérdida de capacidad de almacenamiento de nutrientes. Para la cobertura forestal (F), este bajo resultado se relaciona con el tipo de suelo más que con la cobertura. En cuanto a los mayores valores de almacenamiento de carbono en suelos a una profundidad de 25 a 50 cm se destaca la zona OM-G, con 45,0 tC/ha, valor asociado con la ubicación de la ZM, que se encontraba inundada al momento de la toma de muestras, lo que indica un aporte de carbono proveniente de material orgánico de sedimentos.



a.



b.

Figura 4. Contenido de carbono almacenado en suelos, RCOS (TC/ha), del Complejo Cenagoso de Zapatosa. a. Comparación de profundidades. b. Comparación con la textura del suelo. Fuente: elaboración propia (2024).

El carbono total almacenado en los suelos (COS) hasta 50 cm de profundidad varía de 34 a 110 tC/ha, cantidad muy significativa dadas las condiciones de inundaciones frecuentes, la alta mineralización de la materia orgánica debida al clima cálido, y la profundidad superficial de los suelos que dominan en la zona (Tabla 2).

Con los valores medios obtenidos se realizó el mapa de contenidos de COS del CCZ (Figura 5), en el que se evidencia que, a pesar de tener valores bajos, este contenido de carbono constituye una gran oportunidad de generar estrategias

de conservación para la zona y, si es el caso, buscar alternativas que promuevan la captura de carbono por los suelos.

