

ESTUDIO DASOMÉTRICO Y ESTIMACIÓN DE RESERVAS DE CARBONO EN AGROBOSQUES DE CACAO, COLOMBIA^a

DASOMETRIC STUDY AND ESTIMATION OF CARBON RESERVES IN COCOA AGROFOREST, COLOMBIA

KAREN NIETO^{b*}, JHON Maldonado^b, LAURA SANABRIA^b

Recibido 29-01-2025, aceptado 12-05-2025, versión final 15-12-2025.

Artículo Investigación

RESUMEN En los últimos años, la creciente preocupación mundial por el calentamiento global ha puesto en el centro del debate la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en particular el dióxido de carbono (CO_2), principal responsable del efecto invernadero antropogénico por su volumen y capacidad de retener calor en la atmósfera. En este contexto, este estudio cuantifica el potencial de captura de carbono de sistemas agroforestales de cacao en diez departamentos de Colombia. Se estimaron las reservas de carbono aéreo y subterráneo a partir de 20000 registros dasométricos aproximadamente medidos en 297 parcelas circulares de $1000\ m^2$, aplicando ecuaciones alométricas específicas y convirtiendo la biomasa a CO_2e . Posteriormente, se realizó un análisis comparativo entre departamentos y años de siembra, y se proyectaron remociones en 1630 ha a 15 años bajo dos densidades de plantación (646 y 900 árboles/ha), ajustando un modelo de regresión del DAP en función de la edad y contrastando los resultados con la herramienta Carbon Benefits Project. Donde las remociones de CO_2e aumentan con la edad del cultivo hasta estabilizarse alrededor del año 13. Antioquia, Cesar, Huila y Santander superan las 10 t CO_2e/ha hacia el sexto año, evidenciando el potencial de los cacaotales agroforestales para estrategias de mitigación y proyectos de carbono en el país.

PALABRAS CLAVES: Bosques; cambio climático; efecto invernadero; cacao; mitigación.

ABSTRACT: In recent years, growing global concern about global warming has placed at the center of the debate the need to reduce greenhouse gas emissions, particularly carbon dioxide (CO_2), the main driver of anthropogenic greenhouse effects due to its high emissions volume and its capacity to retain heat in the atmosphere. In this context, this study quantifies the carbon sequestration potential of cocoa agroforestry systems in ten departments of Colombia. Above- and belowground carbon stocks were estimated from approximately 20000 dendrometric records measured in 297 circular plots of $1000\ m^2$, applying species-specific allometric equations and converting biomass to CO_2e . Subsequently, a comparative analysis was conducted across departments and planting years, and CO_2e removals were projected over 1630 ha for a 15-year period under two planting densities (646 and 900 trees/ha), fitting a regression model of diameter at breast height (DBH) as a function of stand age and contrasting the results with the Carbon Benefits Project tool. CO_2e removals increase with plantation age until stabilizing around year 13. Antioquia, Cesar, Huila, and Santander exceed 10 t CO_2e/ha by approximately the sixth year, highlighting the potential of cocoa

^aNieto, K., Maldonado, J. & Sanabria, L. (2026). Estudio dasométrico y estimación de reservas de carbono en agrobosques de cacao, Colombia. *Rev. Fac. Cienc.*, 15 (1), 27–49. DOI: <https://10.15446/rev.fac.cienc.v15n1.117061>

^bFundación Catarubén, proceso de innovación y productividad

* Autor correspondencia: cultura-innovadora@cataruben.org

agroforestry systems to support climate change mitigation strategies and carbon projects in the country.

KEYWORDS: Forests; climate change; greenhouse effect; cocoa; mitigation.

1. INTRODUCCIÓN

En el debate público contemporáneo, el cambio climático se ha consolidado como uno de los temas ambientales más recurrentes y como uno de los principales desafíos globales; su comprensión y las alternativas para abordarlo han motivado múltiples discusiones y propuestas desde diversos campos del conocimiento (Arias-Ortega & Rosales-Romero, 2019).

El cambio climático es un fenómeno global y creciente, que genera impactos negativos socioeconómicos y afecta la salud pública, la disponibilidad del recurso hídrico y la productividad agroindustrial (Arteaga & Burbano, 2018). El principal responsable del cambio climático es la creciente emisión de gases de efecto invernadero (GEI), i.e. dióxido de carbono - CO_2 -, metano CH_4 - y óxido nitroso - N_2O - (López-Guerrero *et al.*, 2018; Kuosmanen *et al.*, 2020).

Los GEI, resultado de acciones antropogénicas, han causado un desequilibrio en el planeta, alterando de diversas formas el balance de radiación del sistema superficie-atmósfera (Buitrago *et al.*, 2018; Olorunfemi *et al.*, 2019). Dentro de los causantes del incremento de las emisiones de GEI, se encuentra el cambio de uso de la tierra.

A pesar de este panorama, la concentración de GEI en la atmósfera puede reducirse a través de la reducción de emisiones de CO_2 y la creación e incremento de sumideros de carbono (IPCC, 2019). Varios estudios han demostrado que los bosques tropicales contribuyen a regular la concentración de CO_2 en la atmósfera (Yepes *et al.*, 2015; Hurtado *et al.*, 2017; Segura *et al.*, 2019), a través de la fijación en su biomasa y en el suelo (Paipa & Triana, 2018; Segura *et al.*, 2020). Por esta razón, muchos países tropicales aspiran a proteger los bosques para cumplir los objetivos de las políticas de mitigación de la biodiversidad y el clima (Sullivan *et al.*, 2017), tal como los proyectos REDD+ (Nielsen, 2016).

Los sistemas agroforestales (SAF) también pueden contribuir a la mitigación del cambio climático mediante el secuestro y almacenamiento de carbono (Albrecht & Kandji, 2003; Andrade & Ibrahim, 2003; Andrade *et al.*, 2008a; Soto-Pinto *et al.*, 2010). Según Villa *et al.* (2020) los SAF son los sistemas alimentarios sostenibles más importantes del mundo, y permiten la integración de árboles y otros cultivos. Esta diversificación de la producción permite obtener mayores beneficios sociales, económicos y ambientales (Asase & Tet-tah, 2015). Entre los principales beneficios que prestan los SAF se incluyen la recuperación, conservación y mejora de la biodiversidad, el aumento de las reservas de carbono, la fijación biológica de nitrógeno y el ciclaje de nutrientes, la disminución de la erosión y el mantenimiento de la fertilidad del suelo (Villa *et al.*,

al., 2020). En consecuencia, los SAF son soluciones potenciales para los esfuerzos que articulan la conservación de la biodiversidad y el incremento de la productividad agrícola (Wartenberget *et al.*, 2017).

En Colombia, entre las principales actividades agropecuarias se encuentran la ganadería, la caficultura y la cacaocultura (Baena, 2019; Gutiérrez *et al.*, 2020), las dos últimas se realizan en un 40 y 90 % en SAF, respectivamente (Espinosa , 2016; Zapata, 2019). Por lo tanto, la estimación de la capacidad de almacenamiento de carbono se constituye en una labor fundamental que permite generar estrategias de conservación y uso sostenible de los bosques y las unidades agrícolas (Andrade & Ibrahim, 2003; Andrade *et al.*, 2016; Hurtado *et al.*, 2017).

