

**ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA
Y CAPTURA DE CARBONO EN
PLANTACIONES DE CACAO
(*Theobroma cacao*) DE DIFERENTES
EDADES EN EL NORESTE
ANTIOQUEÑO**

Jessica Tatiana Giraldo Naranjo

Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Biología
Manizales, Colombia
2022

ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA Y CAPTURA DE CARBONO EN PLANTACIONES DE CACAO (*Theobroma cacao*) DE DIFERENTES EDADES EN EL NORESTE ANTIOQUEÑO

Jessica Tatiana Giraldo Naranjo

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de: **Bióloga**

Director:
MSc. César Augusto Duque Castrillón

Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Biología
Manizales, Colombia
2022

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento a Dios, ya que gracias a él he podido sacar mi carrera adelante, a mi director de tesis César Augusto Duque Castrillón, por la dedicación, paciencia y apoyo que me ha brindado durante el proceso de este trabajo, y por la confianza ofrecida al momento de aceptar ser mi director, a mi amiga Alejandra Díaz Arango por su apoyo en campo y por su disposición para responder mis dudas e inquietudes, a los productores del programa Echar Pa'lante por su disposición, apoyo y amabilidad en el momento de las visitas. Asimismo, agradezco a Colcocoa, Pachamama Consulting SAS y todas las empresas del holding por darme la oportunidad de pertenecer a su equipo de trabajo como practicante y por todo el apoyo recibido de su parte para que este trabajo se culminara con éxito. Gracias a mi familia que siempre han estado ahí y me han prestado un gran apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de este trabajo. Gracias infinitas a mi madre por apoyarme, alentarme y por siempre creer en mí y en mis capacidades, a mi esposo, por su paciencia, comprensión y solidaridad con este proyecto. Sin su apoyo este trabajo nunca se habría escrito y, por eso, este trabajo es también el suyo.

A todos, muchas gracias.

Resumen

El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los gases de efecto invernadero (GEI) que más contribuyen al calentamiento global, las concentraciones de CO₂ en la atmósfera han aumentado considerablemente en los últimos tiempos por el cambio del uso de la tierra como la degradación de los bosques, la producción agropecuaria y los procesos industriales, entre otros. Ante esta problemática se han buscado opciones para su disminución, una forma de mitigarlo es a través del almacenamiento de carbono por las masas forestales; los estudios han demostrado que el componente vegetal cumple una función muy importante en la reducción de GEI, puesto que como se sabe, son las plantas en general las encargadas de fijar el carbono capturado de la atmósfera, este resultado se da de manera natural mediante la respiración de las plantas. Los sistemas agroforestales de cacao tienen un potencial importante en el almacenamiento de carbono, convirtiéndolos en una de las principales alternativas como sumideros de CO₂ atmosférico. Para ello es indispensable calcular la biomasa existente para estimar la capacidad de almacenamiento de los árboles. Es por esto, que el objetivo de este estudio fue calcular la biomasa aérea de plantaciones de cacao con o sin sistema agroforestal de pequeños productores del noreste Antioqueño, en diferentes rangos de edades, < 5 años; entre 5 y 15 años; y > 15 años implementando un método indirecto mediante ecuaciones alométricas, se seleccionaron 13 pequeños productores de cacao del programa Echar Pa'lante de Colcocoa, se realizaron 115 parcelas circulares de 500 m² donde se tomaron variables predictoras como diámetro y altura de todos los árboles que entraron en dichas parcelas, para un total de 4.744 árboles muestreados, cada parcela fue georreferenciada con GPS y se tomaron datos de % cobertura e inclinación, con el fin de calcular la biomasa aérea y posteriormente poder estimar cuanto carbono capturan dichas plantaciones de cacao del noreste Antioqueño. Se encontró una tendencia positiva entre la edad del cultivo y la biomasa aérea, es decir que a mayor edad mayor el aumento de la biomasa y por ende la captura de carbono, sin embargo, es importante tener en cuenta que el componente vegetal naturalmente llegan a un punto de equilibrio en cierta edad, donde los árboles más viejos desaceleran la tasa de aumento de la biomasa y la captura de carbono.

Palabras clave: captura de carbono, sistemas agroforestales, *Theobroma cacao*, ecuaciones alométricas, reducción de GEI.

Abstract

Carbon dioxide (CO₂) is one of the greenhouse gases (GHG) that contribute most to global warming, CO₂ concentrations in the atmosphere have increased considerably in recent times due to land use change such as forest degradation, agricultural production and industrial processes, among others. Faced with this problem, options have been sought for its reduction, one way to mitigate it is through the storage of carbon by the forest masses; Studies have shown that the plant component plays a very important role in reducing GHG, since as is known, plants in general are responsible for fixing the carbon captured from the atmosphere, this result occurs naturally through the respiration of plants. Cocoa agroforestry systems have significant potential in carbon storage, making them one of the main alternatives as atmospheric CO₂ sinks. For this, it is essential to calculate the existing biomass to estimate the storage capacity of trees. That is why the objective of this study was to calculate the aerial biomass of cocoa plantations with or without agroforestry system of small producers in northeastern Antioquia, in different age ranges, < 5 years; between 5 and 15 years; and > 15 years implementing an indirect method using allometric equations, 13 small cocoa producers of the Echar Pa'lante de Colcocoa program were selected, 115 circular plots of 500 m² were made where predictive variables such as diameter and height of all the trees that entered these plots were taken, for a total of 4,744 trees sampled, each plot was georeferenced with GPS and data of % coverage and inclination were taken, in order to calculate the aerial biomass and later be able to estimate how much carbon these cocoa plantations capture in northeastern Antioquia. A positive trend was found between the age of the crop and the aerial biomass, that is, the older the greater the increase in biomass and therefore the carbon capture, however, it is important to note that the plant component naturally reaches a point of equilibrium at a certain age, where older trees slow down the rate of increase in biomass and carbon sequestration.

Keywords: Carbon capture, agroforestry systems, *Theobroma cacao*, allometric equations, GHG reduction.

Tabla de contenido

Agradecimientos.....	3
Resumen	4
Abstract.....	5
Introducción.....	7
Materiales y Métodos	9
Resultados.....	16
Discusión	20
Conclusiones y recomendaciones	22
Conclusión.....	22
Recomendaciones.....	23
Anexos	24
Referencias bibliográficas.....	27

Introducción

El dióxido de Carbono (CO₂) es uno de los principales gases de efecto invernadero (GEI), el cual, ha ido aumentando con el paso del tiempo causando el incremento en las concentraciones de dichos gases (GEI) en la atmósfera, pasando de 280 ppm en la época pre-industrial a 379 en 2005 (IPCC 2007); por ello se han producido continuos acontecimientos climáticos, como el aumento global de la temperatura, deshielos y aumento del nivel del mar entre muchos otros, por lo que es considerado el gas que más contribuye al calentamiento global (Obeng & Aguilar, 2014). Gran parte del CO₂ emitido a la atmósfera proviene del cambio de uso de la tierra por actividades humanas como la deforestación, producción agropecuaria, degradación de bosques tropicales y la quema de combustibles fósiles. Ante esta problemática se han buscado opciones para su disminución, los estudios han demostrado que el componente vegetal cumple una función muy importante en la reducción de GEI, puesto que como se sabe, son las plantas en general las encargadas de fijar el carbono capturado de la atmósfera, este resultado se da de manera natural mediante la respiración de las plantas. A partir de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD), celebrada en Río de Janeiro en junio de 1992, no solo se impulsó la adopción de actividades internacionales con miras a la protección de los bosques mundiales, sino que también se promovió las funciones ambientales que cumplían y se convertirían en un instrumento clave dentro de los procesos de negociación generados desde la puesta en marcha de la Convención Marco sobre cambio Climático.

