

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2025,
Volumen 9, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2

CUANTIFICACIÓN DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA DE DOS SISTEMAS AGROFORESTALES (SAFS) EN LAS PROVINCIAS DE SAN IGNACIO Y JAÉN - CAJAMARCA

**CARBON QUANTIFICATION IN THE ABOVEGROUND
BIOMASS OF TWO AGROFORESTRY SYSTEMS (AFS)
IN THE PROVINCES OF SAN IGNACIO AND
JAEN – CAJAMARCA**

Segundo Sánchez Tello

Universidad Nacional de Jaén, Perú

Mariela Núñez Figueroa

Universidad Nacional de Chota, Perú

José Alejandro Romero Rojas

Universidad Nacional de Cajamarca, Perú

Sandra Judith Romero Montenegro

Universidad Nacional de Jaén, Perú

Brayan Heíns Vílchez Gíl

Universidad Nacional de Jaén, Perú

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2.17057

Cuantificación de Carbono en la Biomasa Aérea de Dos Sistemas Agroforestales (SAFS) en las Provincias de San Ignacio y Jaén - Cajamarca

Segundo Sánchez Tello¹

Segundo.sanchez@unj.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0003-4031-9430>

Universidad Nacional de Jaén
Perú

Mariela Núñez Figueroa

marielanf@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6350-1625>

Universidad Nacional de Chota
Perú

José Alejandro Romero Rojas

jromeror_epg24@unc.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0002-2527-1045>

Universidad Nacional de Cajamarca
Perú

Sandra Judith Romero Montenegro

sandra.romero@unj.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0004-9785-5650>

Universidad Nacional de Jaén
Perú

Brayan Heíns Vilchez Gíl

brayan.vilchez@unj.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0009-0708-8301>

Universidad Nacional de Jaén
Perú

RESUMEN

El presente estudio investiga la cuantificación del carbono almacenado en la biomasa aérea de dos sistemas agroforestales (SAF) contrastantes en las provincias de San Ignacio y Jaén, Cajamarca, Perú: café (*Coffea arabica*)-guaba (*Inga edulis*) y cacao (*Theobroma cacao*)-laurel (*Cordia alliodora*). El objetivo principal es evaluar y comparar la capacidad de cada SAF para actuar como sumidero de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático regional. La investigación se llevó a cabo en parcelas de muestreo aleatorio simple (MAS) de 1500 m² en cada SAF, donde se recolectaron datos dasométricos, incluyendo la circunferencia a la altura del pecho (CAP) para guaba y laurel, y la circunferencia del fuste a 0.15 m para café y 0.30 m para cacao, así como la altura total. Se aplicó un método destructivo a 20 plantas de café seleccionadas aleatoriamente para estimar la biomasa de hojas, ramas y fuste, con muestras secadas en laboratorio a 85°C y 105°C. Se utilizaron ecuaciones alométricas y un factor de conversión de biomasa a carbono para calcular la biomasa aérea total y el carbono almacenado. Los resultados permitirán comparar la eficiencia de cada SAF en la captura de carbono, proporcionar información valiosa para estrategias de gestión sostenible, y aportar datos cuantificados sobre el potencial de estos sistemas agroforestales en la mitigación del cambio climático regional.

Palabras claves: carbono, biomasa, sistemas agroforestales, variación climática, efecto invernadero

¹ Autor principal

Correspondencia: Segundo.sanchez@unj.edu.pe

Carbon Quantification in the Aboveground Biomass of Two Agroforestry Systems (AFS) in the Provinces of San Ignacio and Jaen – Cajamarca

ABSTRACT

This study investigates the quantification of carbon stored in the aboveground biomass of two contrasting agroforestry systems (AFS) in the provinces of San Ignacio and Jaen, Cajamarca, Peru: coffee (*Coffea arabica*)-guava (*Inga edulis*) and cacao (*Theobroma cacao*)-laurel (*Cordia alliodora*). The primary objective is to evaluate and compare each AFS's capacity to act as a carbon sink, contributing to regional climate change mitigation. The research was conducted in 1,500 m² simple random sampling (SRS) plots within each AFS, where dendrometric data were collected, including circumference at breast height (CBH) for guava and laurel, and trunk circumference at 0.15 m for coffee and 0.30 m for cacao, as well as total height. A destructive method was applied to 20 randomly selected coffee plants to estimate biomass from leaves, branches, and trunk, with samples dried in the laboratory at 85°C and 105°C. Allometric equations and a biomass-to-carbon conversion factor were used to calculate total aboveground biomass and stored carbon. The results will enable comparisons of the efficiency of each AFS in capturing carbon, provide valuable information for sustainable management strategies, and contribute quantified data on the potential of these agroforestry systems in mitigating regional climate change.

Keywords: carbon, biomass, agroforestry systems, climate variation, greenhouse effect

*Artículo recibido 03 Febrero 2025
Aceptado para publicación: 10 marzo 2025*



INTRODUCCIÓN

El cambio climático, intrínsecamente ligado al desarrollo socioeconómico global, representa uno de los desafíos ambientales más apremiantes de nuestro tiempo (Olivo & Soto, 2010). El incremento constante en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, impulsado por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, acelera este fenómeno (Díaz, 2022). Entre los GEI, el dióxido de carbono (CO₂) destaca como el principal contribuyente al calentamiento global, debido a su persistencia atmosférica y su capacidad para absorber la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, siendo responsable de aproximadamente el 50% del calentamiento global (Jobbágy y Jackson, 2000 citado en Casanova, et al. 2011).

Ante este panorama, la comunidad internacional ha reconocido la urgencia de adoptar medidas para mitigar las emisiones de CO₂. El Protocolo de Kioto, establecido en 1997, marcó un hito al comprometer a los países desarrollados a reducir sus emisiones. En este contexto, el secuestro de carbono, mediante su fijación y almacenamiento a largo plazo en la biomasa vegetal, emerge como una estrategia clave (Zavala y Vega, 2021). Esta captura de carbono se presenta como una alternativa viable para mitigar las consecuencias de los GEI, manteniéndolo secuestrado en forma de biomasa o en el suelo (Jurado et al., 2019).