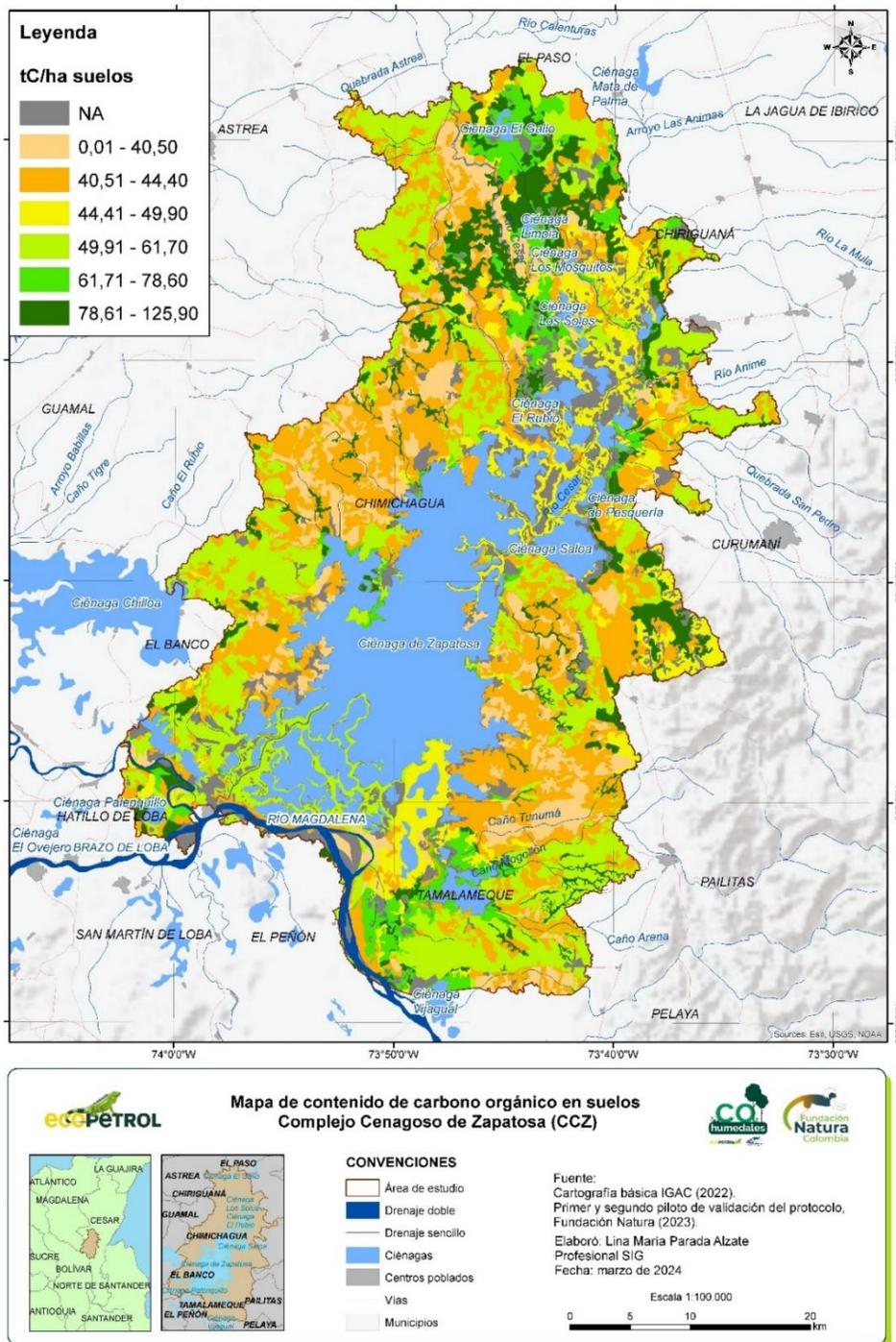


Figura 5. Contenido de carbono almacenado en suelos a 50 cm de profundidad en toneladas por hectárea (tC/ha) para el Complejo Cenagoso de Zapatos. Fuente: elaboración propia (2024).

FRACCIONAMIENTO DE HUMUS EN SUELOS

La MOS es un componente clave debido a las interacciones fisicoquímicas y biológicas que genera; está integrada por sustancias producto de la descomposición de residuos vegetales y animales (incluidos restos de microorganismos), transformados por procesos de mineralización, humificación y biosíntesis. La MOS se compone de una fracción de materiales similares al original (poco descompuesta) y una fracción húmica (humus) fuertemente transformada, que comprende hasta el 90 % del carbono total almacenado en el suelo que constituye el carbono almacenado. El humus, a su vez, se agrupa en Ácidos Fúlvicos (AF), Ácidos Húmicos (AH) y Huminas (H) (Jaramillo, 2011).

En este estudio, como un aporte complementario al estudio de suelos y del almacenamiento de carbono, a las muestras tomadas se les realizó el fraccionamiento de humus para establecer la cantidad de carbono almacenado en estos complejos químicos, ya que constituyen el carbono más fuertemente retenido en las partículas del suelo y, por tanto, requiere fuertes procesos de degradación para volver a ser emitido.

De los compuestos húmicos los AF son los más jóvenes, móviles y volátiles, mientras que los AH son más evolucionados y estables. De acuerdo con los resultados del fraccionamiento de humus para los suelos analizados, se observa que el COS está asociado con AF (Figura 6), lo cual indica que en el CCZ los suelos son jóvenes y el almacenamiento de carbono puede revertirse fácilmente si se dan procesos de intervención y cambio de uso.

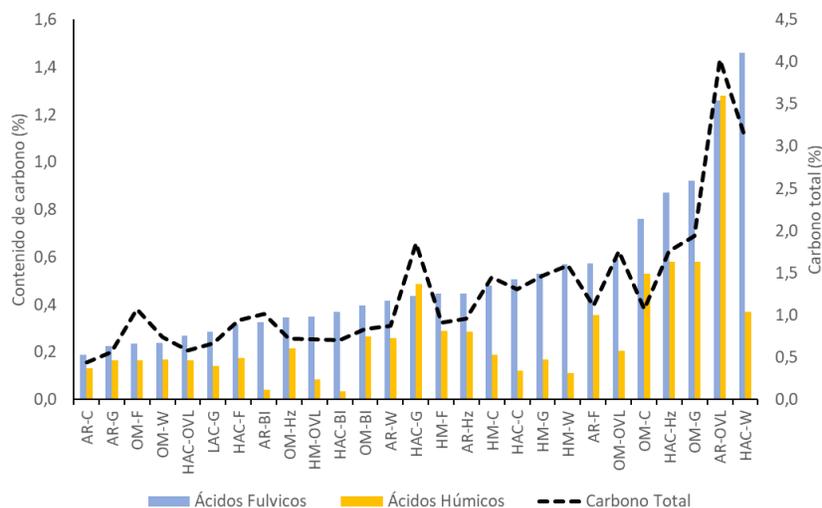


Figura 6. Contenido de carbono en las fracciones de la materia orgánica, Ácidos húmicos (AH) y Ácidos Fúlvicos (AF), comparados con el contenido de carbono total de los suelos del Complejo Cenagoso de Zapatosa . Fuente: elaboración propia (2024).