Debido a lo anterior, es importante tener en claro cuestiones tan fundamentales como el desarrollo histórico de los diferentes acuerdos y tratados para la implementación de los bosques como opciones con las que se puede contrarrestar el calentamiento global; los conceptos básicos sobre cambio climático; el Mecanismo de Desarrollo Limpio como instrumento que ayude a cumplir con los objetivos propuestos por el Protocolo de Kyoto y las posibilidades de los sistemas agroforestales como otra alternativa para fijar carbono. Según el IPCC (2000), todas las fuentes y sumideros de GEI se clasifican en siete categorías principales: Energía; procesos industriales; agricultura; cambio en el uso del

suelo y actividades forestales entre otros. En esta investigación solamente se abordarán los depósitos pertenecientes a la parte agrícola, cambio de uso del suelo y actividades forestales. Según ProClima, 2020. y de acuerdo con las Directrices del IPCC (2006) para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, las estimaciones de las remociones de GEI por las plantaciones forestales se basan en las ganancias de la biomasa en el tiempo. Las ganancias incluyen el total del crecimiento de la biomasa (aérea y subterránea).

Ortiz, Riascos y Somarriba (2008), realizaron un estudio sobre almacenamiento y fijación de carbono en sistemas agroforestales (SAF), encontraron en promedio, un SAF con árbol de laurel acumula 1.86 t de biomasa en condiciones de valle y 3.97 t en loma en 25 años. Un árbol de cacao con diámetro de 30 cm, altura de 5 m, a los 25 años, con incrementos de 1.1 cm por año; puede acumular, en promedio, 22 kg de biomasa. De acuerdo con el Protocolo de Icontec “Un tipo de actividades que pueden ser empleadas para generar compensaciones, son las relacionadas con actividades forestales La compensación de emisiones es una combinación entre la implementación de las actividades forestales y la contabilización de las remociones de GEI, como compensación por parte de quien está interesado en neutralizar su huella de carbono o sus emisiones, de esta manera la estimación, y cuantificación de biomasa y carbono puede convertirse en una oportunidad social y económica para los productores.

Por lo tanto, se han planteado opciones que contribuyan a la reducción de las emisiones de CO_2 como los sistemas de uso de la tierra que incluyen leñosas perennes como bosques, sistemas agroforestales y plantaciones forestales mitigando el cambio climático al fijar carbono en biomasa, necromasa y suelos (Alvarado, Andrade & Segura, 2013) convirtiéndolos en una de las principales alternativas como sumideros de CO_2 atmosférico. Uno de los cultivos de interés para la estimación de CO_2 removido, es el cacao bajo sistemas agroforestales (SAF), ya que se consideran importantes sumideros de cantidades considerables de carbono al requerir, por su naturaleza, sombrero brindado por otras especies arbóreas permitiendo adaptar la agricultura al cambio climático (Somarriba et al., 2012; Saj et al.2013).

Los sistemas agroforestales (SAF) son proveedores de importantes servicios como la producción de alimento, producción de madera, leña u otros materiales, aumentan la fertilidad del suelo y facilitan el acceso a otros servicios ambientales que favorecen a pequeños agricultores, convirtiéndolos en unos aliados estratégicos al incorporar

incentivos ambientales, económicos y culturales por la conservación y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Debido a lo anterior se planteó la siguiente pregunta, ¿Como varia la captura de carbono en la biomasa aérea de plantaciones de cacao y sistemas agroforestales de cacao de diferentes edades?; para dar respuesta a esta pregunta se plantearon los siguientes objetivos: Estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de cacao en el Noreste Antioqueño como objetivo general, y determinar el efecto del sistema agroforestal en la acumulación de biomasa y carbono almacenado en la plantación de cacao, determinar la relación entre la biomasa aérea y carbono almacenado en la plantación de cacao con la edad y evaluar la viabilidad en la compensación de carbono y participación de los pequeños productores en pagos por servicios ambientales como objetivos específicos de la investigación.

Materiales y Métodos

La información requerida para este trabajo se basó en la revisión de literatura y trabajo de campo que se llevó a cabo en el marco del proyecto Cacao Especial Colombiano Para El Mercado Sostenible Suizo (Proyecto Cacao+Sostenible). El estudio se desarrolló en el departamento de Antioquia, en la región de la Magdalena Medio. Antioquia cuenta con alrededor del 9 % de la producción de cacao del país (5'400 toneladas), es el segundo departamento productor más importante de Colombia después de Santander que produce el 38 % (23 millones de toneladas) (FINAGRO 2018). Antioquia es el único departamento de Colombia donde el cultivo del cacao está presente al todo el rango altitudinal (0 – 1'400 m s.n.m.) (León-Moreno et al. 2019).

Los productores de cacao en Antioquia se ubican en Maceo y Caracolí principalmente. Maceo es un municipio rural de Antioquia con una superficie de 450 km² y una población de alrededor de 8'200, tiene una altitud de 950 m.s.n.m, limita al norte con Yolombó, al este con el municipio de Puerto Berrío y al sur con Puerto Berrío y Caracolí (DANE 2018; Sánchez-Cuervo et al. 2012). El clima es templado húmedo con temperaturas medias anuales entre 22°C – 26°C y precipitación anual de 2'500 – 3'000 mm (IDEAM 2014). Caracolí es un municipio menor de Antioquia con una superficie de 265 km² y una población de 4'500, limita por el norte con los municipios de Maceo y Puerto Berrío, por el

este con el municipio de Puerto Berrío, por el sur con los municipios de Puerto Nare y San Carlos, y por el oeste con el municipio de San Roque, la altitud media del municipio es de 625 m.s.n.m. (DANE 2018; Sánchez-Cuervo et al. 2012). El clima es diverso, en el norte con temperatura húmeda, el centro cálido y húmedo y el sur cálido y semihúmedo (IDEAM 2014). Por lo tanto, existe una gran dispersión en la precipitación media anual entre 2'000 – 3'0000 mm y temperaturas medias anuales entre 22°C – 28°C. Tanto Maceo como Caracolí hacen parte de la ecorregión Andina del Norte (Sánchez-Cuervo et al. 2012).