El presente estudio tiene como objetivo estimar la reserva de carbono en sistemas agroforestales con cacao (SAF) en diez departamentos de Colombia, a partir de una rigurosa recopilación de datos dasométricos y análisis de muestras de cacao. Esta investigación busca cuantificar la capacidad de captura de carbono de estos sistemas y su contribución a la mitigación del cambio climático, proporcionando una visión detallada de las remociones de CO_2 equivalente (CO_{2e}) y sus variaciones espaciales y temporales. Los resultados permitirán comprender mejor el papel ambiental de los SAF de cacao y orientar estrategias para su conservación y escalamiento en el país.

2. OBJETIVO

Estimar las reservas de carbono y el potencial de remoción de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) en sistemas agroforestales (SAF) de cacao en diez departamentos de Colombia, a través de un estudio dasométrico y modelos de proyección de crecimiento.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en diez departamentos de Colombia, contemplando tres zonas bioclimáticas distintas, bosque seco tropical, bosque húmedo tropical y bosque semiárido tropical, ubicados entre los 3° y 11° N, y entre los 73° y 75° O, distribuidos en los departamentos de Antioquia, Bolívar, Caldas, Cesar, Córdoba, Huila, La Guajira, Magdalena, Santander y Tolima (Figura 1), localizados en altitudes que varían en promedio desde los 5 a los 2000 m.s.n.m, con temperaturas que oscilan entre los 22°C y los 30°C.

La delimitación de la muestra de estudio se fundamentó inicialmente en una base de datos de 5455 productores cacaoteros, de las cuales se eligieron a 2829 para realizar visitas de caracterización. De éstas, se determinó que 2.125 productores se identificaron como propietarios durante la visita de campo, de las cuales 661 productores especificaron tener plantaciones de cacao con menos de 5 años, distribuidas en un total de

1630 hectáreas de cacao.

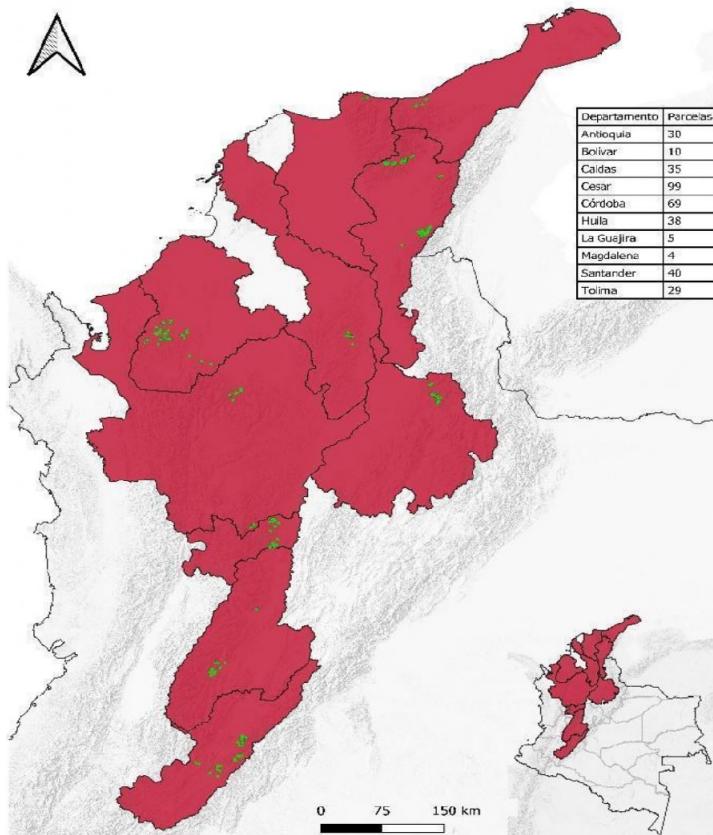


Figura 1: Mapa del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Establecimiento de parcelas

Se establecieron 297 parcelas de muestreo, distribuidas de manera aleatoria en áreas de cultivos de cacao con diferentes años de siembra y localización. Se establecieron parcelas circulares de $1000m^2$ ($r = 17.85m$) (Figura 2).

3.3. Cálculo de contenidos de carbono en biomasa total

Para la estimación de la biomasa aérea en árboles de cacao se utilizó la ecuación alométrica planteada por (Andrade *et al.*, 2008a) para especies forestales con DAP mayor a 5 cm se emplearon las ecuaciones planteadas por Chave *et al.* (2014).

La estimación del contenido de carbono se llevó a cabo de manera inicial con el cálculo de la biomasa, haciendo uso de la ecuación alométrica formulada por Andrade *et al.* (2008a) y usada extensamente en

Tabla 1: Ecuaciones alométricas utilizadas en el estudio. BA = Biomasa aérea (kg); BS = Biomasa subterránea (t/ha); B = Biomasa aérea (t/ha); LOG = Logaritmo en base 10; $vDAP$ = Diámetro del tronco a la altura del pecho (130 cm) (cm); D_{30} = diámetro del tronco a 30 cm (cm); At = Altura total (m); ρ = densidad de la madera (g/cm³).

Especie	Modelo	Fuente
Cacao (<i>Theobroma cacao</i>)	$BA = 10^{-1.625+2.63 \log(D_{30})}$	Andrade <i>et al.</i> (2008a)
Árboles frutales (Modelos multiespecies)	$BA = 10^{-1.12+2.62 \log(DAP)+0.03 \log(At)}$	Andrade <i>et al.</i> (2008b)
Árboles asociados al SAF ($DAP \geq 5$ cm)	$BA = 0.0673(\rho DAP^2 At)^{0.976}$	Chave <i>et al.</i> (2014)
Árboles asociados al SAF ($DAP < 5$ cm)	$BA = 10^{-1.27+2.20 \log(DAP)}$	Andrade <i>et al.</i> (2008b)
Musacea	1.5 kg/m At	Somarriba <i>et al.</i> (2013)
Biomasa subterránea	$BS = \exp(1 - 0.0850 + 0.9256 \ln(B))$	Cairns <i>et al.</i> (1997)

investigaciones alineadas a la misma estimación a partir del DAP :

$$BA = 10^{-1.625+2.63 \log(DAP)} \quad (1)$$

Por otro lado, para la evaluación de la biomasa subterránea, se aplicó la ecuación propuesta por Cairns *et al.* (1997), ya que utiliza la Biomasa Aérea como variable dependiente:

$$BS = \exp(-1.0850 + 0.9256 \ln(B)) \quad (2)$$

Tomando como guía al HIPCC (2019) para efectuar conversiones y uso de factores importantes para el hallazgo de variables, una vez se cuantifica la biomasa se efectúa la transformación a carbono asumiendo que el carbono constituye el 47 % de la biomasa seca del árbol. Posteriormente, este último valor se convierte de carbono a dióxido de carbono equivalente (CO_2e) usando el factor de conversión de 3.67; este factor deriva de la relación molar 44/12 utilizada para convertir existencias de Carbono (C) a Dióxido de Carbono (CO_2), lo que refleja la mayor masa molecular del CO_2 comparada con la del carbono elemental.