RESULTADOS DE ANÁLISIS REALIZADOS EN SEDIMENTOS

Con el fin de establecer el aporte de materia orgánica de las partículas y los sedimentos que son arrastrados y depositados por el cuerpo de agua, se realizó la caracterización de sedimentos en 7 zonas de muestreo (Tabla 3), donde se realizaron análisis de contenido de carbono, textura y fraccionamiento de humus.

Puesto que los sedimentos están permanentemente cubiertos por el cuerpo de agua bajo condiciones anaeróbicas, no se pueden formar suelos. Por tanto, no aplica la medición de propiedades específicas de este componente, como la densidad aparente, y solo se determinan los datos de contenido de carbono (%). En este estudio, los resultados obtenidos para contenido de carbono en sedimentos (%) y fraccionamiento de humus indican que estos materiales son arrastrados desde aguas arriba debido a la presencia de sustancias húmicas.

Los resultados también revelan que el contenido de carbono orgánico en sedimentos es bajo, similar a los valores obtenidos en suelos, lo que señala que el aporte de carbono arrastrado por agua y depositado en zonas ribereñas no es significativo. Se evidencia un mayor valor de carbono total para sedimentos, con 2,8 % (valor promedio), y de 1,2 % para los suelos; sin embargo, este valor no implica alta actividad orgánica en el cuerpo de agua (Tabla 3).

Se constata la presencia de AH y de AF en sedimentos, que bajo condiciones anaeróbicas y cobertura permanente de agua no pueden llegar a generarse; esto indica que hay erosión de suelos aguas arriba, arrastre correspondiente a la dinámica del agua, que trae estos materiales hasta el CCZ y sigue hasta aguas bajas.

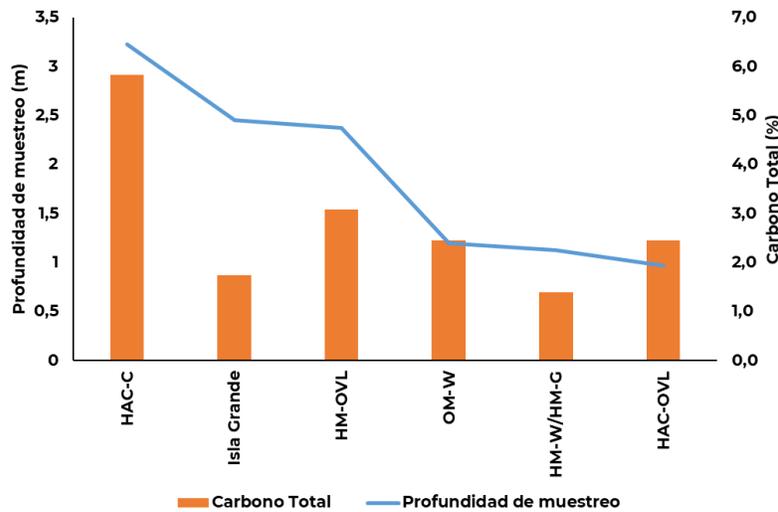
Tabla 3. Zonas de muestreo para sedimentos en el Complejo Cenagoso de Zapatosa. A: A(arena (%); L: limo (%); Ar: arcillas (%); CO: contenido de carbono orgánico (%); CT: carbono total (%); CNE: carbono no extraíble (%); CE: carbono extraíble (%); AF: ácidos fúlvicos; AH: ácidos húmicos.