En el área las principales fuentes de ingreso son la ganadería y los cultivos de cacao, por lo que presenta una notoria intervención del hombre en el ecosistema lo que lleva a tener un impacto en el medio ambiente. Sin embargo, también es un lugar que posee amplias zonas verdes como relictos de bosques secundarios, parches de bosque y corredores biológicos que junto con los sistemas agroforestales y cultivos de cacao sirven como conexión y paso de fauna que contribuyen a la conservación de la biodiversidad de la zona.

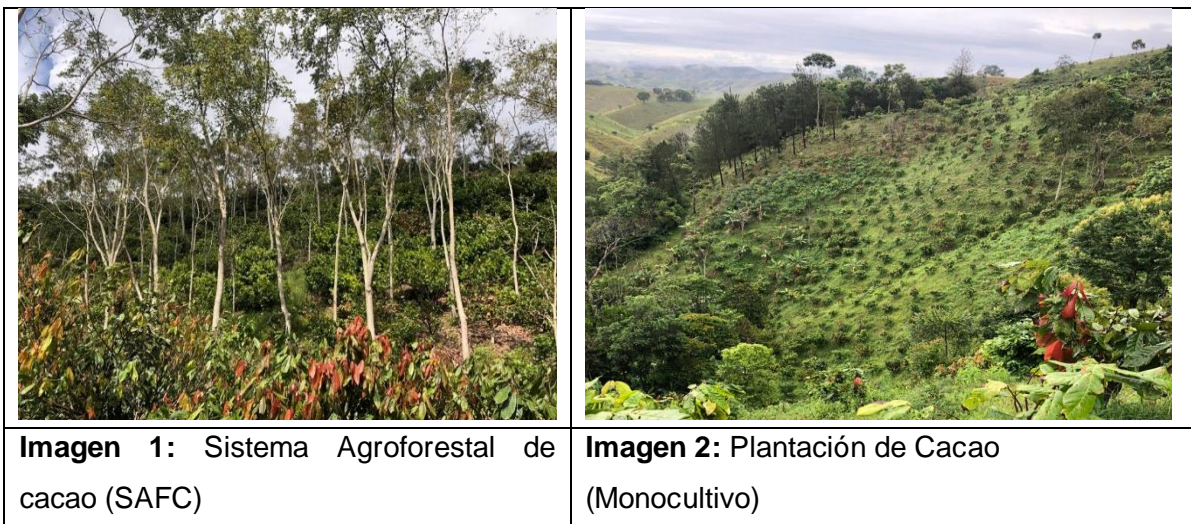
Para determinar relación entre la biomasa aérea y carbono almacenado en la plantación de cacao con la edad y mediante información tomada de la base de datos del programa de sostenibilidad verificado Echar Pa'lante de Colcocoa donde se encuentra la información base de los predios y de los productores, se realizó una estratificación del proyecto con la información obtenida donde se seleccionaron los tipos de cobertura, sistema agroforestal; monocultivo de cacao y edad de la plantación de cacao con tres rangos de edad; <5 años, 5-15 años y >15 años (Tabla 1). Basados en esa información se seleccionaron los predios que tenían dichas características, para un total de 13 predios cacaoteros seleccionados, distribuidos en los dos municipios, Maceo y Caracolí en el departamento de Antioquia.

Estratificación						
Tipo de cobertura	MC	MC	MC	SAFC	SAFC	SAFC
Edad de la plantación	< 5 años	Entre 5-15 años	>15 años	< 5 años	Entre 5-15 años	>15 años

Tabla 1: Estratificación por tipo de coberturas y edad de la plantación.

*MC (Monocultivo de cacao) y SAFC (Sistema agroforestal de cacao)

Con el fin de evaluar el efecto del sistema agroforestal en la acumulación de biomasa y carbono almacenado en la plantación de cacao se seleccionaron dos tipos de cobertura (Imagen 1 y 2). 1) El sistema agroforestal (SAF) en el área se compone principalmente de árboles de cacao combinados con árboles forestales como cedro, nogal, abarco entre otros, y árboles frutales utilizados principalmente para dar sombra al cultivo, sin embargo, también es una forma mediante la cual las familias campesinas y principalmente los pequeños productores perciben ingresos adicionales para su sustento mediante el aprovechamiento de los frutos proporcionados por los árboles frutales o el aprovechamiento maderable en menor medida de los árboles forestales utilizados en los sistemas agroforestales. 2) El monocultivo se compone exclusivamente de árboles de cacao sin ningún tipo de árboles de sombra, exceptuando los cultivos pequeños que apenas están iniciando ya que ellos si usa sombrío temporal como el plátano. El monocultivo es una forma ampliamente utilizada en la zona ya que por hectárea hay un número mayor de árboles de cacao lo que se traduce a un aumento en la producción por cosecha, sin embargo, es una práctica que se utiliza por cultura y por desconocimiento de los beneficios que puede proveer el establecer cultivos en sistemas agroforestales.



El diseño de las parcelas generalmente es determinado por el área donde se van a realizar teniendo en cuenta factores importantes como sistema o plantación, topografía, experiencia y otros. Para el establecimiento de las unidades de muestreo en campo se

utilizaron parcelas temporales, para ello consideramos formas geométricas convencionales como cuadrados, rectángulos y circunferencias, sin embargo, decidimos realizar parcelas circulares de 500 m² de área, con un radio de 12,61 m ya que son más fáciles de manejar y de establecer en campo por lo que no requieren marcar los límites de las parcelas, acción que demanda mucho tiempo, como en el caso de las parcelas cuadradas o rectangulares. En cada parcela se tomaron los siguientes datos: 1. Georreferenciación (Se tomaron las coordenadas en el punto (árbol) centro de cada parcela utilizando un GPS Garmin eTrex 20), 2. Inclinación (Se calculo así: Porcentaje de Pendiente = (Altura / Base) * 100), 3. % Cobertura (Para la toma de este dato se utilizó la aplicación HabitApp) y 4. Se marco el árbol centro con el número de la parcela (La marcación de los árboles se realizó con pintura amarilla en aceite y siempre se marcó el árbol centro)



Imagen 3 y 4: Establecimiento de parcelas circulares de 500 m²

Para cada unidad de muestreo se tomaron datos dasométricos como circunferencia a la altura del pecho y altura total para cada individuo. Para realizar la medición del diámetro (DAP) se utilizó cinta métrica, es importante tener en cuenta que cuando medimos el DAP en realidad se está midiendo la circunferencia de ese lugar del árbol (perímetro) a la altura del pecho, normalmente conocida como CAP (circunferencia a la altura del pecho), para medir todos los individuos de cacao se tuvo en cuenta (diámetro a 30 cm de altura - D30-) y La circunferencia del árbol de sombra (Forestal) fue medido a una altura de 1,30 m (diámetro a la altura del pecho DAP). A partir de esta medida, se calculó el diámetro (D), empleando la siguiente ecuación:

Para calcular el diámetro en el árbol de cacao se utilizó:

$$D = D30 / \pi$$

Para calcular el diámetro en el árbol de cacao se utilizó:

$$D = CAP / \pi$$

Donde:

D= diámetro en cm

CAP= circunferencia a la altura del pecho en cm

D30= diámetro a 30 cm de altura

π = constante (3,1416...)