Para la cuantificación de las unidades de muestreo necesarias, se ha hecho uso de la herramienta *A/R Methodological Tool* proporcionada por el Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM por sus siglas en inglés). Según los resultados obtenidos mediante este cálculo, las 359 parcelas de muestreo se distribuyeron de la siguiente manera en las diferentes regiones: Antioquia, 30 parcelas; Bolívar, 10 parcelas; Caldas, 35 parcelas; Cesar, 99 parcelas; Córdoba, 69 parcelas; Huila, 38 parcelas; La Guajira, 5 parcelas; Magdalena, 4 parcelas; Santander, 40 parcelas; y Tolima, 29 parcelas.

La captura, almacenamiento y organización de datos en campo, se efectuaron a través de herramientas digitales como Open Data Kit (ODK), GitHub y MS Excel.

De manera general, el tamaño de las parcelas para la medición de biomasa está estrechamente relacionado con la densidad y tamaño de los individuos por área, y el contenido de carbono que pueden almacenar (Yepes *et al.*, 2011). Por lo que, para proyectos tipo A/R las parcelas de medición de biomasa pueden tener en cuenta entre 1/10 o 1/20 de una ha, para el presente caso 1/10 de ha.

3.4. Muestreo de campo

En el proceso de recolección de datos, se obtuvieron 297 mediciones directas, y otras 62 mediciones de control de calidad, también conocidas como remediciones, para un total de 359. En general, 26404 individuos fueron objeto de muestreo, de los cuales el 93 % correspondió a árboles de cacao, mientras que el restante 7 % se distribuyó entre especies forestales y de sombrío, incluyendo Cedro, Roble, Matarratón, Aguacate, Cítricos y Café.

Procesamiento de datos:

- A través de un análisis exploratorio de los datos obtenidos, se detectaron valores atípicos en un 5 %, por lo cual fueron depurados.
- El 8 % de las parcelas levantadas, presentaron un patrón relacionado con la edad de siembra, es decir, contenían árboles con más de dos años de siembra en un mismo lote. Esto proporcionaba una heterogeneidad de la biomasa, por lo cual se excluyen de los cálculos finales.
- Se identificó que el 7.7 % de las parcelas cuyos diámetros del tronco a 30 cm del suelo (D_{30}) se desviaban considerablemente del promedio del estrato, según el año de siembra, por ende, estos datos fueron eliminados de los cálculos de contenidos de carbono.
- Tras el proceso de filtro y depuración de datos, se procede a realizar la evaluación de las reservas de carbono contenidos en los cultivos de cacao, los cuales cuentan con una gama de 24 diferentes años de siembra, que comprenden edades de 1 hasta 34 años.

4. METODOLOGÍA

Para el buen desarrollo de la metodología, fue necesario completar 4 fases importantes:

4.1. Estimación de contenidos de carbono

El primer componente metodológico se centró en la cuantificación de las reservas de carbono almacenadas en los sistemas agroforestales evaluados. Esta fase implicó la integración de datos de campo con modelos matemáticos para determinar la biomasa y su equivalente en carbono, mediante el siguiente procedimiento:

- Identificación de reservorios y estratificación: Se seleccionaron los depósitos de carbono objeto de análisis, incluyendo biomasa aérea y biomasa subterránea. Simultáneamente, se implementó un proceso de estratificación para distinguir los diversos niveles o segmentos del estudio en las estimaciones.
- Levantamiento de información dasométrica: Se estableció el tamaño y número de las unidades de muestreo, resultando en la medición de 297 parcelas circulares de $1000m^2$. La captura de datos abarcó variables clave como el diámetro (D_{30} o DAP) y la altura total de los individuos.
- Cálculo de biomasa y conversión a CO_2e : Se aplicaron ecuaciones alométricas específicas, como la de Andrade *et al.* (2008a) para cacao y Chave *et al.* (2014) para especies forestales, para estimar la biomasa aérea, y la ecuación de Cairns *et al.* (1997) para la biomasa subterránea. Finalmente, se realizó la transformación a carbono (factor 0.47) y a dióxido de carbono equivalente utilizando el factor de conversión 3.67.

4.2. Análisis comparativo por departamentos

El segundo componente de la metodología empleada implicó un análisis comparativo por departamentos. Este análisis exploró la variabilidad en la captura de carbono entre los departamentos evaluados y para ello se realizó el siguiente procedimiento:

- Determinar el rango del periodo evaluado: Para ello fue necesario identificar el número total de parcelas y árboles, agrupándolos por año de siembra para cada departamento.
- Estimar CO_2e : Se calculó la densidad de siembra promedio/ha mediante la extrapolación de los datos obtenidos por parcela. Con base en los datos recopilados, se estimaron las remociones de CO_2e por departamento, permitiendo cuantificar el rendimiento de la captura de carbono en cada región.
- Analizar datos: Esta etapa buscó identificar por departamento, las áreas de alta y baja eficiencia en la captura de carbono.

4.3. Proyección de remociones CO_2 .

El tercer componente de la metodología, se enfocó en establecer una perspectiva futura de las remociones de carbono contemplando el análisis de 1630 ha previamente identificadas, para un periodo de 15 años, con el objetivo principal de estudiar el potencial de captura de carbono que tendrá el cacao en los departamentos seleccionados de Colombia.

Se generó un análisis comparativo de las proyecciones de remociones de CO_2e bajo dos densidades de plantación distintas: una densidad promedio de 646 árboles/ha, y una densidad proyectada a 900 plántulas/ha.

Este punto se desarrolló haciendo uso de la ecuación de Andrade *et al.* (2008a), y además, fue necesario encontrar un modelo de regresión para determinar los valores esperados del DAP en función de la edad del cultivo, aplicando un polinomio de segundo grado a los datos de campo recolectados.

4.4. Comparación con herramientas de estimación de carbono

La cuarta etapa de la metodología aplicada consistió en la evaluación de los datos tomados en campo con la herramienta Carbon Benefits Project (CBP). Lo anterior, con el fin de evaluar una concordancia de los resultados y permitir validar de manera adicional la proyección planteada y desarrollada en el presente estudio. Como en la proyección del apartado 4.3, se evaluaron las mismas 1.630 ha, utilizando el modelo 'Detailed Assessment of the impact projects have on carbon stocks and greenhouse gas emissions' (Carbon Benefits Project, 2022)

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan las estimaciones de la captura de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) en cultivos de cacao para los departamentos colombianos de Antioquia, Bolívar, Caldas, Cesar, Córdoba, Huila, La Guajira, Magdalena, Santander y Tolima. Estas estimaciones, basadas en aproximadamente 20000 registros dasométricos de plántulas de cacao, obtenidos de 297 parcelas de seguimiento de contenido de carbono, ofrecen una visión general del comportamiento de la dinámica de carbono en estos sistemas de cultivo.

5.1. Estimación de remociones CO_2

La Figura 2 ilustra los valores promedio de las remociones acumuladas de CO_2e en plantas de cacao de diferentes edades de siembra.