Zona de muestreo	Profundidad de muestreo	A	L	Ar	CO	CT	CNE	CE	AF	AH
HAC-C	3,23	38,60	39,17	22,23	0,35	5,83	5,02	0,80	0,65	0,15

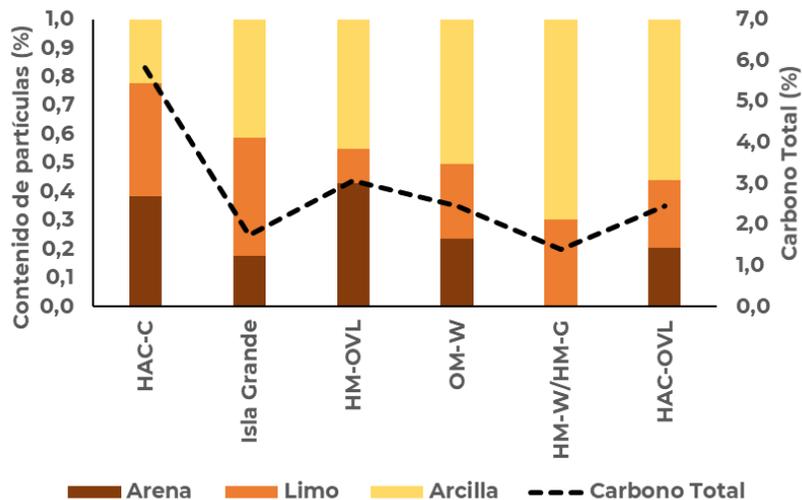
Zona de muestreo	Profundidad de muestreo	A	L	Ar	CO	CT	CNE	CE	AF	AH
HAC-OVL	0,97	20,67	23,50	55,83	2,30	2,45	0,07	2,37	1,42	0,94
HM-OVL	2,38	42,90	11,93	45,17	0,28	3,08	2,41	0,63	0,34	0,29
HM-W/HM-G	1,13	0,47	29,83	69,70	0,27	1,40	1,22	0,18	0,12	0,07
Isla Grande	2,46	17,75	41,18	41,07	1,14	1,74	0,69	1,04	0,62	0,41
OM-W	1,20	23,67	26,17	50,17	2,13	2,46	0,19	2,26	1,34	0,90
Total general	1,97	23,11	30,42	46,46	1,09	2,67	1,47	1,19	0,73	0,45

Fuente: elaboración propia (2024).

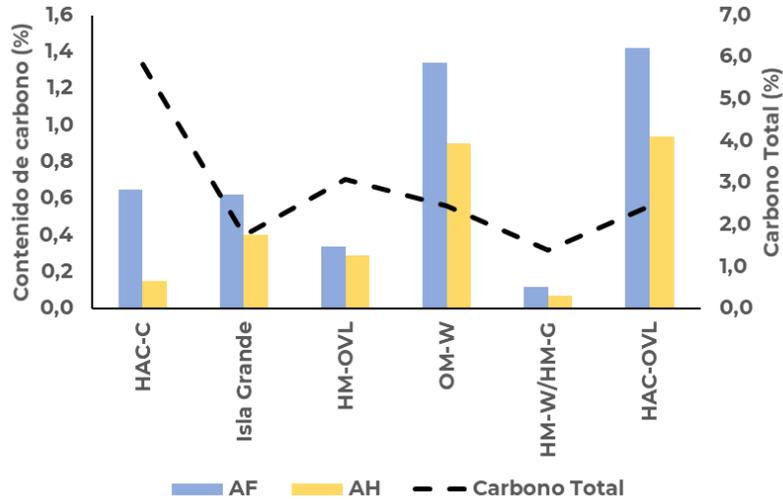
Los resultados muestran que no hay relación entre el contenido de carbono total y la profundidad del muestreo, ni con la textura donde dominan las arenas ni con las sustancias húmicas, que son mayormente ácidos fúlvicos (Figura 7b).



a.



b.



C.

Figura 7. Contenido de carbono en sedimentos (%) del Complejo Cenagoso de Zapatos. a. Comparación con la profundidad de muestreo. b. Comparación con la textura. c. Resultados de fraccionamiento de humus. Fuente: elaboración propia (2024).

CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL (BIOMASA-SUELOS)

Al comparar los contenidos de carbono almacenados tanto en suelos como en biomasa (Figura 8) se observa que no hay una relación directa entre ellos (Figura 9). Esto se debe a que el almacenamiento de carbono en suelos es determinado por procesos evolutivos de largo plazo, mientras que el almacenamiento en vegetación es más dinámico, lo que hace que este último compartimiento sea clave para la regulación del ciclo de carbono y sus implicaciones en la mitigación de cambio climático por la captura de carbono atmosférico a corto y mediano plazo.