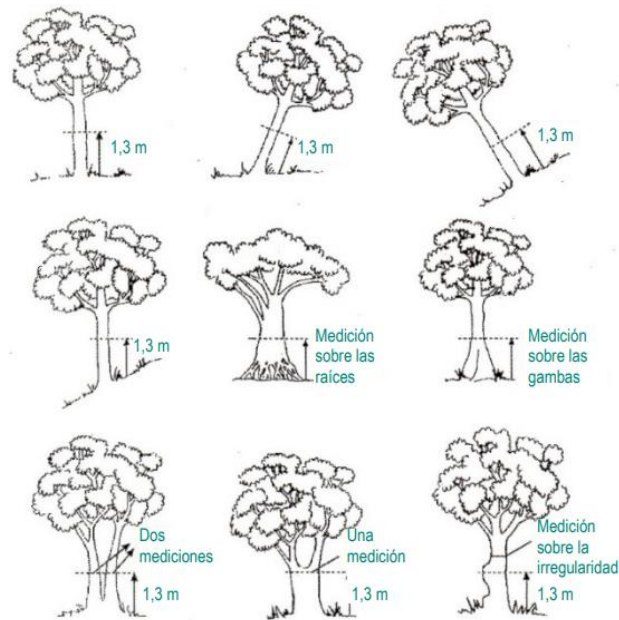


Figura 3. Recomendaciones para la medición del diámetro del tronco en árboles atípicos.

Fuente: Tomado de Camacho (2000).

La altura de los árboles es la distancia entre el nivel del suelo y la yema terminal más alta del árbol, en este caso se tomó la altura total calculada en metros utilizando un palo o vara de referencia, este método consistió en colocar el palo o vara de altura conocida al pie del árbol y posteriormente desde una determinada distancia se desplazó mentalmente esa altura a lo largo del tronco. La altura total será igual al número de veces que entra el palo, bastón o vara por su longitud. Se utilizaron las siguientes herramientas para las mediciones en campo: Cuerda o cabuya, Cinta métrica, Decámetro, GPS Gramin eTrex 20, Smartphone (con la App HabitApp previamente descargada) *, Pintura y pincel, Papel, Lápiz y Formato donde se encontraban los datos de las parcelas y las variables a medir. La mayoría de las especies forestales fueron identificadas en campo teniendo en cuenta la información suministrada por los lugareños. Sin embargo, para corroborar la identidad taxonómica de algunas especies, se procedió a la revisión de material fotográfico por parte de algunos especialistas y la consulta de la base de datos de nombres comunes de plantas de Colombia (Bernal, R., G. Galeano, A. Rodríguez, H. Sarmiento y M. Gutiérrez. 2017. Nombres Comunes de las Plantas de Colombia. <http://www.biovirtual.unal.edu.co/nombrescomunes/>). La revisión del nombre científico y nomenclatura taxonómica fue consultada en la base de datos Tropicos.org. Missouri Botanical Garden. 12 may 2022 <https://tropicos.org> © 2022.

Para medir la biomasa, existen diferentes métodos, entre los más utilizados se encuentran: el método directo, que consiste en un muestreo destructivo donde los árboles se talan y cada parte del árbol se pesa en húmedo y en seco, y el método indirecto, que consiste en un muestreo no destructivo donde la biomasa se estima a través de modelos alométricos los cuales proceden de métodos destructivos. Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que permiten estimar el volumen, biomasa y el carbono de los árboles en función de variables de fácil medición, como el diámetro a la altura del Pecho (DAP) y/o la altura total de los árboles.

Para estimar la biomasa aérea y posteriormente la captura de carbono en las dos coberturas seleccionadas (sistemas agroforestales de cacao (SAFC) y monocultivo de cacao (MC)) se utilizaron ecuaciones alométricas específicas para cada especie (tabla 2), es importante tener en cuenta que la selección de un buen modelo o ecuación alométrica depende de diferentes factores como las condiciones climáticas de la zona, el ecosistema y el rango del diámetro que tiene la ecuación, si aplica. Esta información se tomó de fuentes secundarias confiables con el fin de mantener la confiabilidad del estudio. Para la medición de la biomasa aérea y los stocks de carbono en campo se realizaron 115 parcelas circulares de 500 m² en 13 predios del área de estudio (Municipios de Maceo y Caracolí, Antioquia), donde se midió la circunferencia y la altura de los árboles que entraban en cada parcela, Posteriormente el cálculo de la biomasa aérea total se obtuvo por la sumatoria de los valores de biomasa de todos los individuos medidos al interior de las parcelas, con el fin de convertir la biomasa en carbono, utilizamos el factor comúnmente aplicado de 0.5, para la conversión a CO₂ equivalente multiplicamos por 3.67, este factor resulta de dividir el peso atómico de una molécula de dióxido de carbono, por el peso específico del carbono (IPCC 2003; Pearson et al. Alabama. 2005).

Para evaluar los conocimientos y la viabilidad en la compensación de carbono y participación en pagos por servicios ambientales (PSA) por parte de los pequeños productores de cacao, se desarrolló una encuesta con el fin de establecer el panorama actual y futuro frente a estos temas, buscando obtener información precisa sobre el predio y el manejo que se le da al cultivo de cacao, incluyendo preguntas puntuales sobre pagos por servicios ambientales (PSA) y bonos de carbono como: ¿Conoce que son los pagos por servicios ambientales y los bonos de carbono?, ¿Participa en algún pago por servicio ambiental (PSA) o Bonos de carbono?, entre otras. Dicha encuesta se realizó a los 13 productores de este estudio en Maceo y Caracolí con el objetivo principal de identificar y

seleccionar los ecosistemas estratégicos y los servicios ambientales que los predios de los productores proveen en la región.

El análisis de los datos recopilados para la cuantificación de las reservas de carbono en Antioquia se realizó en los programas SPSS Y R Studio con el objetivo de evaluar las diferencias entre los tratamientos (MC Y SFAC en los tres rangos de edad), comparando la biomasa aérea y captura de carbono entre ellos. Sin embargo, antes de usar pruebas no paramétricas, era necesario probar la distribución de los datos. Para ello se realizó un análisis de normalidad aplicando la prueba de Kolmogórov-Smirnov, mediante la cual observamos que las variables no presentan distribución normal, esto se debe a la gran heterogeneidad de los datos observados en los predios seleccionados.