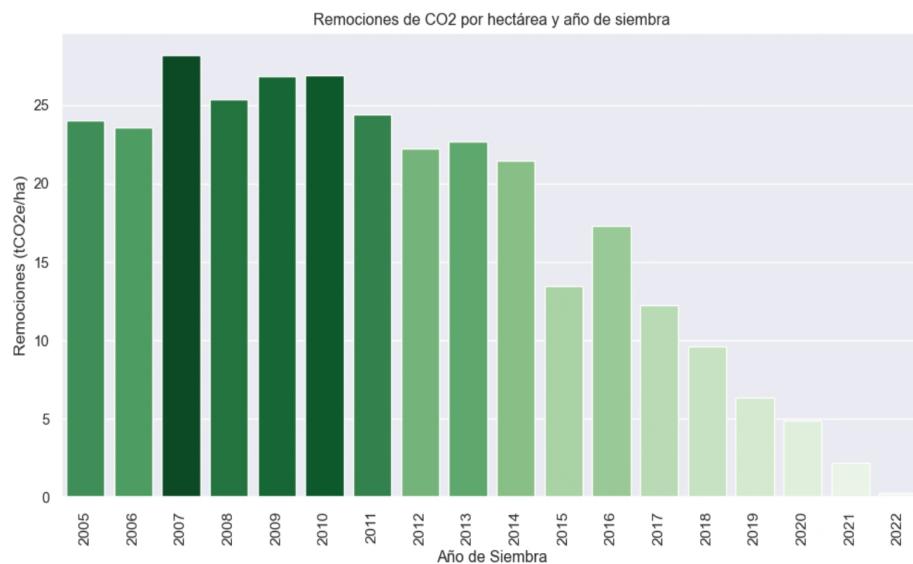


Figura 2: Remociones de CO₂e / ha vs. año de siembra. Fuente: Elaboración propia

En general, la remoción promedio de CO₂e en plántulas de cacao de distintas edades, así como sus valores mínimos y máximos, muestran un incremento constante en relación con la antigüedad del cultivo. Paralelamente, el aumento en la desviación estándar sugiere una mayor variabilidad en las remociones a medida que el cultivo envejece. La tendencia creciente de las remociones de CO₂ con la edad está intrínsecamente ligada al crecimiento de la plántula a lo largo de los años. Sin embargo, a partir del año 13, esta tendencia de incremento se estabiliza y se mantiene. La biomasa aérea y subterránea en los cultivos de cacao no experimenta un aumento significativo en las remociones de carbono después del treceavo año, lo que concuerda con las prácticas de poda y manejo regular que requieren estos cultivos.

5.2. Resultados por departamentos

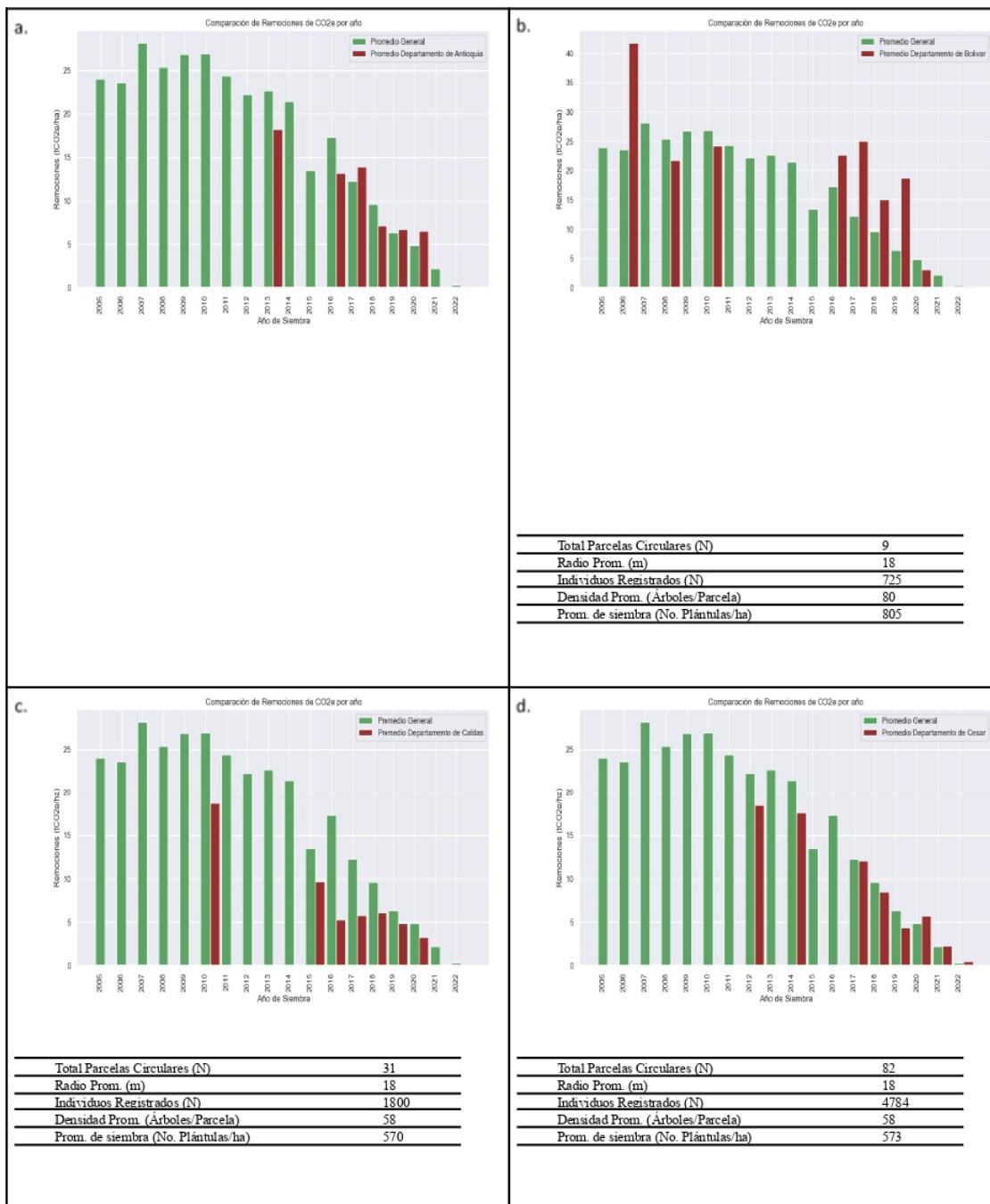


Figura 3: Comparación de remociones de CO_2 por año, de cada departamento: a. Antioquia; b. Bolívar; c. Caldas; d. Cesar.
Fuente: Elaboración propia

ESTUDIO DASOMÉTRICO Y ESTIMACIÓN DE RESERVAS DE CARBONO EN AGROBOSQUES DE CACAO, COLOMBIA



Figura 4: Comparación de remociones de CO₂ por año, de cada departamento: e. Córdoba; f. Huila; g. Guajira; h. Magdalena; i. Santander; j. Tolima. Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 3 y 4, se ilustran los patrones y variaciones en las remociones de CO₂e/ha entre los diferentes departamentos y a lo largo del tiempo. En primer lugar, se observa una notable variabilidad en las cantidades de remociones de CO₂e/ha entre los departamentos. Al examinar los valores anuales, se aprecia que algunos

departamentos presentan cifras significativamente más altas o más bajas en comparación con otros, lo cual se atribuye al manejo diferencial de los cultivos.

En Colombia, los departamentos de La Guajira y Magdalena tienen una baja participación en el área cosechada y en las toneladas de producción debido a sus condiciones climáticas. Actualmente, La Guajira representa el 0.29 % del área cosechada y Magdalena el 1.42 %, según datos de Agronet. Esta limitación afecta la disponibilidad de cultivos de diferentes edades para su muestreo. Por lo tanto, el análisis gráfico se centrará en los departamentos con información de muestreo entre 2016 y 2022.