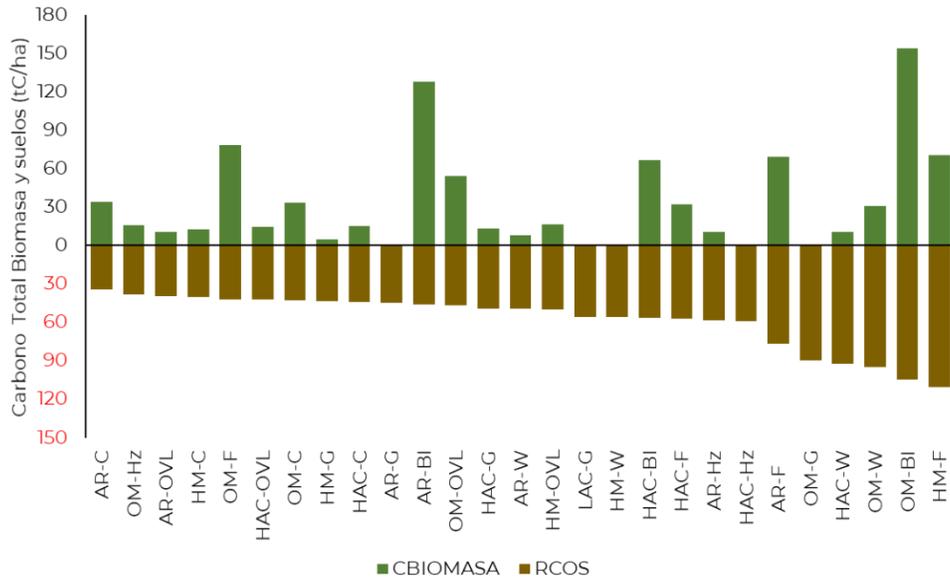


Figura 8. Carbono total (tC/ha) almacenado en biomasa (CBIOMASA) y en suelos (RCOS) del Complejo Cenagoso de Zapatosá. Fuente: elaboración propia (2024).

Para establecer el total de contenido de carbono almacenado en estos compartimientos se realizó la sumatoria de los totales para cada una de las ZM; allí se observa una variación significativa en los resultados, que muestran una heterogeneidad tanto en suelos como en los componentes de biomasa del CCZ (Figura 9), lo que hace que estos datos sean cruciales para la gestión sostenible del recurso.