Resultados

Se encontraron variaciones en la biomasa y captura de carbono entre el monocultivo y los sistemas agroforestales, teniendo para el monocultivo de cacao (M < 5; M >15; M entre 5 y 15) los siguientes valores; 5,9; 40,4; 23,6 y para el sistema agroforestal de cacao (SAF < 5; SAF > 15 Y SAF entre 5-15) valores de 1,9; 113,1; 38,5 respectivamente, estos valores corresponden a biomasa aérea. En cuanto al carbono capturado tenemos en el monocultivo de cacao encontramos (M < 5; M >15; M entre 5 y 15) valores de 10; 74,1; 43,3 Tco2e y para el sistema agroforestal (SAF < 5; SAF > 15 Y SAF 5 y 15) valores de 3,5; 207,5; 70,6 respectivamente (Tabla 3). Dichas variaciones están explicadas principalmente por los árboles forestales y frutales que se hallaban en las plantaciones, siendo estos un componente importante en términos de captura de carbono, es decir, que contienen la mayor reserva de carbono y por lo cual se les atribuyen las variaciones encontradas entre las parcelas y coberturas estudiadas (Tabla 4). Las parcelas medidas en los sistemas agroforestales de cacao (SAFC) contenían árboles de sombra en diferente proporción, esto se debe, a que la mayoría de los pequeños productores de cacao no tienen un diseño adecuado del sistema agroforestal y en algunos casos, los árboles de sombra o forestales que se hallaban en el cultivo fueron árboles que se encontraban establecidos antes que el cultivo, por lo cual, los productores al momento de cambiar la cobertura vegetal por el cultivo decidieron dejar dichos árboles, y es por esta razón que

muchos de ellos son árboles nativos.

Coberturas (Tratamientos)	Biomasa aérea (ton)	Carbono (ton)	Carbono equivalente (CO ₂ eq)
M < 5	5,9	2,9	10,8
M >15	40,4	20,2	74,1
M entre 5 y 15	23,6	11,8	43,3
SAF < 5	1,9	0,9	3,5
SAF >15	113,1	56,5	207,5
SAF entre 5 y 15	38,5	19,2	70,6
Promedio	37,3	18,6	68,3

Tabla 3: Coberturas y edades seleccionadas, biomasa aérea (ton), carbono (ton) y carbono equivalente (ton).

Coberturas (Tratamientos)	Biomasa aérea (ton)	Carbono (ton)	Carbono equivalente (CO ₂ eq)
SAF < 5	0,62	0,30	1,13
SAF >15	67,35	33,67	123,58
SAF entre 5 y 15	20,33	10,16	37,30
Promedio	29,43	14,72	54,01

Tabla 4: Biomasa aérea (ton), carbono (ton) y carbono equivalente (ton) de los árboles forestales del SAF.

*SAF (sistema agroforestal)

Es importante tener en cuenta que, si bien la densidad de árboles de sombra fue variable en cada predio y en cada parcela, se pudo evidenciar que estos árboles son una importante reserva de carbono, contribuyendo en gran medida al aumento en la captura de este. A diferencia de los monocultivos de cacao, en las unidades de cultivo donde encontramos los sistemas agroforestales se observó que los árboles forestales son responsables de almacenar 196,94 TCO₂e contenido en 402 árboles de sombra, con un 48,15% de las TCO₂e calculadas en el estudio, en comparación con los árboles de cacao (*Theobroma cacao*) que son responsables de 213,04 TCO₂e contenido en 4.342 árboles lo

que corresponde al 52,08% de las TCO₂e totales calculas en el estudio.

Adicional a esto es importante resaltar que encontramos una amplia variación en el carbono capturado en las unidades de muestreo en predios de los productores, observando fincas con valores desde 1,10 TCO₂e hasta fincas con hasta 82,52 TCO₂e capturadas en las unidades de muestreo del área de estudio, esto puede explicar la variabilidad de las muestras y los valores atípicos encontrados. En total se midieron 4,744 árboles en todo el estudio, de los cuales 4,342 fueron árboles de cacao (*Theobroma cacao*) y 402 fueron árboles de especies diferentes, entre ellos algunas especies de árboles frutales y otras forestales; las especies forestales más encontradas en la zona fueron Nogal (*Cordia alliodora*), Cedro (*Cedrella odorata*), Chingalé (*Jacaranda copaia*), Abarco (*Cariniana pyriformis*), Teca (*Tectona grandis*) y algunas especies nativas. Las especies frutales más comunes fueron Café (*Coffea arabica*), Aguacate (*Persea americana*) y Naranja (*Citrus aurantium*) entre otras.

Se realizó la validación del supuesto de normalidad mediante la prueba de Kolmogórov-Smirnov, la cual mostró que los datos no tienen una distribución normal, dado esto realizamos un modelo por separado para los tratamientos con la prueba no paramétrica de kruskal wallis, esta prueba se basa el rango que puede utilizarse para corroborar si existen diferencias significativas a nivel estadístico entre los tratamientos, teniendo un resultado un p-valor < 0.05, lo que nos arrojó que al menos una de las medianas era diferente, estos análisis se realizaron en el programa SPSS; para complementar el análisis de los datos y ya que los resultados de la prueba de kruskal wallis son estadísticamente significativos, aplicamos la prueba no paramétrica de Dunn en el programa R para determinar exactamente qué grupos son diferentes, donde encontramos que hay diferencias significativas entre los tratamiento, sin embargo, uno de los tratamientos (Monocultivo (M) >15 y Sistema agroforestal (SAF) >15) no presenta diferencias significativas (Tabla 5).

	Tratamientos	P valor
1	M< 5 - M>15	1.527529e-170
2	M< 5 – M entre 5 y 15	7.682674e-97
3	M>15 – M entre 5 y 15	3.196901e-18
4	M< 5 - SAF< 5	3.812637e-05
5	M>15 - SAF< 5	1.375478e-217
6	M entre 5 y 15 - SAF< 5	2.162661e-136
7	M< 5 - SAF>15	8.494467e-233
*8	M>15 - SAF>15	6.750527e-01
9	M entre 5 y 15 - SAF>15	5.619060e-24
10	SAF< 5 - SAF>15	1.309508e-294
11	M< 5 – SAF entre 5 y 15	3.325847e-119
12	M>15 – SAF entre 5 y 15	3.311109e-12
13	M entre 5 y 15 – SAF entre 5 y 15	4.012232e-02
14	SAF< 5 – SAF entre 5 y 15	4.581646e-163
15	SAF>15 – SAF entre 5 y 15	8.215201e-16

Tabla 5. Análisis de comparaciones múltiples (Prueba de Dunn).

*M (monocultivo), SAF (sistema agroforestal).