Los departamentos de Antioquia, Cesar, Huila y Santander exhiben un crecimiento y acumulación de carbono más homogéneo en las parcelas muestreadas. Estos departamentos superan las 10 toneladas de CO_2e/ha al sexto año, lo que puede estar asociado a su tradición cacaocultora. En conjunto, estos cuatro departamentos concentran el 56 % de la participación nacional en el área cosechada (cálculo propio con base en registros EVA consolidados en (Agronet, sf)).

Tolima, otro departamento con tradición cacaocultora, representa el 7.84 % de la producción nacional. Sin embargo, su contenido de carbono se encuentra por debajo del promedio, con valores que fluctúan entre el quinto y séptimo año, alcanzando y superando las 15 toneladas de CO_2e/ha , para luego mantenerse por debajo de este umbral.

Además de la variabilidad entre departamentos, también se pueden identificar patrones a lo largo del tiempo para cada departamento. Por ejemplo, en el departamento de Antioquia, se observa un aumento gradual en las remociones de CO_2e a partir del año 2013, mientras que en otros departamentos como Bolívar y Caldas, se pueden observar fluctuaciones irregulares en diferentes años.

Es importante tener en cuenta que la ausencia de datos en algunos departamentos y años puede limitar el alcance y la robustez de los análisis estadísticos.

Para obtener resultados más robustos, se recomendaría enfocarse en los departamentos de Antioquia, Bolívar, Córdoba, Huila y Santander, ya que estos muestran una mayor disponibilidad de datos a lo largo de los años. Estos departamentos presentan una cantidad significativa de observaciones en la mayoría de los años, lo que permitiría realizar análisis más completos y precisos de las remociones de CO_2e/ha .

En cuanto a la temporalidad recomendada, se sugiere centrarse en los años comprendidos entre 2010 y 2021, ya que durante este período se registran una mayor cantidad de datos y una menor presencia de valores faltantes. Estos años muestran una consistencia en la disponibilidad de información, lo que facilitaría realizar comparaciones significativas y analizar las tendencias a lo largo del tiempo de manera más confiable.

Al seleccionar los departamentos mencionados y la temporalidad recomendada, se podrá continuar con los análisis de datos de manera más sólida y robusta, obteniendo resultados más confiables y representativos en relación a las remociones de CO_2e/ha en los cultivos de cacao.

5.3. Proyección

5.3.1. Proyección de remociones de CO_2

Esta sección presenta los resultados derivados de la proyección de remociones de CO_2 para el proyecto "Cacao Colombiano y Cultivos Complementarios C4D". Utilizando la metodología fundamentada en la ecuación de Andrade *et al.* (2008a), ajustamos los parámetros de dicha ecuación con los datos obtenidos del análisis de remociones de CO_2e . Este procedimiento permitió minimizar los residuos y obtener proyecciones más precisas para las curvas de crecimiento del Diámetro a la Altura del Pecho (*DAP*) en función de la edad del cultivo. Para lograrlo, se aplicó una regresión polinomial de segundo grado, revelando que la ecuación que mejor se ajusta a los datos de campo es $-0.06308x^2 + 1.575x + 2.936$, donde x representa la edad del cultivo expresada en años. Este modelo resultó en un coeficiente de determinación R^2 de 0.49, lo que indica una relación moderada entre las variables.

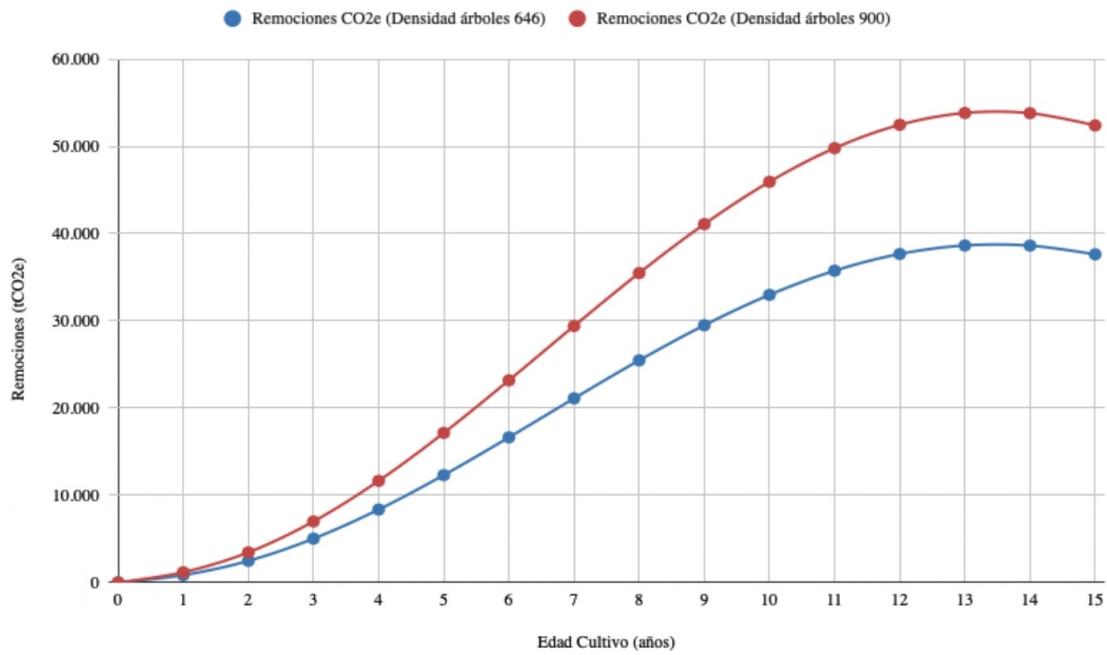
Se debe tener en cuenta que, aunque el coeficiente de determinación R^2 indica una relación moderada entre las variables, para el presente informe este valor se considera aceptable debido a la variabilidad inherente en los datos recogidos en diferentes departamentos. Esta variabilidad regional puede deberse a una multitud de factores, incluyendo diferencias en las condiciones de crecimiento, prácticas de manejo y variabilidad genética entre las plántulas. Por lo tanto, un R^2 de 0.49 proporciona una medida razonable de la relación entre la edad del cultivo y su Diámetro a la Altura del Pecho (*DAP*) para el contexto del proyecto.

Tomando en cuenta un conjunto de 1.630 hectáreas analizadas en el informe, se realizan las proyecciones anuales de las remociones de CO_2e para un periodo de 15 años. Estas proyecciones nos proporcionan datos que reflejan la acumulación de remociones de CO_2e a lo largo del periodo propuesto de acreditación de 15 años.

La gráfica que se presenta a continuación muestra las proyecciones de remociones de CO_2e expresadas en toneladas bajo dos escenarios diferentes. El primer escenario se basa en una densidad de siembra promedio de 646 plántulas por hectárea, cifra obtenida en el análisis de línea base realizado anteriormente. El segundo escenario se proyecta con una densidad de siembra aumentada a 900 árboles por hectárea. Ambos escenarios se despliegan a lo largo de un periodo de acreditación de 15 años.