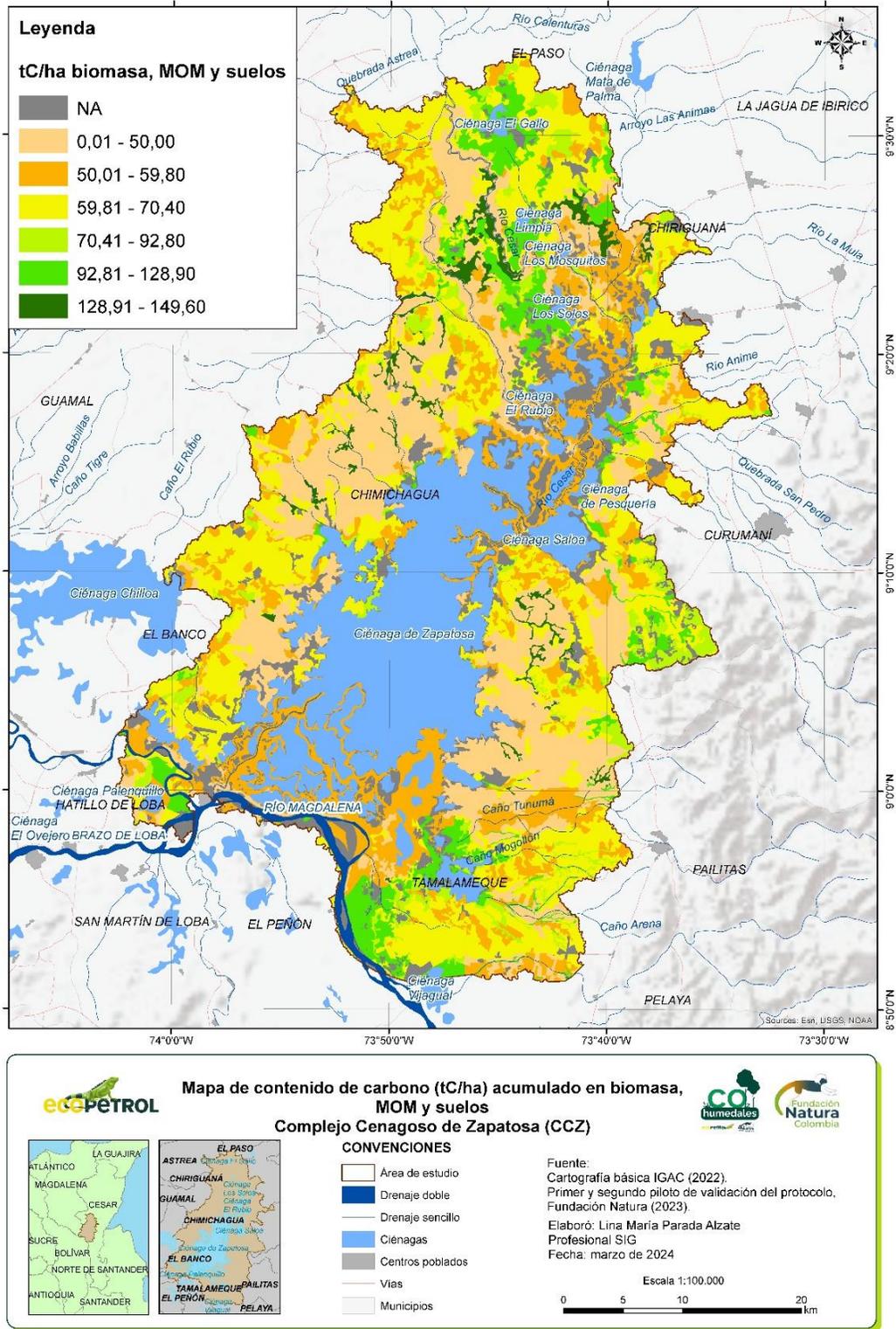


Figura 9. Contenido de carbono total almacenado en biomasa y suelos, en toneladas por hectárea (tC/ha), en el Complejo Cenagoso de Zapato. Fuente: elaboración propia (2024).

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

Una vez determinado el contenido de carbono en los compartimientos de biomasa y suelos, los resultados se combinaron para lograr la estimación del rango de incertidumbre de manera conjunta. Este proceso se logró mediante el método de propagación de error (IPCC, 2006; Kempen et al., 2012).

El valor de incertidumbre se obtuvo en porcentaje (Tabla 4), con una gran diversidad de resultados para las combinaciones de tipo de suelo y uso de suelo evaluados. Se espera que este valor pueda disminuir en la medida en que se realicen nuevos monitoreos, de acuerdo con la periodicidad sugerida. Los valores más altos de incertidumbre se reportan en zonas con suelos Arenales con cobertura Forestal (AR-F), suelos de Humedal con cobertura Forestal (HM-F) y Arcillas de Alta Actividad con cobertura de Cultivos (HAC-C), en contraste con los valores más bajos en zonas de suelos de Humedal con cobertura de Pastos (HM-G), y suelos de Arenales con cobertura de Otra Vegetación Leñosa (AR-OVL).

Tabla 4. Estimación de la incertidumbre (%) para los compartimientos de biomasa y suelos.