Los sistemas agroforestales (SAF) destacan por su capacidad para capturar CO₂ a través de la fotosíntesis, incrementando significativamente la retención de carbono en comparación con los sistemas agrícolas tradicionales (Callo et al. 2002). Estos sistemas no solo mantienen, sino que incluso desarrollan las reservas de carbono en la vegetación y los suelos, fomentando prácticas sostenibles de bajos costos que minimizan la alteración del suelo y la vegetación, enfatizando la vegetación perenne y el reciclaje de nutrientes, contribuyendo así al almacenamiento de carbono a largo plazo (Nair et al, 2009).

Diversos estudios han demostrado el potencial de los SAF en el almacenamiento de carbono. Por ejemplo, Ortiz, et al. (2008) reportaron que el carbono almacenado en sistemas de cacao y laurel durante 25 años varió entre 43 y 62 t C ha⁻¹, con tasas de acumulación entre 1.7 y 2.5 t C ha⁻¹ año⁻¹. Avellán et al. (2020) comprobaron que el laurel almacenó 1.87 t de carbono en su biomasa aérea. Odar (2018) determinó la biomasa aérea total de guaba, pashaco y café.



Por otra parte, Cabrera, et al (2016) evidenciaron el carbono almacenado en hojas, ramas y fuste de café. Estos hallazgos resaltan la importancia de los SAF como estrategias sustentables para la regulación de las altas concentraciones de dióxido de carbono en el ambiente.

En este contexto, la presente investigación se enfoca en cuantificar el carbono almacenado en la biomasa aérea de dos sistemas agroforestales comunes en las provincias de San Ignacio y Jaén, en Cajamarca: café-guaba y cacao-laurel. Dada la falta de datos específicos sobre la cuantificación de carbono en estos SAF en la zona de estudio, esta investigación busca determinar si estos sistemas representan importantes sumideros de carbono, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático a nivel regional. El objetivo principal es, por lo tanto, cuantificar el carbono almacenado en la biomasa aérea de estos dos sistemas agroforestales y comparar su capacidad de almacenamiento, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones y la implementación de estrategias de gestión sostenible en la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales de Campo

Para la recolección de datos en campo, se utilizaron los siguientes materiales: GPS marca Garmin modelo Oregon 650, Balanza de 50 kg con una precisión de 10 g, Clinómetro marca Garmin. Cámara digital, Wincha de 50 m. Cinta métrica de 1.5 m. 2 rollos de pita rafia de 30 m. Machete. Pértiga de madera de 4.5 m. Frasco de pintura roja. Brocha fina. Cinta de embalaje roja. Formatos de registro. Bolígrafos. 2 sacos blancos. Pilas Duracell AA y AAA.

Materiales de Gabinete

Para el procesamiento y análisis de datos, se utilizaron los siguientes materiales: 2 laptops. Útiles de escritorio. Cable de datos.

Población, Muestra y Muestreo

Población: La población en estudio consistió en 8 hectáreas de sistemas agroforestales (SAF), distribuidas en 4 hectáreas para cada sistema (SAF1 = café + guaba y SAF2 = cacao + laurel).

Muestra: Se estableció una muestra de 1.5 hectáreas, dividida en 10 parcelas de medición de 1500 m² (0.15 ha) cada una; cinco parcelas de medición en el SAF1 (café + guaba) y cinco parcelas en el SAF2 (cacao + laurel). Para la evaluación del café en el SAF1, se establecieron cinco subparcelas de 100 m² (10m x 10m), una dentro de cada parcela de 1500 m² previamente establecida.



Muestreo: Las parcelas de medición dentro de cada SAF fueron establecidas mediante un muestreo aleatorio simple (MAS). Se consideraron las condiciones de pendiente del terreno y las áreas con densidad más homogénea para asegurar la representatividad de la muestra.

METODOLOGÍA

Se aplicó el método analítico, extrayendo datos (medidas dasométricas de los individuos evaluados) que fueron ordenados y transformados para la aplicación de las ecuaciones en los cálculos requeridos. Después de sistematizar y consolidar los datos colectados se establecieron las relaciones de causa, efecto y naturaleza.

Técnicas de Recolección de Datos

Entrevista: Se realizó una breve entrevista a los propietarios de las parcelas en estudio, con la finalidad de obtener información precisa y real sobre la estructura, área y manejo de los sistemas agroforestales que poseen (Anexo 1).

Registros: Se utilizaron formatos de medición (Anexo 2) para plasmar los datos medidos en campo, que posteriormente fueron digitalizados y procesados en Microsoft Excel.

Observaciones Directas: Fueron útiles para validar los datos registrados en los formatos y documentos.

Tomas Fotográficas: Las cuales permitieron evidenciar el levantamiento de información en campo.

Procedimientos

Delimitación y Georreferenciación de las Unidades de Muestreo

Para la colecta de los datos de esta investigación, se delimitaron 10 unidades de muestreo (parcelas de medición) de 1500 m², cinco en el SAF1 y cinco en el SAF2, es decir, una muestra de 7500 m² por cada SAF. Además, en el SAF1, se delimitaron cinco subparcelas de 100 m² en cada parcela preestablecida. La delimitación de las parcelas de medición se realizó con pita rafia color verde y una wincha de 50 m (Figuras 2 y 3). Se consideraron las zonas con plantaciones más uniformes para lograr homogeneidad en sus valores.

Medición y Registro de Variables Dasométricas

A. SAF1: Café + Guaba

En las parcelas de 1500 m² (Figura 2) se tomaron los datos de Circunferencia a la Altura del Pecho (CAP) de las plantas de guaba. Posteriormente, se midió el diámetro y la altura total de todas las plantas

de café en cada una de las subparcelas de 100 m² previamente establecidas. La circunferencia del fuste de las plantas de café fue medida con cinta métrica a 0.15 m sobre el nivel del suelo, y la altura fue estimada utilizando una pértiga de 4.5 m de largo graduada a 10 cm (Connolly & Corea, 2007).