Tabla 2: Proyección de remoción de CO_2

Edad Cultivo	Remociones CO_2 e (Densidad Siembra 646)	Remociones CO_2 e (Densidad Siembra 900)
1	838.66	1168.41
2	2475.54	3448.89
3	5020.61	6994.66
4	8359.77	11646.74
5	12306.74	17145.62
6	16635.25	23176.05
7	21101.81	29398.81
8	25462.95	35474.70
9	29488.63	41083.24
10	32972.76	45937.29
11	35741.42	49794.55
12	37659.13	52466.28
13	38633.37	53823.58
14	38617.56	53801.55
15	37612.44	52401.23

Figura 5: Proyección de remociones de CO_2 para 15 años. Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos, se puede apreciar que el impacto de incrementar la densidad de siembra de 646 a 900 árboles por hectárea es considerable. De hecho, durante todo el período de 15 años, la densidad de siembra más alta siempre resulta en una remoción de CO_2 e más significativa.

En la anterior tabla se puede observar que, al final del periodo de acreditación de 15 años, la proyección de remociones acumuladas de CO_2e difiere considerablemente en función de la densidad de siembra utilizada. En el caso de una densidad de plantación de 646 plantas por hectárea, las remociones acumuladas de CO_2e ascienden a 37612.44 toneladas. Sin embargo, al aumentar la densidad de siembra a 900 plantas por hectárea, las remociones acumuladas de CO_2e ascienden a 52401.23 toneladas. Esto representa una diferencia de 14788.79 toneladas en favor de la mayor densidad de siembra.

En términos porcentuales, el incremento en las remociones de CO_2e alcanza un 39.34%. Estos resultados muestran la importancia que tiene el manejo agroforestal en los resultados de las remociones por ende en el balance general del proyecto.

Es importante mencionar que estas proyecciones suponen que todas las demás condiciones permanecen constantes. Sin embargo, en la realidad, otros factores como las especies de árboles plantados, las condiciones ambientales y las prácticas de manejo del bosque pueden afectar la capacidad de remoción de CO_2e .

5.3.2. Proyectos de beneficio del carbono (Carbon Benefits Project - CBP)

La plataforma Carbon Benefits Project (CBP) ofrece una serie de herramientas impacto de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero en áreas naturales y sistemas agropecuarios (Carbon Benefits Project, 2022), lo que es útil para evaluar los impactos de los gases de efecto invernadero de las prácticas de Manejo Sostenible de Tierras. CBP también puede contribuir a una gestión más eficiente en línea que apoyan actividades agrícolas, forestales y de gestión de tierras, al estimar su impacto en la mitigación del cambio climático. CBP puede aplicarse en todas las etapas de un proyecto. Permite estimar y rastrear el proyecto al permitir un seguimiento continuo y actualizado de los beneficios de carbono generados.

CBP es una herramienta de cálculo, en donde se cuenta con diferentes mediciones. Haciendo las veces de una base de datos que arroja resultados predeterminados según las proyecciones establecidas. Además, es una herramienta en donde se establecen supuestos, lo cual la hace útil para llevar un registro y un control de los datos. Teniendo en cuenta esto dentro de la consultoría C4D, se establece que CBP es una herramienta que le ayuda a estimar proyecciones y supuestos a los datos ingresados y con esto poder obtener resultados que se asemejen a lo que se estima proyectar con la iniciativa del proyecto. Teniendo en cuenta esto, se extrajo de la plataforma CBP un informe detallado donde se aproximan las remociones anuales y totales que el proyecto proporciona en un periodo de tiempo de 20 años, los cuales serán explicados a continuación.

Con base en los datos obtenidos en el reporte de CBP, donde se registra una emisión negativa de 4.426 toneladas de CO_2e , lo cual, para efectos del presente análisis se interpreta como una remoción de CO_2e . En este informe, se proyecta que, a lo largo del periodo de acreditación de 15 años, se acumularían un total de 66390 toneladas de CO_2e . Sin embargo, es importante tener en cuenta que el informe de CBP contempla

resultados para el Stock de Biomasa Aérea y Subterránea y el Stock de Carbono Orgánico en el Suelo en una proporción del 50.8 % con respecto a las remociones netas por año. Por lo tanto, se estima que 2.251 toneladas de CO_2e por año corresponden al Carbono Orgánico en el Suelo, mientras que 2175 toneladas corresponden al stock de biomasa aérea y subterránea.

Esta aclaración es de suma importancia, ya que los cálculos y proyecciones presentados en este informe únicamente han considerado el stock de biomasa correspondiente a las plantas de cacao. Hasta la fecha, no se han incluido los resultados de los análisis de laboratorio de las muestras de suelo para los cálculos del stock de carbono orgánico en el suelo. Por lo tanto, a efectos de tener un punto de comparación adecuado, es necesario unificar los stocks analizados, con el ánimo de que la comparación sea objetiva. El proyecto solo tomo en cuenta la biomasa aérea y la subterránea.

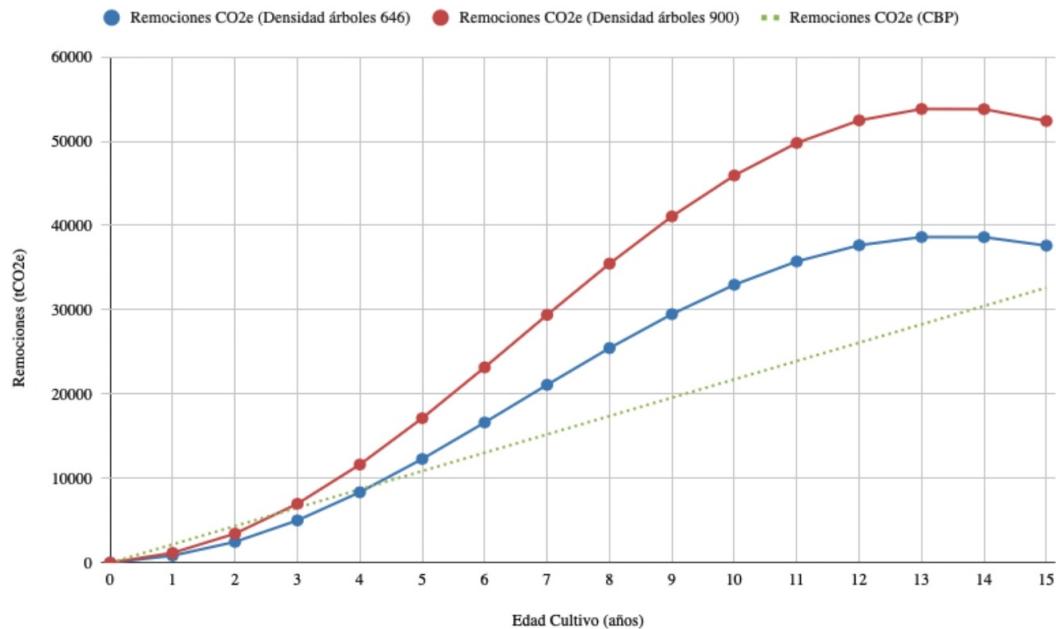


Figura 6: Proyección de promociones de CO_2 para 15 años. Fuente: Elaboración propia.