Zona de Muestreo	Nombre de la zona de muestreo	Incertidumbre
AR-C	Arenales con cobertura de Cultivos	68±69 %
AR-F	Arenales con cobertura Forestal	150±54 %
AR-G	Arenales con cobertura de Pastos	45±151 %
AR-Hz	Arenales con cobertura de Herbazales	69±92 %
AR-OVL	Arenales con cobertura de Otra Vegetación Leñosa	50±94 %
AR-W	Arenales con cobertura de vegetación Acuática	56±72 %
HAC-C	Arcillas de Alta Actividad con cobertura de Cultivos	59±122 %
HAC-F	Arcillas de Alta Actividad con cobertura de Cultivos	89±52 %
HAC-G	Arcillas de Alta Actividad con cobertura de Pastos	70±41 %
HAC-Hz	Arcillas de Alta Actividad con cobertura de Herbazales	60±135 %
HAC-OVL	Arcillas de Alta Actividad con cobertura de Otra Vegetación Leñosa	58±91 %
HAC-W	Arcillas de Alta Actividad con cobertura de vegetación Acuática	79±111 %
HM-C	Suelos de Humedal con cobertura de Cultivos	53±120 %
HM-F	Suelos de Humedal con cobertura Forestal	125±61 %
HM-G	Suelos de Humedal con cobertura de Pastos	48±85 %

Zona de Muestreo	Nombre de la zona de muestreo	Incertidumbre
HM-OVL	Suelos de Humedal con cobertura de Otra Vegetación Leñosa	66±79 %
HM-W	Suelos de Humedal con cobertura de vegetación Acuática	57±103 %
LAC-G	Arcillas de Baja Actividad con cobertura de Pastos	63±64 %
OM-C	Otros Suelos Minerales con cobertura de Cultivos	77±82 %
OM-F	Otros Suelos Minerales con cobertura Forestal	141±54 %
OM-G	Otros Suelos Minerales con cobertura de Pastos	114±71 %
OM-Hz	Otros Suelos Minerales con cobertura de Herbazales	55±75 %
OM-OVL	Otros Suelos Minerales con cobertura de Otra Vegetación Leñosa	100±55 %
OM-W	Otros Suelos Minerales con cobertura de vegetación Acuática	110±72 %

Fuente: elaboración propia (2024)

CONCLUSIONES

El estudio realizado en el marco de la propuesta de *Protocolo de estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo* ha arrojado resultados significativos que contribuyen al entendimiento de la dinámica del carbono en la región y a la formulación de estrategias de manejo sostenible de los ecosistemas. Para empezar, se han caracterizado los compartimientos relevantes para la captura y el almacenamiento de carbono, como son biomasa, MOM, suelos y sedimentos.

Se observó una variabilidad significativa en los contenidos de carbono orgánico en los suelos y sedimentos del CCZ con valores que van desde 0,3 % hasta 2,0 %. Esta variabilidad está influenciada por factores como la cobertura vegetal, la textura del suelo y la profundidad de muestreo, entre otros, en cinco clases de suelos según la taxonomía del IPCC.

En total, se identificaron reservas de carbono entre 20 y 110 tC/ha. Estos valores señalan la importancia de conservar los humedales para maximizar su capacidad de captura y almacenamiento de carbono.

El análisis de la densidad aparente y el fraccionamiento de humus reveló la relevancia de estos parámetros en la determinación del contenido de carbono

en los suelos. Se observó que la cobertura vegetal y la textura del suelo juegan un papel crucial en la acumulación de carbono orgánico, especialmente en suelos con cobertura forestal y humedales, donde están los mayores contenidos de carbono. Este hecho resalta la importancia de conservar estos ecosistemas para la mitigación del cambio climático.

El análisis de incertidumbre permite evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos. Si bien se reconoce la existencia de ciertos errores asociados al proceso de muestreo y de análisis, se considera que los resultados presentados en este estudio son robustos y proporcionan una base sólida para la toma de decisiones en materia de conservación y manejo de los humedales del Magdalena Medio y Bajo.

Al comparar los resultados anteriores con los obtenidos en otros estudios, realizados en diversas zonas y con características geográficas similares a las presentadas en el CCZ, se evidencia que el clima es un factor determinante para la acumulación de carbono en suelos. Además, como la vegetación es la principal fuente de carbono, las temperaturas altas, como las que presenta la zona, favorecen la actividad microbiana que conlleva la descomposición de estos materiales orgánicos, pues dicha actividad prima en el proceso de acumulación de carbono. Comparando los resultados obtenidos con otras regiones del país como el estudio realizado en humedales andinos de la cuenca alta del río Barbas en Quindío (Roa- García, 2016), ubicado en zona montañosa con temperatura de 18 °C, se puede observar que se presentan valores considerablemente altos (> 200 t/ha), lo que ratifica lo anterior, pues en este último caso prima el proceso de acumulación de materia orgánica sobre el proceso de descomposición.