B. SAF2: Cacao + Laurel

Los gráficos rectangulares en el SAF2 (Figura 3) representan las cinco parcelas de evaluación de cacao y laurel, en un área individual de 1500 m² (50 m x 30 m), donde se registraron los datos de diámetro y altura total de las plantas en estudio. La circunferencia del fuste de los árboles de cacao fue medida con cinta métrica a 0.30 m sobre el nivel del suelo, y la altura fue estimada utilizando la pértiga de 4.5 m de largo graduada a 10 cm (Alegre et al., 2002). En los árboles de guaba (SAF1) y laurel (SAF2) se midió la Circunferencia a la Altura del Pecho (CAP) a 1.30 m sobre el nivel del suelo, y las alturas fueron estimadas utilizando un clinómetro. Todas las medidas dasométricas fueron registradas en el formato de registro de medidas dasométricas (anexo 3).

Determinación de la Biomasa Aérea en el SAF1

Aplicación de Método Destructivo para Estimar Carbono en Café

Con la intención de ajustar una ecuación alométrica para estimar la biomasa aérea en café, se midieron, a través del método destructivo, 20 plantas de café elegidas aleatoriamente en las cinco subparcelas del SAF1. Las plantas, previamente medidas, fueron cortadas en la base, luego se separaron y pesaron por separado las hojas, ramas y fuste. Se registró el peso húmedo de cada componente, y los datos fueron registrados en el formato de registro de peso húmedo de café (anexo 4). Para determinar el peso seco, se extrajeron tres muestras de 1 kg de cada componente (hojas, ramas y fuste), obteniéndose finalmente nueve muestras para ser secadas y pesadas en laboratorio (Ramírez et al., 2014). Este procedimiento se realizó debido a que la plantación de café iba a ser renovada, por ello se optó por aplicar el método destructivo, lo cual permitiría realizar una comparación con los resultados de la aplicación de nuestra metodología (no destructiva).

Evaluación en Laboratorio

Las nueve muestras obtenidas en campo fueron pesadas (peso húmedo de la muestra) y colocadas en un sobre manila tamaño oficio, se etiquetaron para identificarlas con facilidad. El peso inicial de cada muestra fue de 1 kg, teniendo tres muestras de hojas, tres muestras de ramas y tres muestras de fuste,



que fueron secadas en una estufa a una temperatura inicial de 85°C (Ramírez et al., 2014). Los tiempos de secado fueron variables; al transcurrir aproximadamente 20 horas, las muestras de hojas obtuvieron peso constante. A las muestras de las ramas les tomó aproximadamente 45 horas para llegar al peso constante. Para acelerar el proceso de secado de las muestras de fuste, se elevó la temperatura a 105°C, y alcanzaron un peso seco constante a las 72 horas. El registro del proceso de secado de las muestras de café extraídas mediante el método destructivo, se realizó en el formato diseñado para dicho procedimiento (anexo 5).

Determinación de la Biomasa Seca de las Muestras de Café

Para determinar la biomasa seca se empleó la siguiente ecuación propuesta por Ramírez et al. (2014):

text

$$BS(c) = (PS(c) / PH(c)) * PH \quad (\text{Ec. 01})$$

Donde:

BS(c): Biomasa seca del componente (kg)

PS(c): Peso seco de la muestra (g)

PH(c): Peso húmedo de la muestra (g)

PH: Peso húmedo del componente (kg)

Determinación de la Biomasa Aérea del Café

A partir de los valores de biomasa seca de cada componente obtenidos usando la Ec. 01, se determinó la BA de cada una de las 20 plantas muestreadas, usando la ecuación propuesta por Ramírez et al. (2014):

text

$$BA_t = BS_f + BS_h + BS_r \quad (\text{Ec. 02})$$

Donde:

BA_t = Biomasa aérea total de la planta (kg)

BS_f = Biomasa seca del fuste (kg)

BS_h = Biomasa seca de las hojas (kg)

BS_r = Biomasa seca de las ramas (kg)

Determinación de Carbono en la Biomasa Aérea del Café

Para calcular la cantidad de carbono contenido en la biomasa aérea por árbol, se utilizará la metodología desarrollada por el ICRAF (2009), con la siguiente ecuación:

text

$$CT = BA_{t} * FC \quad (\text{Ec. 03})$$

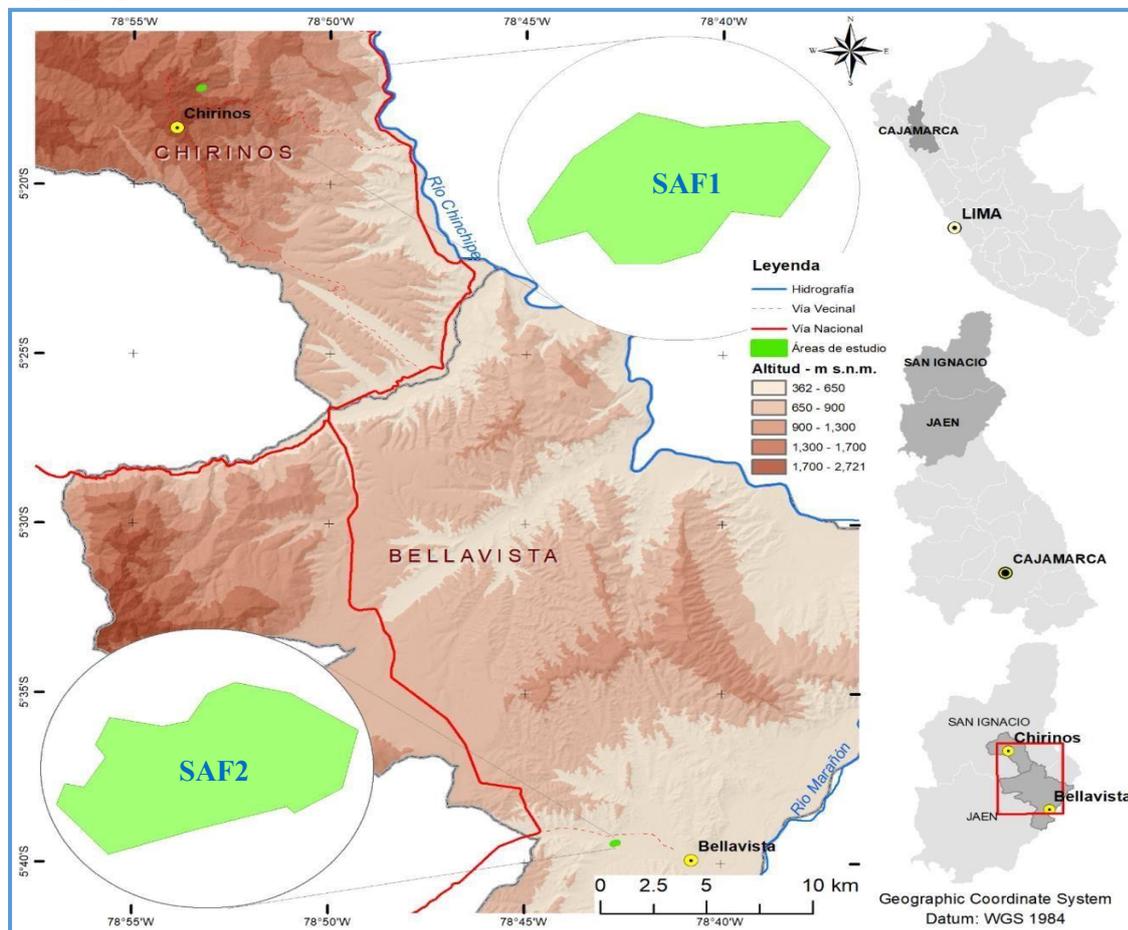
Donde:

CT: Carbono total (kg)

BA_t: Biomasa aérea total (kg)

FC: Factor de conversión de biomasa a carbono

Gráfico 1



Nota. Los shapefile distritales, provinciales y departamentales se obtuvieron de la página oficial del Instituto Geográfico del Perú.

RESULTADOS

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de la biomasa aérea y el carbono almacenado en los sistemas agroforestales (SAF) de café-guaba (SAF1) y cacao-laurel (SAF2) en las provincias de San Ignacio y Jaén, Cajamarca.

Caracterización de SAFs

EL SAF 1 tiene componentes arbóreos mixtos y multiestratificados. En las subparcelas de 100 m² se evaluaron alrededor de 473 plantas de café y en las parcelas de 1500 m² se identificaron 69 plantas guaba. Estas parcelas y subparcelas se delimitaron tomando en cuenta la distribución más homogénea posible de los individuos a evaluar. La plantación de café posee distanciamiento de 1.20m x 1.50m, los ejemplares de guaba se encuentran distribuidos al azar en toda el área del terreno. La edad promedio de instalación de café es de 14 años y de la guaba aproximadamente cuenta con 7 años.

En este SAF se determinó la existencia de dos capas sobresalientes, una formada por plantas de café con hasta 3.6 m de altura y otra compuesta por guaba con 14.25 m de altura. Además, se reconoció frutales como plátanos, pajurillos, limas y guayabas.

El SAF 2 está compuesto por cacao y laurel definiendo dos estratos muy marcados. Las parcelas de 1500 m² fueron establecidas considerando las áreas en donde los dos cultivos a evaluar estaban mejor distribuidos. En dichas parcelas se evaluaron 1413 plantas de café y 66 plantas de laurel.

La plantación de cacao posee distanciamiento de 3.0m x 3.0m, los ejemplares de laurel están distribuidos al azar en toda el área del terreno. El cacao tiene 14 años de edad y el laurel un aproximado de 25 años. Además, se evidenció dos capas de vegetación claramente diferenciable, una formada por plantas de cacao con altura hasta de 5.7 m y otra compuesta por laurel con altura máxima de 16.95 m.

Biomasa aérea de los SAFs evaluados

Los resultados expresados en toneladas por hectárea de biomasa aérea se muestran en la Tabla 1. Se observa que el SAF1 presenta una mayor cantidad de biomasa (18.93 t/ha) que el SAF2 (6.09 t/ha). También se detecta que existe heterogeneidad en los valores de biomasa entre parcelas de cada SAF.).



Tabla 1 Biomasa aérea en t/ha por SAF.

Nº de Parcela	SAF1 (t/ha)	SAF2 (t/ha)
1	11.69	4.77
2	15.95	5.98
3	16.91	4.94
4	21.01	4.03
5	29.1	10.71
Promedio	18.93	6.09

Biomasa aérea de café y guaba en el SAF1.

En la Figura 1 se muestran los valores de biomasa aérea en t/ha de café y guaba de las parcelas del SAF1. Se observa que en cada una de las parcelas el café alcanza los valores más altos y con mayor heterogeneidad, en cambio los valores de guaba son mucho más bajos y más homogéneos.

De la Figura 1 también se tiene que la mayor cantidad de biomasa aérea de café se registró en la parcela 5 (28.59 t/ha), seguido de la parcela 4, parcela 3, parcela 2 y parcela 1 con 20.42 t/ha, 16.34 t/ha, 15.48 t/ha y 11.32 t/ha respectivamente. En la evaluación de BA en guaba, la parcela 4 tiene los valores más altos con 0.59 t/ha, mientras que la parcela 1 acumuló la menor cantidad con 0.37 t/ha.

Biomasa aérea de cacao y laurel del SAF2.

De la Figura 2 se desprende que la biomasa de cacao en cada una de las parcelas del SAF2 alcanzo los mayores valores respecto a los valores de laurel. Siendo la parcela 5 en donde se aprecia la mayor diferencia entre ambos cultivos.

Respecto al cacao, se tiene que la mayor biomasa aérea se registró en la parcela 5 con 10.23 t/ha, seguida de la parcela 2, parcela 3, parcela 1 y parcela 4 con 5.16 t/ha, 4.14 t/ha, 3.98 t/ha y 2.96 t/ha respectivamente. Asimismo, la estimación de biomasa aérea de laurel reveló que la parcela 4 obtuvo la mayor cantidad con 1.07 t/ha, mientras que la parcela 5 acumuló la menor cantidad de biomasa con 0.48 t/ha.

Estadística descriptiva de la biomasa aérea de los SAFs

La Tabla 2, muestra las medidas de tendencia central y de dispersión de cada uno de los SAF'S. Se aprecia que la media del SAF1 es de 18.93 t/ha, los valores altos de desviación estándar (6.58 t/ha) y



rango (17.41 t/ha) indican una alta variabilidad entre los datos. Por otra parte, se tiene que la media del SAF2 es de 6.09 t/ha, los valores bajos de desviación estándar (2.68 t/ha) y rango (6.68 t/ha) permiten inferir una baja variabilidad entre sus datos.