Para analizar las remociones acumuladas a lo largo del periodo de acreditación, se compararon los resultados obtenidos para las densidades de siembra de 646 y 900 plantas por hectárea, así como los datos registrados en el informe de CBP.

En la siguiente tabla se presentan los porcentajes correspondientes a cada resultado:

Se observa que, a la edad del cultivo de 1 año, las remociones acumuladas de CO_2e para la densidad de siembra de 646 y 900 se proyectan en 838.66 y 1168.41 toneladas, respectivamente. Estos valores representan aproximadamente el 38.6 % y 53.7 % de las remociones proyectadas en el informe de CBP, que es de

Tabla 3: Proyección de remoción de CO_2

Edad Cultivo	Remociones CO_2e (Densidad Siembra 646)	Remociones CO_2e (Densidad Siembra 900)	Remociones CO_2e (CBP)
1	838.66	1168.41	2175
2	2475.54	3448.89	4350
3	5020.61	6994.66	6525
4	8359.77	11646.74	8700
5	12306.74	17145.62	10875
6	16635.25	23176.05	13050
7	21101.81	29398.81	15225
8	25462.95	35474.70	17400
9	29488.63	41083.24	19575
10	32972.76	45937.29	21750
11	35741.42	49794.55	23925
12	37659.13	52466.28	26100
13	38633.37	53823.58	28275
14	38617.56	53801.55	30450
15	37612.44	52401.23	32625

2175 toneladas.

A medida que el cultivo avanza en edad, las remociones acumuladas continúan aumentando en ambos escenarios de densidad de siembra. Por ejemplo, a los 5 años de edad, las remociones acumuladas se proyectan en 12306.74 y 17145.62 toneladas para las densidades de siembra de 646 y 900 respectivamente, lo que representa aproximadamente el 56.4% y 78.6% superior frente a las remociones registradas en el informe de CBP (21750 toneladas).

Al llegar a los 15 años de edad, periodo de acreditación propuesto, las remociones acumuladas se proyectan en 37612.44 y 52401.23 toneladas para las densidades de siembra de 646 y 900 respectivamente, lo que equivale aproximadamente al 65.1% y 90.6% de las remociones registradas en el informe de CBP (32625 toneladas).

Estos porcentajes muestran el incremento significativo en las remociones acumuladas a medida que el cultivo de cacao se desarrolla y demuestran la influencia positiva de la densidad de siembra en la captura de carbono.

6. CONCLUSIONES

La densidad de siembra de cacao tiene un impacto significativo en las remociones acumuladas de CO_2e . El incremento de la densidad de siembra de 646 a 900 árboles por hectárea resulta en una mayor captura de carbono, con un aumento promedio del 39.34 % en las remociones de CO_2e .

Existe una variabilidad considerable en las remociones de CO_2e entre los diferentes departamentos analizados. Algunos departamentos muestran valores más altos o más bajos en comparación con otros, lo que sugiere la influencia de factores regionales en las remociones de CO_2e .

Se recomienda centrar los análisis en los departamentos de Antioquia, Bolívar, Córdoba, Huila y Santander, ya que estos presentan una mayor disponibilidad de datos a lo largo de los años, lo que permite realizar análisis más robustos y confiables.

Se sugiere enfocarse en los años comprendidos entre 2010 y 2021, ya que durante este período se registra una mayor cantidad de datos y una menor presencia de valores faltantes. Esto proporciona una base sólida para realizar comparaciones y analizar las tendencias a lo largo del tiempo de manera más precisa.

Es importante tener en cuenta que las proyecciones de remociones de CO_2e se basan en la densidad de siembra de cacao y no incluyen los resultados de los análisis de laboratorio del stock de carbono orgánico en el suelo. Por lo tanto, se recomienda unificar los stocks analizados para obtener una comparación objetiva.

El coeficiente de determinación R^2 de 0.49 indica una relación moderada entre la edad del cultivo y su Diámetro a la Altura del Pecho (DAP). Aunque este valor puede considerarse aceptable dada la variabilidad regional, se debe tener en cuenta que factores determinantes como las diferencias en las condiciones de crecimiento, la heterogeneidad en las prácticas de manejo agronómico y la variabilidad genética de las plántulas pueden influir en los resultados.

La proyección de remociones acumuladas de CO_2e muestra una diferencia significativa según la densidad de plantación utilizada. Aumentar la densidad de siembra a 900 plantas por hectárea resulta en una mayor captura de carbono, lo que demuestra la importancia del manejo agroforestal en los resultados de las remociones.

Es esencial considerar que las proyecciones suponen condiciones constantes, pero otros factores como las especies de árboles, las condiciones ambientales y las prácticas de manejo pueden afectar la capacidad de remoción de CO_2e .

La comparación con los resultados del Carbon Benefits Project (CBP) muestra diferencias en los enfoques

y resultados. El informe de CBP contempla el stock de biomasa y el stock de carbono orgánico en el suelo, mientras que este informe se centra únicamente en el stock de biomasa del cacao.

Contribución de los autores

Karen Yuliana Nieto Bejarano: Revisión bibliográfica y contextualización técnica del enfoque de biomasa y ecuaciones alométricas; construcción del marco metodológico y comparativo con ecuaciones validadas en otras especies, y elaboración de tablas de resultados; redacción del manuscrito, armonización del estilo y formato de la revista, e incorporación de ajustes editoriales y revisión final de coherencia científica.

John Fredy Maldonado Coy: Diseño operativo del estudio y coordinación de la ejecución de las parcelas; definición y estandarización de protocolos de medición (DAP, altura, variables de sitio); levantamiento de información en campo (georreferenciación, control de trazabilidad), aseguramiento de calidad y consolidación primaria de bases de datos.

Laura Fabiana Sanabria Peñaloza: Depuración, validación y estructuración de la base de datos; análisis exploratorio y estadístico (distribuciones, correlaciones, selección de variables) y ajuste de ecuaciones alométricas para estimación de biomasa aérea; evaluación y comparación de modelos y cálculo de biomasa a partir de parámetros dendrométricos.

Referencias

- AgroNet. (s. f.). Base Agrícola EVA 2019–2024 [Base de datos]. Observatorio de Información Rural y Agropecuaria, UPRA. <https://agronet.gov.co/estadisticas>
- Albrecht, A. & Kandji, S.T. (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99(1-3), 15-27. DOI:10.1016/s0167-8809(03)00138-5
- Andrade-C., M. G. (2011). Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas. Consideraciones para fortalecer la interacción Ciencia-Política. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales*, 35(137), 491–507. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082011000400008&lang=es
- Andrade, H.J. & Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas*, 10(39), 109-116.
- Andrade, H.J., Brook, R. & Ibrahim, M. (2008a). Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant and Soil*, 308(1-2), 11-22. DOI: 10.1007/s11104-008-9600-x
- Andrade, H. J., Segura, M., Somarriba, E., & Villalobos, M. (2008b). Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 46, 89–96.