Los resultados de este estudio ofrecen una visión integral de la dinámica del carbono en los humedales del Magdalena Medio y Bajo, que constituye información valiosa para las autoridades ambientales, los tomadores de decisiones y la comunidad en general, para promover la conservación y el uso sostenible de los humedales de la región. Esto, a su vez, contribuye a la mitigación del cambio climático y al desarrollo sostenible de estos ecosistemas estratégicos para el país.

RECOMENDACIONES, AJUSTES METODOLÓGICOS Y LIMITACIONES DE LA IMPLEMENTACIÓN

Con el fin de mejorar tanto el proceso como la confiabilidad de los resultados obtenidos, se recomienda tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- ✦ El proceso de homologación de suelos requiere mayor detalle para su realización; si bien la taxonomía USDA es suficientemente detallada, la descripción de las clases de suelos de IPCC requiere mayor caracterización para establecer las equivalencias adecuadamente.
- ✦ La verificación de las zonas de muestreo es un aliado que facilita la llegada a los predios seleccionados y la toma de muestras correspondiente; es recomendable hacer una descripción previa de la zona para ajustar la equivalencia de suelos al realizar su homologación.
- ✦ Dada la variabilidad de suelos para un área tan extensa como la del presente estudio, se recomienda buscar estudios detallados para una mejor caracterización; de no contar con esta información, lo recomendable es realizar mayor número de repeticiones dentro de las zonas de muestreo.
- ✦ Para el levantamiento de información de suelos se requieren análisis específicos, como la densidad aparente, que es un insumo indispensable para determinar el contenido de carbono almacenado en suelos. Por esta razón, es necesario contar en el equipo con un profesional calificado tanto para la toma de muestras como para los cálculos requeridos. En este mismo sentido, aunque existen ecuaciones e información secundaria para completar la información faltante en algún periodo de medición, ya sea porque la zona estaba inundada o el suelo presentaba limitaciones en superficie, las repeticiones complementan esa información de una forma más confiable.
- ✦ Para la toma de muestras de sedimentos se sugiere hacer un levantamiento igualmente detallado que incluya características geomorfológicas propias de la zona de muestreo, como las entradas o salidas de caños o ríos, la ciénaga propiamente dicha, el agua corriente, el agua estacada, etc., lo que permite establecer la dinámica hídrica de los sedimentos arrastrados por el cuerpo de agua y, con ello, el tipo de aporte que estos hacen a los suelos ribereños.

BIBLIOGRAFÍA

- Andramunio-Acero, C., Rondón-Martínez, Y., García-Murcia, Y., Mendoza, Y., López-Muñoz, M., Parada, L., Salgado, J., Moreno-Pérez, L., Téllez, P. y Pérez, S. (2024). Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*. Fundación Natura Colombia, Ecopetrol S. A.
- Burt, R. (Ed.) (2004). *Soil survey Laboratory Methods Manual*. Natural Resources Conservation Service.
- Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. y Tanabe, K. (Eds). (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2011) Caracterización de la materia orgánica del horizonte superficial de un andisol hidromórfico del oriente antioqueño (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35(134), 23-33. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.35\(134\).2011.2484](https://doi.org/10.18257/raccefyn.35(134).2011.2484)
- Kempen, B., Brus, D. J., Stoorvogel, J. J., Heuvelink, G. B. M. y De Vries, F. (2012). Efficiency comparison of conventional and digital soil mapping for updating soil maps. *Soil Science Society of American Journal*, 76(6), 2097-2115. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0424>
- Roa-García, M. C. y Brown, S. (2016). Caracterización de la acumulación de carbono en pequeños humedales andinos en la cuenca alta del río Barbas (Quindío, Colombia). *Caldasia*, 38(1), 117-135. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v38n1.57833>
- Vasilas, L. M., Hurt, G. W. y Noble, C. V. (2010). *Field Indicators of Hydric Soils in the United States*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/Delete/2014-11-1/Field.Indicators.Hydric.Soil_v7.pdf
- U. S. Department of Agriculture. (2017). *Keys to soil taxonomy* (12.^a ed). Natural Resources Conservation Service.