Figura 1. Biomasa área de café y guaba en las parcelas del SAFI

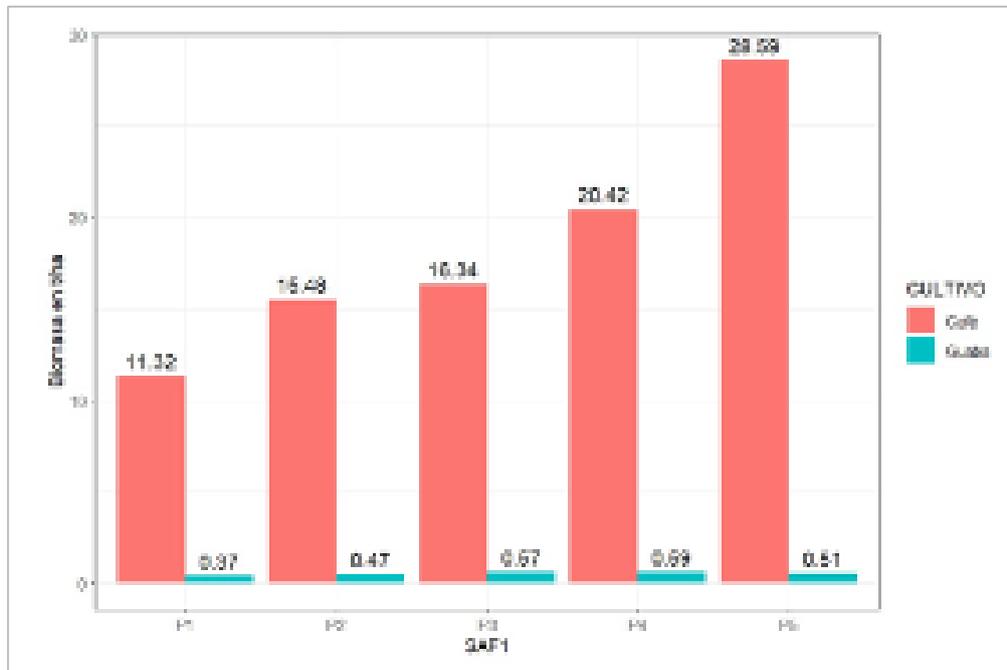


Figura 2. Biomasa área de cacao en las parcelas del SAFI

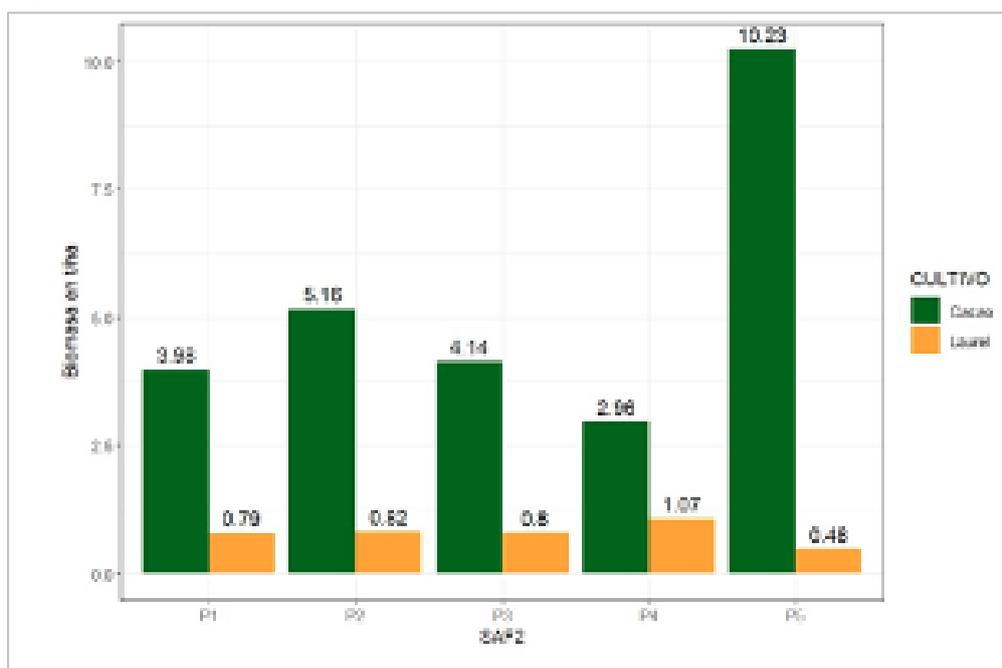


Tabla 2 Estadísticos descriptivos de la biomasa aérea en t/ha por SAF'S

SAFs	Parcelas	Media	Desv. estándar	Mínimo	Máximo	Rango
SAF1	5	18.93	6.58	11.69	29.1	17.41
SAF2	5	6.09	2.68	4.03	10.71	6.68

En el boxplot de la Figura 3 se muestra una comparación de la distribución de los datos de las parcelas de cada SAF. Se observa que el SAF1 presenta una mayor dispersión en los valores de biomasa aérea entre sus parcelas, por el contrario, el SAF2 presenta una menor dispersión entre los valores de sus parcelas. Además, el gráfico nos permite inferir la existencia de una amplia diferencia entre valores de biomasa del SAF1 respecto al SAF2.

Carbono almacenado en los SAFs

En la tabla 3 se muestran los valores de carbono almacenado expresados en toneladas por hectárea (t/ha). Se observa que el SAF1 presentó una mayor cantidad de carbono almacenado (9.47 t/ha) respecto al SAF2 (3.05 t/ha).

Tabla 3 Carbono almacenado en t/ha por SAF.

Nº de Parcela	SAF1 (t/ha)	SAF2 (t/ha)
1	5.85	2.39
2	7.98	2.99
3	8.46	2.47
4	10.51	2.02
5	14.55	5.36
Promedio	9.47	3.05

La tabla 4 sirve para ilustrar sobre los estadísticos descriptivos de la variable carbono almacenado. Tales valores reflejan, en promedio, la capacidad de retención de carbono por cada uno de los SAF'S. Además, los valores altos de desviación estándar (3.29 t/ha) y rango (8.46 t/ha) del SAF1 indican una mayor variabilidad entre las parcelas muestreadas, caso contrario sucede con las parcelas del SAF2 cuyos valores bajos de desviación estándar (1.34 t/ha) y rango (3.34 t/ha) son un indicativo de menor variabilidad y valores más cercanos a la media.