- Andrade, H. J., Segura, M.A., Feria, M. & Suárez, W. (2016). Above-ground biomass models for coffee bushes (*Coffea arabica* L.) in Líbano, Tolima, Colombia. *Agroforestry Systems*, 92(3), 775-784. DOI: 10.1007/s10457-016-0047-4
- Arciniegas, S.P. & Flórez, D.F. (2018). Estudio de los sistemas silvopastoriles como alternativa para el manejo sostenible de la ganadería. *Ciencia y Agricultura*, 15(2), 107-116. DOI: 10.19053/01228420. v15.2
- Arias-Ortega, M. A. & Rosales Romero, S. (2019). Educación Ambiental Y Comunicación Del Cambio Climático. Una Perspectiva Desde El Análisis Del Discurso. *Revista mexicana de investigación educativa*, 24(80), 247-269, www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-66662019000100247#fn1
- Arteaga, L. & Burbano, J. (2018). Efectos del cambio climático: Una mirada al Campo. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 35(2), 79-91. doi: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183502.93>
- Asase, A. & Tetteh, D. A. (2015). Tree diversity, carbon stocks, and soil nutrients in cocoa-dominated and mixed food crops agroforestry systems compared to natural forest in Southeast Ghana. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(1), 96-113. DOI: 10.1080/21683565.2015.1110223
- Baena, J.J. (2019). La política de comercio exterior y las exportaciones colombianas. *Revista de Economía Institucional*, 21(41), 51-70. DOI: 10.18601/01245996.v21n41.03
- Buitrago, M. E., Ospina, L. A. & Narváez, W. (2018). Sistemas Silvopastoriles: alternativa en la mitigación y adaptación de la producción bovina al cambio climático. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 22(1), 31-42. DOI: 10.17151/bccm.2018.22.1.2
- Cairns, M., Brown, S., Helmer, E. & Baumgardner, G. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*. 111 (1), 1-11. doi: 10.1007/s004420050201
- Carbon Benefits Project. (2022). Carbon Benefits Project: Improving the sustainable management of natural resources. Recuperado de <https://www.carbonbenefitsproject.org/>
- Carbon Market Watch. (2012). Guía práctica sobre el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Recuperado de https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2012/03/CDM-Toolkit_Espanol.pdf
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrízar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>

- Díaz, M.F., Enciso, K., Triana, N., Muriel, J. & Burkart, S. (2018). Pagos por Servicios Ambientales para sistemas silvopastoriles en Colombia. *Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)*, Cali, CO. 54 p. Recuperado de <https://www.ilri.org/publications/pagos-por-servicios-ambientales-para-sistemas-silvopastoriles-en-colombia>
- Espinosa, J.A. (2016). Características estructurales y funcionales de un faro agroecológico a partir de las experiencias de productores cacaoteros de las regiones de los departamentos de Nariño, Meta, Caquetá y Tolima (Tesis de Doctorado). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10495/5644>
- Gutiérrez, G., Gutiérrez-Montes, I., Hernández-Núñez, H.E., Suárez, J.C. & Casanoves, F. (2020). Relevance of local knowledge in decision-making and rural innovation: A methodological proposal for leveraging participation of Colombian cocoa producers. *Journal of Rural Studies*, 75, 119-124. DOI: 10.1016/j.jrurstud.2020.01.012
- Hurtado, C., Corte, C. & Triana, M. (2017). Estimación del carbono almacenado en el bosque natural en la cuenca media-baja. municipio de río Quito Chocó, Colombia. *textiIngeniería e Innovación*, 5(1), 32-42. DOI: 10.21897/23460466.1102
- Kuosmanen, T., Zhou, X. & Dai, S. (2020). How much climate policy has cost for OECD countries?, *World Development*, 125, 104681. DOI: 10.1016/j.worlddev.2019.104681
- López, J. G., Casanova, F., Villanueva, G., Díaz, V.F., Solorio, F.J., Martínez, P., Aryal, D. R. & Chay-Canul, A.J. (2018). Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. *Agroforestry Systems*, 93(1), 199-211. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0259-x>
- Nielsen, T.D. (2016). From REDD+ forests to green landscapes? Analyzing the emerging integrated landscape approach discourse in the UNFCCC. *Forest Policy and Economics*, 73, 177-184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forepol.2016.09.006>
- Olorunfemi, I.E., Komolafe, A.A., Fasimmirin, J.T., & Olufayo, A.A. (2019). Biomass carbon stocks of different land use management in the forest vegetative zone of Nigeria. *Acta Oecologica* 95, 45-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2019.01.004>
- Paipa, N.A. & Triana, M.A. (2018). Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea de un bosque húmedo tropical en Paimadó, Chocó. *Ingenierías USBMed*, 9(1), 18-29. DOI: <https://doi.org/10.21500/20275846.3180>
- IDEAM (2021). Manual de Campo Inventario Forestal Nacional Colombia, Versión 5.2. Adaptado de IDEAM, 2018. Manual de Campo Inventario Forestal Nacional Colombia, Versión 4.0. Colombia, Bogotá, 2020. 160 páginas“. Colombia, Bogotá, 2021. 162 páginas.

- IPCC. (2019). Climate change and land. An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for policymakers. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCl-Full-Report-Compiled-191128.pdf>
- IPCC. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Segura, M.A., Andrade, H.J. & Mojica Sánchez, C.A. (2019). Estructura, composición florística y almacenamiento de carbono en bosques nativos del páramo de Anaime, Tolima, Colombia. *Ciênc Florestal*, 29(1), 157-168. DOI: 10.5902/1980509826551
- Segura, M.A., Andrade, H.J. & Sierra, E. (2020). Diversidad florística y captura de carbono en robledales y pasturas con árboles en Santa Isabel, Tolima, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 68(2), 383-393.
- Somarriba, E., Cerdá, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T., Mavisoy, H., Ávila, G., Alvarado, E., Poveda, V., Astorga, C., Say, E., & Deheuvels, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 173, 46–57.
- Soto-Pinto, L., Anzueto, M., Mendoza, J., Ferrer, G.J. & de Jong, B. (2010). Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, 78(1), 39-51. DOI: 10.1007/s10457-009-9247-5
- Sullivan, M. J., Talbot, J., Lewis, S.L., Phillips, O.L., Qie, L., Begne, S.K., ... Zemagho, L. (2017). Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. *Scientific Reports*, 7, 39102. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep39102>
- Yepes, A., Herrera, J., Phillips, J., Cabrera, E., Galindo, G., Granados, E., Duque, A., Barbosa, A., Olarte, C. & Cardona, M. (2015). Contribución de los bosques tropicales de montaña en el almacenamiento de carbono en Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 63(1), 69-82.
- Yepes, A.P., Navarrete, D.A., Duque, A.J., Phillips, J.F., Cabrera, K.R., Álvarez, E. & Ordoñez, M.F. (2011). Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales -IDEAM-.
- Villa, P.M., Martins, S.V., de Oliveira Neto, S.N., Rodrigues, A.C., Hernández, E.P. & Kim, D.G. (2020). Policy forum: Shifting cultivation and agroforestry in the Amazon: Premises for REDD+. *Forest Policy and Economics*, 118. DOI: 10.1016/j.forpol.2020.102217
- Wartenberg, A.C., Blaser, W.J., Gattinger, A., Roshetko, J.M., Van, M. & Six, J. (2017). Does shade tree diversity increase soil fertility in cocoa plantations? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 248, 190-199. DOI:10.1016/j.agee.2017.07.033

Zapata, P.C. (2019). Composición y estructura del dosel de sombra en sistemas agroforestales con café de tres municipios de Cundinamarca, Colombia. *Ciênc Florestal*, 29(2), 685-697. DOI: 10.5902/1980509827037