*No hay diferencias significativas entre M>15 - SAF>15 (celda 8)

Se observa que no hay diferencias significativas entre los tratamientos M >15 – SAF >15, esto se puede deber a que las plantaciones maduras, es decir, las plantaciones de mayor edad, aunque son las edades que en este estudio presentan mayor almacenamiento de carbono, no presentan altas tasas de asimilación o variabilidad en dicho almacenamiento en comparación con las plantaciones jóvenes o que están en crecimiento, por lo que se puede concluir que los árboles, en este caso las plantaciones y sistemas agroforestales de cacao llegan a su punto de saturación en términos de captura de carbono. La biomasa aérea tanto en los SAF de cacao como en los monocultivos de cacao mostro un incremento directamente proporcional a su edad, es decir, que al aumentar la edad aumenta la acumulación de biomasa aérea y por ende la captura de carbono (Grafica 1), sin embargo, hay que tener claro que el componente vegetal naturalmente llega a un punto de equilibrio en cierta edad, donde los árboles más viejos desaceleran la tasa de aumento de la biomasa y la captura de carbono. Asimismo, es importante entender que las tasas de almacenamiento de carbono en los cultivos (Monocultivos y/o Sistemas agroforestales) no dependen exclusivamente de la edad, sino también de otros factores importantes como la densidad de plantas, las especies utilizadas en los cultivos, la fertilidad, el tipo de suelo, las características climáticas del sitio y el manejo del cultivo.

La biomasa aérea total de los dos tipos de cobertura seleccionados tuvo valores de 1,9; 38,5 y 113,1 TCO₂eq en los sistemas agroforestales < 5; 5-15 años y > 15 años respectivamente; y 5,9; 23,6 y 40,4 TCO₂eq en los monocultivos de cacao para las mismas edades < 5; 5-15 años y > 15 años respectivamente. El alto contenido de carbono capturado almacenado en los SAF con maderables y frutales, se debió a la cantidad de especies forestales asociadas a las plantas de cacao, esto demuestra la capacidad de almacenamiento de carbono que tiene este sistema que relaciona cultivos con leñosas siendo una opción ecológica y sostenible para mitigar el cambio climático (Andrade et. al 2013).

Con la ejecución de la encuesta a los 13 productores del estudio, se evidenció el desconocimiento por parte de la comunidad en la zona respecto a al pago por servicios ambientales y el mercado de bonos de carbono, dos temas de gran importancia a nivel nacional y global, siendo estos dos mecanismos de participación en los cuales se pueden vincular los pequeños productores de cacao. 43% de los productores encuestados tenían conocimientos previos sobre el pago por servicios ambientales y 14% de los productores vinculados en el estudio habían escuchado sobre bonos de carbono (Grafica 2).

Discusión

Las variables dasométricas que se tuvieron en cuenta para la aplicación de las ecuaciones alométricas seleccionadas para cada especie son precisas para explicar las variables estructurales de los SAF y las plantaciones de cacao, sin embargo, es importante tener en cuenta que para que el cálculo de la biomasa aérea y la cuantificación de captura se hace necesario la implementación de métodos destructivos locales con el fin de crear ecuaciones más ajustadas a las realidades ambientales y climáticas en las que se encuentran los cultivos de interés. En este estudio se encontraron diferencias en la biomasa total y captura de carbono entre plantaciones de cacao (monocultivo) y los sistemas agroforestales de cacao (SAF) con árboles forestales o frutales, evidenciando la importancia de los SAF en la contribución a la reducción de GEI y captura y almacenamiento de carbono, algunos autores consideran que el alto almacenamiento de carbono en los SAF diseñados con árboles forestales y frutales se debe a la variabilidad y

abundancia de especies vegetales asociados con el cultivo de cacao.

De acuerdo con Nair y colaboradores 2009; los sistemas agroforestales tienen un alto potencial en la captura y almacenamiento de carbono de la atmosfera, en comparación con los pastos o los monocultivos ya que estos se comportan como una red sobre el suelo que permite mayor fijación de carbono, adicional a esto los SAF prestan diferentes servicios ecosistémicos, si bien la captura de carbono y reducción de GEI es uno de los más importantes no es el único, la conservación de la biodiversidad, fertilidad, mejora en la salud del suelo y en la calidad del agua son algunos de los tantos servicios ambientales que ellos prestan. (Casanova et al., 2016) afirma que los SAF contribuyen a la conservación de la biodiversidad, aumentando la riqueza, abundancia y diversidad de especies, en comparación con los sistemas agrícolas convencionales; apoya la conservación y disponibilidad del agua mediante la reducción de escurrimiento y contaminación; y mejora la calidad del aire.

La biomasa aérea en los árboles tiende a un incremento de carbono capturado que es directamente proporcional a su crecimiento a través del tiempo, esto es dado no solo por la edad, sino también por las otras especies forestales que contribuyen a este incremento, aportando mayor biomasa al sistema agroforestal de cacao. Concha y colaboradores (2007) señalan que la edad es un factor importante en la captura de carbono de los SAF, ya que estos pueden capturar y almacenar cantidades crecientes de carbono en la biomasa aérea. Por otra parte, aunque son varias las investigaciones que mencionan la importancia de la edad del SAF en el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea, debemos considerar que la edad si bien influye en la captura de carbono, por sí misma no es determinante en la cantidad de carbono almacenado, por lo que se deben tener en cuenta otras variables como la densidad de árboles en el sistema agroforestal y el manejo del mismo, que también son factores muy influyentes en la captura y almacenamiento de carbono, algunas investigaciones indican que estos sistemas mantienen su productividad entre 25 años y 30 años (Hernández-Gómez et al., 2015).

Los resultados de la encuesta evidenciaron el desconocimiento que hay en la región sobre pagos por servicios ambientales y bonos de carbono, lo que sugiere la necesidad de dar a conocer a los pequeños productores de la región los mecanismos en los que ellos podrían participar por el cuidado y mantenimiento de los servicios ambientales como la captura de carbono y reducción de GEI, es necesario unir esfuerzos para la mitigación al cambio

climático, en donde si bien se deben tener en cuenta procesos que disminuyan la huella de carbono personal y empresarial, también es necesario contribuir al desarrollo de económicas alternativas para el pequeño productor. Según el decreto 870 de 2017, el pago por servicio ambiental (PSA) es el incentivo en dinero o especie que reconoce los interesados de los servicios ambientales al propietario, poseedores u ocupantes de buena fe del predio, por las acciones de preservación y restauración en áreas y ecosistémicas estratégicas, con el fin de garantizar los servicios ambientales. Por lo anterior se concluyó que el PSA es un mecanismo de participación efectivo para los pequeños productores de cacao y para quien desee compensar su huella de carbono.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusión

Con este estudio se concluyó que las plantaciones de cacao, es especial Los sistemas agroforestales (SAF) aportan en mayor medida al almacenamiento de carbono en la biomasa total, no obstante, su importancia y contribución al medio ambiente no solo radica en la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI), sino también en la salud del suelo, ciclaje de nutrientes, conectividad entre ecosistemas estratégicos y conservación de la biodiversidad, reiterando a los SAF como sistemas sostenibles en términos ambientales y de mitigación del cambio climático. Además, los SAF contribuyen a la diversificación de productos o servicios favoreciendo el bienestar de los pequeños productores de cacao, garantizando así la seguridad alimentaria, la restauración y conservación de los servicios ecosistémicos.