Figura 3 Boxplot de biomasa aérea

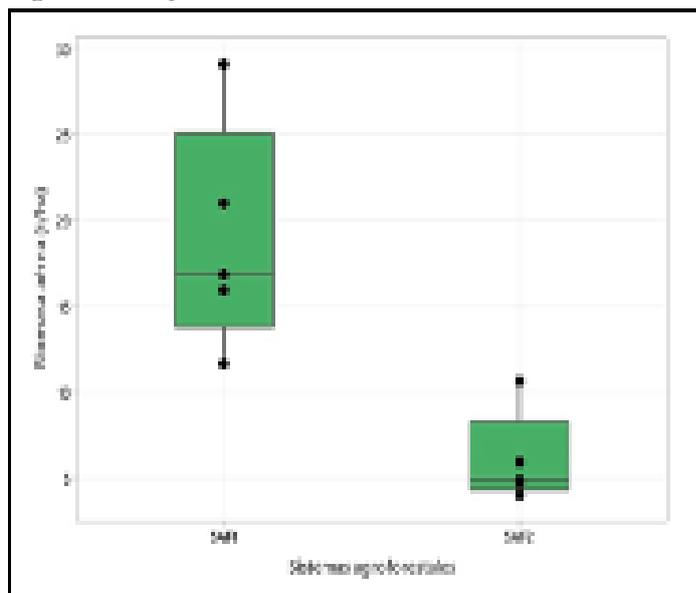


Figura 4 Boxplot de carbono almacenado en SAF1 y SAF2

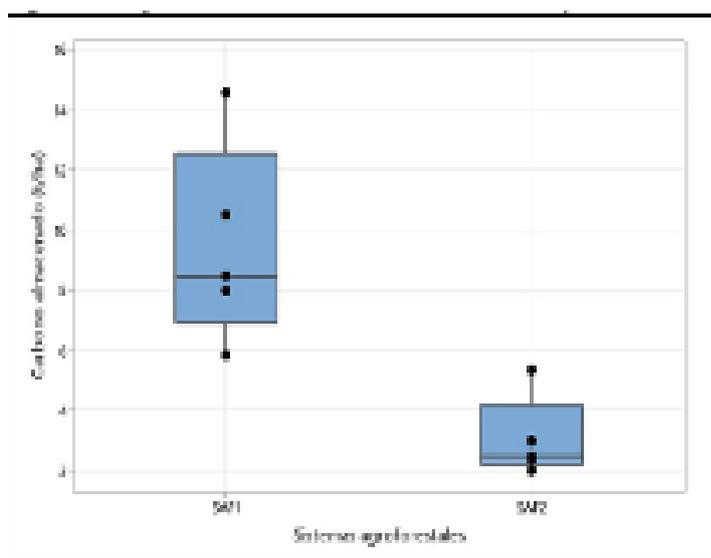


Tabla 4 Estadísticos descriptivos de Carbono almacenado en t/ha por SAF'S.

SAF's	Parcelas	Media	Desv. estándar	Mínimo	Máximo	Rango
SAF1	5	9.47	3.29	5.84	14.55	8.46
SAF2	5	3.05	1.34	2.02	5.355	3.34

La Figura 4 muestra una comparación de la distribución de los datos de carbono almacenado de las parcelas de cada SAF. Se observa que el SAF1 presenta una mayor dispersión en los valores de

carbono entre sus parcelas, por el contrario, el SAF2 presenta una menor dispersión entre los valores de sus parcelas. Además, el gráfico nos permite inferir la existencia de una amplia diferencia entre valores de carbono almacenado del SAF1 respecto al SAF2.

DISCUSIÓN

El presente estudio tuvo como objetivo cuantificar la biomasa aérea y el carbono almacenado en dos sistemas agroforestales (SAF) contrastantes en las provincias de San Ignacio y Jaén, Cajamarca: café-guaba (SAF1) y cacao-laurel (SAF2). Los resultados obtenidos revelan diferencias significativas en la biomasa aérea y el carbono almacenado entre ambos sistemas, lo que sugiere que la composición y estructura de los SAF influyen directamente en su capacidad para actuar como sumideros de carbono.

Biomasa Aérea y Estructura de los Sistemas Agroforestales

El SAF1 (café-guaba) presentó una biomasa aérea significativamente mayor (18.93 t/ha) en comparación con el SAF2 (6.09 t/ha). Esta diferencia puede atribuirse a varios factores, incluyendo la densidad de siembra, la edad de los componentes arbóreos, y las características intrínsecas de las especies involucradas. En el SAF1, la combinación de una alta densidad de plantas de café (473 plantas en subparcelas de 100 m²) y la presencia de árboles de guaba (69 plantas en parcelas de 1500 m²) contribuye a una mayor acumulación de biomasa. Además, la estructura multiestratificada del SAF1, con una capa inferior de café (hasta 3.6 m) y una capa superior de guaba (hasta 14.25 m), permite una mayor eficiencia en la utilización de los recursos y, por ende, una mayor productividad total.

En contraste, el SAF2 (cacao-laurel) presenta una estructura menos compleja y una menor densidad de plantas (1413 plantas de cacao y 66 árboles de laurel en parcelas de 1500 m²), lo que se traduce en una menor acumulación de biomasa aérea. Si bien los árboles de laurel alcanzan alturas considerables (hasta 16.95 m), su menor densidad y la predominancia del cacao como componente principal limitan la cantidad total de biomasa en el sistema.

Carbono Almacenado y Potencial de Mitigación

La mayor biomasa aérea observada en el SAF1 se traduce directamente en una mayor cantidad de carbono almacenado (9.47 t C/ha) en comparación con el SAF2 (3.05 t C/ha). Estos resultados resaltan el potencial de los SAF como estrategias de mitigación del cambio climático, al capturar CO₂ de la atmósfera y almacenarlo en la biomasa vegetal.



La variabilidad en los valores de biomasa y carbono almacenado entre las parcelas de cada SAF (como se evidencia en las Figuras 4 y 5, y en los altos valores de desviación estándar y rango para el SAF1) sugiere que existen factores locales que influyen en la productividad de estos sistemas. Estos factores podrían incluir la calidad del suelo, el manejo agronómico, la disponibilidad de agua y nutrientes, y la exposición a la luz solar. Futuras investigaciones deberían enfocarse en identificar y cuantificar estos factores, con el fin de optimizar el diseño y manejo de los SAF para maximizar su potencial de almacenamiento de carbono.

Comparación con Estudios Previos

Nuestros resultados son consistentes con hallazgos de estudios previos que han demostrado el potencial de los SAF para el almacenamiento de carbono. Por ejemplo, Ortiz et al. (2008) reportaron que el carbono almacenado en sistemas de cacao y laurel durante 25 años varió entre 43 y 62 t C ha⁻¹. Si bien nuestros resultados son inferiores a estos valores, es importante considerar que nuestro estudio se enfoca en la biomasa aérea, mientras que Ortiz et al. (2008) incluyen tanto la biomasa aérea como la biomasa subterránea.

Implicaciones para la Gestión Sostenible

Los resultados de esta investigación tienen implicaciones importantes para la gestión sostenible de los SAF en la región de Cajamarca. En particular, resaltan la importancia de promover sistemas agroforestales diversificados y multiestratificados, como el SAF1 (café-guaba), que presentan una mayor capacidad para el almacenamiento de carbono.

Es importante destacar que los SAF no solo contribuyen a la mitigación del cambio climático, sino que también brindan una amplia gama de beneficios adicionales, incluyendo la conservación de la biodiversidad, la mejora de la fertilidad del suelo, la regulación del ciclo hidrológico, y la diversificación de los ingresos para los agricultores (Nair et al., 2009).

Limitaciones del Estudio

Es importante reconocer las limitaciones de este estudio. En primer lugar, la estimación de la biomasa aérea se basó en mediciones dasométricas y ecuaciones alométricas existentes, lo que introduce un cierto grado de incertidumbre en los resultados. En segundo lugar, el estudio se enfoca únicamente en la biomasa aérea, sin considerar la biomasa subterránea ni el carbono almacenado en el suelo.



En tercer lugar, el tamaño de la muestra (5 parcelas por SAF) podría limitar la generalización de los resultados a otras áreas.

Direcciones Futuras de Investigación

Futuras investigaciones deberían enfocarse en superar estas limitaciones, mediante el uso de métodos más precisos para la estimación de la biomasa aérea, la inclusión de mediciones de biomasa subterránea y carbono en el suelo, y el aumento del tamaño de la muestra. Además, es importante investigar los factores locales que influyen en la productividad de los SAF, con el fin de optimizar su diseño y manejo para maximizar su potencial de almacenamiento de carbono. Finalmente, se recomienda realizar estudios de modelado para proyectar el impacto a largo plazo de los SAF en la mitigación del cambio climático a nivel regional y nacional.

CONCLUSIONES

La presente investigación sobre la cuantificación de biomasa aérea y carbono almacenado en sistemas agroforestales (SAF) de café-guaba (SAF1) y cacao-laurel (SAF2) en Cajamarca, Perú, permite llegar a las siguientes conclusiones:

Diferencias Significativas en Biomasa Aérea: El SAF1 (café-guaba) demostró una capacidad superior para acumular biomasa aérea (18.93 t/ha) en comparación con el SAF2 (cacao-laurel) que alcanzó 6.09 t/ha. Estas diferencias son atribuibles a la estructura multiestratificada, la mayor densidad de siembra y las características intrínsecas de las especies involucradas en el SAF1.

Mayor Almacenamiento de Carbono en SAF1: La mayor biomasa aérea del SAF1 se tradujo en un almacenamiento de carbono significativamente superior (9.47 t C/ha) en comparación con el SAF2 (3.05 t C/ha). Este hallazgo subraya el potencial del SAF1 como sumidero de carbono y su contribución a la mitigación del cambio climático.

Variabilidad Intra-Sistema: Se observó una considerable variabilidad en los valores de biomasa y carbono almacenado entre las parcelas de cada SAF, lo que sugiere la influencia de factores locales como la calidad del suelo, el manejo agronómico y la disponibilidad de recursos.

Consistencia con la Literatura: Los resultados son consistentes con estudios previos que resaltan el potencial de los SAF para el almacenamiento de carbono, aunque las cantidades específicas pueden variar dependiendo de la composición, estructura y manejo de los sistemas.



Implicaciones para la Gestión Sostenible: La promoción de SAF diversificados y multiestratificados, como el SAF1, puede mejorar significativamente el almacenamiento de carbono y brindar beneficios adicionales como la conservación de la biodiversidad y la mejora de la fertilidad del suelo.

RECOMENDACIONES

Con base en los resultados y conclusiones de esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones:

1. Fomentar la Adopción de SAF Diversificados: Promover la adopción de sistemas agroforestales diversificados y multiestratificados, como el SAF de café-guaba, en la región de Cajamarca y otras áreas con condiciones agroclimáticas similares. Estos sistemas ofrecen un mayor potencial para el almacenamiento de carbono y la provisión de servicios ecosistémicos.
2. Optimizar el Manejo Agronómico: Implementar prácticas de manejo agronómico que favorezcan el crecimiento y la productividad de los componentes arbóreos en los SAF. Esto puede incluir la selección de especies adaptadas a las condiciones locales, la fertilización adecuada, el control de plagas y enfermedades, y la poda estratégica.
3. Investigar Factores Locales: Realizar investigaciones adicionales para identificar y cuantificar los factores locales que influyen en la productividad y el almacenamiento de carbono en los SAF. Esto permitirá desarrollar estrategias de gestión específicas para cada contexto.
4. Cuantificar el Carbono en el Suelo: Ampliar el alcance de las investigaciones futuras para incluir la cuantificación del carbono almacenado en el suelo de los SAF. El suelo representa un importante reservorio de carbono, y su manejo adecuado puede aumentar significativamente el potencial de los SAF para la mitigación del cambio climático.
5. Desarrollar Ecuaciones Alométricas Específicas: Ajustar ecuaciones alométricas específicas para las especies presentes en los SAF de la región. Esto mejorará la precisión de las estimaciones de biomasa y carbono almacenado, y permitirá realizar un seguimiento más preciso de los cambios en el tiempo.
6. Implementar Programas de Monitoreo a Largo Plazo: Establecer programas de monitoreo a largo plazo para evaluar la sostenibilidad de los SAF y su contribución a la mitigación del cambio



climático. Estos programas deben incluir mediciones periódicas de biomasa, carbono en el suelo, biodiversidad y otros indicadores relevantes.