En cuanto a la edad, se concluyó que este un factor importante en la captura y almacenamiento de carbono, sin embargo, es necesario tener en cuenta que los árboles más viejos desaceleran la tasa de aumento de la biomasa y por ende de captura de carbono, llegando a su punto de saturación en términos de captura. Además, se debe tener en cuenta que el potencial de las plantaciones de cacao para capturar y almacenar carbono no solo depende de la edad, sino también de diferentes factores como la densidad de siembra, las especies que se encuentran en el cultivo y el manejo del mismo.

Recomendaciones

Es importante resaltar la necesidad de diseñar y establecer una correcta estructura del sistema agroforestal, con el fin de evitar afectaciones en el cultivo de cacao como el aumento de enfermedades por exceso de sombra, y así poder aprovechar los benéficos que el SAF puede ofrecer como los altos contenidos de materia orgánica y la fijación de carbono entre otros, por lo que se recomienda a los productores el establecimiento de SAF con árboles frutales o forestales como una estrategia para el cuidado y protección de los ecosistemas estratégicos y los servicios ambientales como la reducción y captura de GEI. El pago por servicios ambientales es una buena oportunidad para vincular a los pequeños productores de cacao en los procesos de conservación de los ecosistemas estratégicos y los servicios ambientales como la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad que también se presentan en las plantaciones de cacao y los SAF.

Anexos

Figura 1: área de estudio.

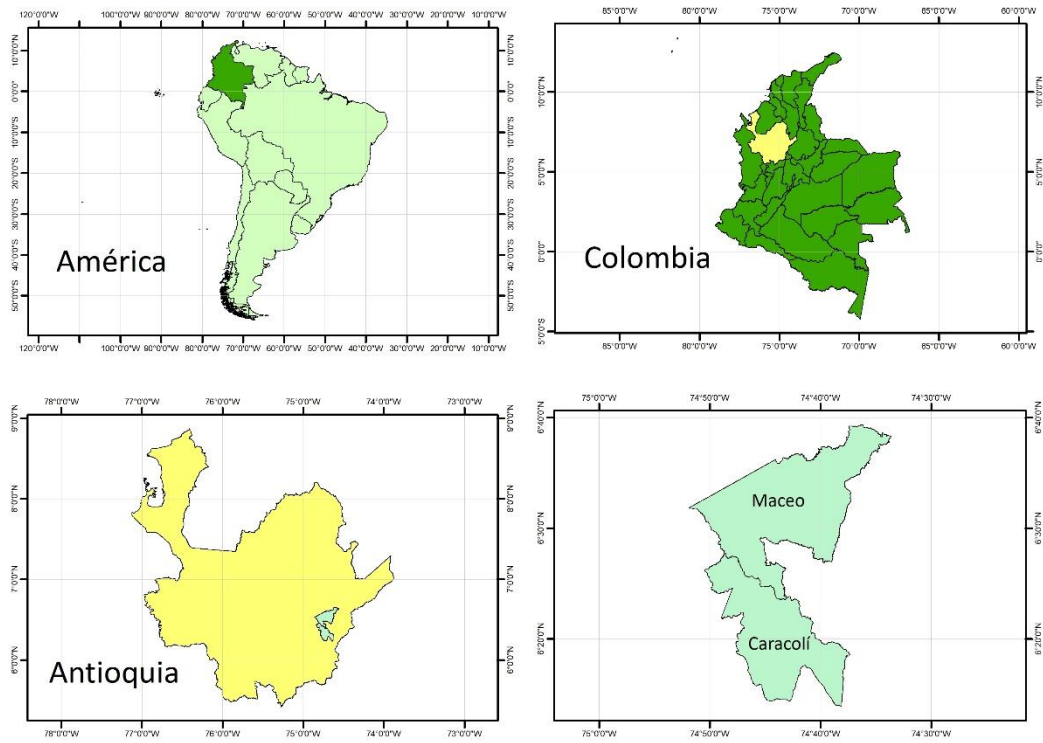
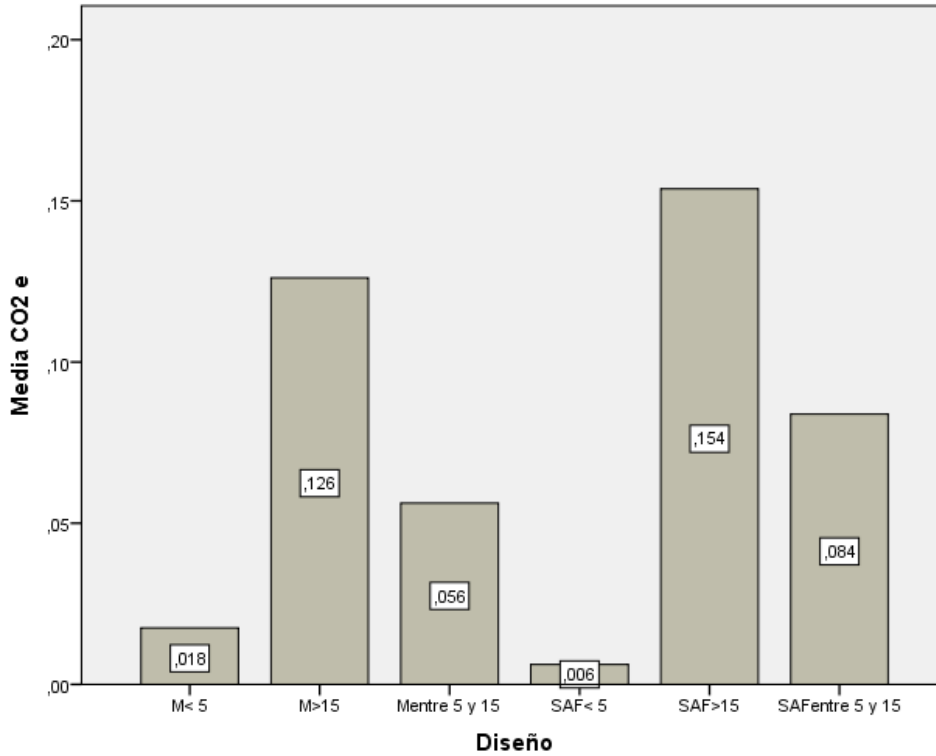


Tabla 2. Ecuaciones alométricas utilizadas en la cuantificación de la biomasa.