7. Incentivar la Participación de los Agricultores: Involucrar a los agricultores locales en el diseño e implementación de los programas de investigación y gestión de los SAF. Su conocimiento y experiencia son fundamentales para el éxito de estas iniciativas. Además, es importante ofrecer incentivos económicos y técnicos para fomentar la adopción de prácticas sostenibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Avellán, A, Barreto., E., y Peralta, E. (2020). Carbono en biomasa aérea, sistema agroforestal de *Theobroma cacao* L., Laboratorio Natural, Los Laureles, 2018. *Revista universitaria del Caribe*, 24(1),98-106. DOI: 10.5377/ruc.v24i01.9914
- Alegre, J., Arevalo, L. y Ricse, R. (2002). Reservas de carbono con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la Amazonia Peruana. ICRAF/INIA. Perú.
- Cabrera, N., (2016). *Estimación de biomasa aérea de Inga edulis* Mart. y *Coffea arábica* L. en el Alto Mayo, San Martín (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Cabrera, M., Vaca, S., Aguirre, F., y Aguirre, H., (2016). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales cafetaleros en las provincias de Jaén y San Ignacio, Cajamarca. *Revista científica Pakamuros*, 4(1), 43-54. <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.v4i1.42>
- Cerda, R., Espin, T., y Cifuentes, M. (2013). Carbono en sistemas agroforestales de cacao de la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas, Volumen* 49, 33- 41. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5878>
- Connolly, R., y Corea, C. (2007). *Cuantificación de la captura y almacenamiento de carbono en sistema agroforestal y forestal en seis sitios de cuatro municipios de Nicaragua* (Trabajo de diploma). Universidad Nacional Agraria - Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente. Managua, Nicaragua.
- Callo, C., Krishnamurthy, L., y Alegre, J. (2002). Secuestro De Carbono Por Sistemas Agroforestales Amazónicos. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(2), 101-106. <http://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=62980202>



- Diaz, Alejandra. (2022). *Captura de carbono en un sistema agroforestal con cacao (Theobroma cacao) en Victoria, Caldas.* (Tesis de pregrado) Universidad de Caldas. Manizales, Colombia.
- Dorian, J., Torre, T., Dominguez, G., Aguirre, O., Hernandez, F., y Jimenez, J. (2007). Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques* 13(1), 35-46. <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v13n1/1405-0471-mb-13-01-35.pdf>
- ICRAF. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales.* Obtenido de <http://www.icrafamericalatina.org/nuestros-productos/5capitalesespa%C3%B1ol.html>
- Jobbágy y Jackson. 2000. Citado en Casanova, F., Petit, J. y Solorio, J. 2011. Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico Mexicano. *Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17 (1), 5-118. DOI:10.5154/r.rchscfa.2010.08.047
- Jurado, M., Ordoñez, H., y Lagos, T. (2020). Evaluación de la captura de carbono en sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.), Consacá, Nariño, Colombia. *Luna Azul*, (51), 166–181. Doi.org/10.17151/luaz.2020.51.9
- Lapeyre Z. (2003). *Determinación de las Reservas de Carbono de la Biomasa Aérea, en Diferentes Sistemas de Uso de la Tierra en San Martín* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima- Perú.
- López, A. (2011). Aporte de los Sistemas Agroforestales al secuestro de Carbono. Turrialba, Costa Rica.
- Nair, P, Kumar, B y Nair, V. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Soil Sci.* 172, 10–23. DOI: 10.1002/jpln.200800030
- Odar, B., (2018). *Evaluación de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café (Coffea spp.) en el anexo de Vilaya, distrito de Colcamar, provincia de Luya, Amazonas, 20172018.* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Chachapoyas, Perú.
- Olivo, M., y Soto, A. (2010). Comportamiento de los gases de efecto invernadero y las temperaturas atmosféricas con sus escenarios de incremento potencial. *Universidad ciencia tecnología.* 14(57):221-230. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S131648212010000400002



- Oñate, L. (2018). *Precisión del hipsómetro Blume Leiss, clinómetro Suunto e hipsómetro láser Trupulse 360R en la medición de alturas totales de árboles de Guazuma crinita (bolaina blanca)*. (Tesis de pregrado) Universidad Nacional Intercultural De La Amazonia. Ucayali – Perú.
- Ortiz, A., Riascos, L., Somarriba E., (2008). Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). *Agroforestería en las Américas, Volumen 46, 26-29*.
<http://www.sidalc.net/repdoc/A3117E/A3117E.PDF>
- Pocomucha, V., y Alegre, J. (2014). La interacción de carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Huánuco, Perú. *Investigación y Amazonía 2013; 3(1): 36-43*. <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/79/64>
- Ramirez, C., Panduro, G., & Miranda, E. (2014). Captura de carbono en un sistema agroforestal de *Theobroma cacao* en el campus de la Universidad Nacional de Ucayali - Pucallpa - Perú. *Tzhecoen, 5(2), 1997 - 3985*.
- Silva, C., y Olaya, E. (2019). *Cuantificación de carbono almacenado en un sistema agroforestal de café (Coffea arabica L.), asociado con guaba (Inga edulis sp.), distrito Jaén – Cajamarca*. (Tesis de pregrado) Universidad Nacional de Jaén. Jaén, Perú.
- Wirth, C.; Schulze, E. y Schumecher, E. (2004). Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology, 24*, 121-139. DOI: 10.1093/treephys/24.2.121
- Zavala, José. y Vega, Liliana. (2021). *Captura y almacenamiento de carbono en distintas edades del cultivo de cacao bajo sistemas agroforestales de tingo maría*. Recuperado de <https://www.unheval.edu.pe/portal/captura-y-almacenamiento-de-carbono-en-distintasedades-del-cultivo-de-cacao-bajo-sistemas-agroforestales-de-tingo-maria/>