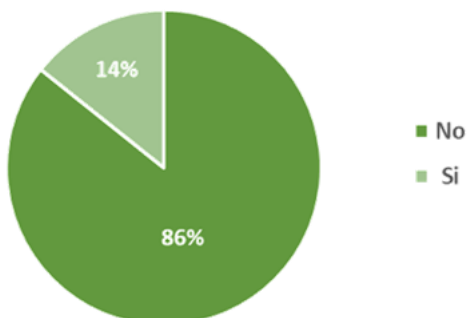
Especie	Nombre común	Formula Biomasa aérea	Autor	Fuente bibliográfica
<i>Theobroma cacao</i>	Cacao	$Bt = 10(-1,625 + 2,63 * \log(d30))$	Segura et al, (2006)	Andrade, Segura, Somarriba y Villalobos (2008)
<i>Cedrela odorata</i>	Cedro	$BA = 0,00341 * D^{3,38248}$	Benavides, et al.	Andrade et, al.2008
<i>Cordia alliodora</i>	Nogal	$\log B = -0,755 + 2,072 * \log(dap)$	Segura et al. (2006)	Artículo armero guayabal, Tolima
<i>Coffea arabica</i>	Café	$\log_{10}(BA) = -1,181 + 1,991 * \log(dap)$	Segura et al, (2006)	Yepes et al., IDEAM, 2011
<i>Tectona grandis</i>	Teca	$\log B = -0,82 + 2,38 * \log(dap)$	Pérez y Kanninen (2003)	Yepes et al., IDEAM, 2011
General	Yarumo, Almendro, Chingale, Escobo, Espadero, llovisno, Matarratón, Abarco.	$\log_{10}(BA) = -0,834 + 2,223 (\log_{10}D)$	Segura et al. (2006)	Yepes et al., IDEAM, 2011
Frutales	Aguacate, Naranja, Limón, Mandarina, Mango, Guanabana.	$Bt = 10(-1,11 + 2,64 * \log(dap))$	Segura et al. (2006)	Andrade, Segura, Somarriba y Villalobos (2008)

Grafica 1: Comparación entre la biomasa aérea de los SAF de cacao y de los monocultivos de cacao en cuanto a captura de carbono equivalente.

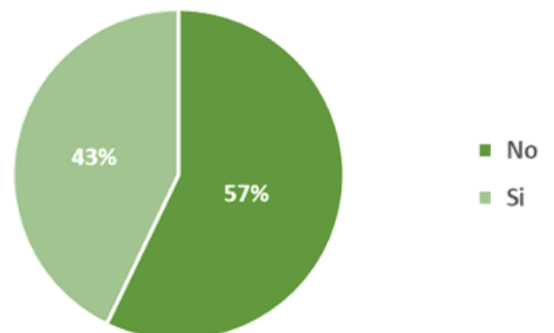


Grafica 2: Resultados encuesta de sondeo sobre pagos por servicios ambientales y bonos de carbono.

¿ Conoce que son bonos de carbono?



¿ Conoce que es pago por servicios ambientales ?



Referencias bibliográficas

Andrade, Hernán J.; Figueroa, Juliana María del Pilar; Silva, Doris P. Almacenamiento de carbono en cacaotales (*Theobroma cacao*) en Armero-Guayabal (Tolima, Colombia). *Revista Scientia Agroalimentaria*; V1. Ibagué: Universidad del Tolima, 2013. <http://repository.ut.edu.co/handle/001/1318>

Andrade, H., Segura, M., Somarriba, E., & Villalobos, M. (2008). 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*, número 46 (2008), páginas 45-50.

Casanova-Lugo, Fernando, Ramírez-Avilés, Luis, Parsons, David, Caamal-Maldonado, Arturo, Piñeiro-Vázquez, Angel T., & Díaz-Echeverría, Víctor. (2016). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales tropicales. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 22(3), 269-284. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.029>

Concha, J. Y., Alegre, J. C., & Pocomucha, V. (2007). Determinación de las reservas de Carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 6(1,2), 75-82.

Clark, D. B., Kellner, J. R. 2012. Tropical forest biomass estimation and the fallacy of misplaced concreteness. *Journal of Vegetation Science*, 23(6), 1191–1196. <http://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2012.01471>

Chao, Kuo-Jung, Phillips, O. L., Gloor, E., Monteagudo, A., Torres-Lezama A., Vásquez M. R. 2008. Growth and wood density predict tree mortality in Amazon forests. *Journal of Ecology*, 96, 281–292.

Chave, J., Muller-Landau, H.C., Baker, T.R., Easdale, T.A., ter Steege, H., Webb, C.O., 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2,456 neotropical tree species. *Ecological Applications* 16, 2356–2367.

DANE, 2018. Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo->

nacional-depoblacion-y-vivenda-2018

FINAGRO (Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario), 2018. Inteligencia de mercado: Cacao. Recuperado de: https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/ficha_cacao_version_ii.pdf

ICONTEC (2011). Protocolo de certificación de programas de compensación. Programas de compensación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero mediante la ejecución de actividades en el sector forestal. Requisitos para su certificación. Versión. 2011-01-24. Bogotá, 11 p.

IDEAM, 2014. Monitoreo y Seguimiento al fenómeno de la deforestación en Colombia. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/bosques/deforestacion-colombia>

IPCC. Land Use, Land – Use Change and Forestry. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. 2000. Disponible en: http://www.grida.no/climate/ipcc/land_use/
KOCH G, y MOONEY H. Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems. San Diego (EU): Academic Press, 1996. 443 p

IPCC. 2007. Climate Change 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC WG1 AR4 Final Report. 996 p. <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>

León-Moreno C, Molina J, Castilla-Campos C, 2019. Physiochemical characteristics of cacao (*Theobroma cacao* L.) soils in Colombia: Are they adequate to improve productivity? *Agronomía Colombiana*, 37 (1), 28-38. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v37n1/0120-9965-agc-37-01-28.pdf>

Nair, PKR Estudios de secuestro de carbono en sistemas agroforestales: una verificación de la realidad. *Agroforest Syst* 86, 243–253 (2012). <https://doi-org.ezproxy.ucaldas.edu.co/10.1007/s10457-011-9434-z>

Nair, Pk & Mohan Kumar, B. & Nair, Vimala. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 172. 10 - 23. 10.1002/jpln.200800030.

Obeng, E. A., y Aguilar, F. X. (2014). Marginal effects on biodiversity, carbon sequestration and nutrient cycling of transitions from tropical forests to cacao farming

systems

Patiño Forero, S., Suárez Santos, L. N., Andrade Castañeda, H. J., & Segura Madrigal, M. A. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 9(2), 121–134. <https://doi.org/10.22490/21456453.2312>

Poveda, V., Orozco, L., Medina, C., Cerda, R., & López, A. (2013). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, (49).

Schlegel, Bastienne. (2001). Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Universidad Austral de Chile. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. 13 p.

Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T., ... & Astorga, C. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, ecosystems & environment*, 173, 46-57.

Sánchez-Cuervo A, Aide T, Clark M, Etter A, 2012. Land Cover Change in Colombia: Surprising Forest Recovery Trends between 2001 and 2010. *PLoS ONE*, 7 (8). Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3430633/pdf/pone.0043943.pdf>

Vista de Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. (2013). *Revista de ciencias ambientales*. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/7218/7425>