

Estructura vegetal y almacenamiento de carbono de un sistema agroforestal con café en una comunidad chinanteca de Oaxaca

Vegetation structure and carbon storage of a coffee-based agroforestry system in a chinantec community in Oaxaca

Luis Miguel Toribio-Ferrer ¹  • Ana Lucía Morán-Martínez²  • Oscar Alberto Aguirre-Calderón ³ 
• Emmanuel Toribio-Ferrer ¹  • Eulalia Edith Villavicencio-Gutiérrez ⁴ 

Recibido: 10/03/2025

Aceptado: 17/06/2025

Abstract

The objective of this study was to evaluate the structure and carbon storage in a coffee agroforestry system in the Chinantec community of Santiago Tlatepusco, Oaxaca. A census was conducted in a one-hectare plot, evaluating all woody species and coffee plants, and measuring height, diameters, and coverage. The horizontal structure was analyzed using the Importance Value Index (IVI), and the stored dry biomass and carbon were quantified using specific equations. A total of 311 woody individuals were recorded, distributed among 27 species and 15 families, with *Theobroma cacao* and *Citrus sinensis* standing out for their abundance and dominance. The total coverage of the agroforestry system was 87.18 %. The total stored carbon content was 19,710 MgC ha⁻¹, with a significant contribution from the coffee plants (9,162 MgC ha⁻¹) and timber species such as *Cedrela odorata* (2,871 MgC ha⁻¹). The IVI showed that *Theobroma cacao* and *Citrus sinensis* are the most important species in the system. It was concluded that the evaluated coffee agroforestry system represents a sustainable production model with significant potential for carbon capture and biodiversity conservation, contributing to the socioeconomic development of the community.

Keywords: Agroforestry, chinantla, carbon concentration, diversity, sustainability.

1. Departamento de investigación, TF Estudios y Proyectos SA de CV; Saltillo, Coahuila; toryferrer@live.com, tf.forestales@hotmail.com
2. Dirección de Vida Silvestre, Secretaría del Medio Ambiente; Saltillo, Coahuila; ana.moran@coahuila.gob.mx
3. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León; Ciudad de Linares, Nuevo León, México; oscar.aguirrecl@uanl.edu.mx
4. Campo-Experimental Saltillo CIRNE, INIFAP; Saltillo, Coahuila; villavicencio.eulalia@inifap.gob.mx

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar la estructura y almacenamiento de carbono en un sistema agroforestal de café en la comunidad chinanteca de Santiago Tlatepusco, Oaxaca. Se realizó un censo en una parcela de una hectárea, evaluando todas las especies leñosas y las plantas de café, midiendo altura, diámetros y cobertura. La estructura horizontal se analizó mediante el Índice de Valor de Importancia (IVI), y la biomasa seca y el carbono almacenado se cuantificaron mediante ecuaciones específicas. Se registraron 311 individuos leñosos, distribuidos en 27 especies y 15 familias, destacando *Theobroma cacao* y *Citrus sinensis* por su abundancia y dominancia. La cobertura total del sistema agroforestal fue del 87,18 %. El contenido total de carbono almacenado fue de 19 710 MgC ha⁻¹, con una contribución significativa de las plantas de café (19,162 MgC ha⁻¹) y las especies maderables como *Cedrela odorata* (2,871 MgC ha⁻¹). El IVI reveló que *Theobroma cacao* y *Citrus sinensis* son las especies más importantes en el sistema. Se concluyó que el sistema agroforestal de café evaluado representa un modelo de producción sostenible con un potencial significativo para la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad, contribuyendo al desarrollo socioeconómico de la comunidad.

Palabras clave: Agroforestry, chinantla, carbon concentration, diversity, sustainability.

Introducción

El cambio climático representa una de las amenazas más grandes para la biodiversidad y los sistemas productivos en México, especialmente en las zonas tropicales como la región de Oaxaca [1]. Los sistemas agroforestales (SAF), que integran cultivos agrícolas con especies arbóreas, se han identificado como una alternativa viable para mitigar los efectos del cambio climático, mejorar la fertilidad del suelo, y promover la biodiversidad [2]. En particular, los SAF de café, comunes en el sur de México, son fundamentales no solo para la economía de muchas comunidades rurales, sino también para su capacidad de secuestrar carbono y mejorar la resiliencia ecológica [1], [3], [4]. Sin embargo, a pesar de su relevancia, la cuantificación de la biomasa y el carbono almacenado en estos sistemas sigue siendo insuficiente, particularmente en áreas indígenas como la Chinantla oaxaqueña.

La región de la Chinantla, ubicada en las montañas de Oaxaca, es hogar de comunidades indígenas chinantecas que han adoptado prácticas agrícolas sostenibles, incluyendo el uso de SAF de café [5]. En este contexto, el estudio de la estructura y el almacenamiento de carbono en estos SAF es crucial para comprender su

potencial en la mitigación del cambio climático y en la conservación de la biodiversidad local [6], [7]. Los SAF en el sur del país se caracterizan por una alta diversidad de especies, tanto frutales como maderables, que favorecen la captura de carbono y proporcionan múltiples servicios ecosistémicos a la comunidad [4], [8], [9], [10].

La importancia de estos sistemas en la captura de carbono ha sido documentada en diversos estudios a nivel nacional, que han mostrado que los SAF pueden almacenar hasta 114 MgC ha⁻¹ en especies arbóreas [11]. Además, la integración de especies nativas como *Cedrela odorata* L. y *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken en estos sistemas mejora la estabilidad ecológica y contribuye a la biodiversidad, lo cual es esencial para la sostenibilidad de los SAF [11], [12], [13]. A pesar de estos avances, existe una necesidad de estudios más específicos que permitan entender cómo los diferentes componentes del SAF, como el café y las especies frutales, contribuyen al secuestro de carbono, especialmente en zonas con alta diversidad de especies como la Chinantla.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la estructura vegetal y almacenamiento de carbono en un SAF con café en la comunidad chinanteca de Santiago Tlatepusco, Oaxaca. Se busca proporcionar información clave sobre el potencial de los SAF para la captura de carbono y cómo su implementación puede ser una herramienta eficaz para la mitigación del cambio climático en las regiones tropicales de México, al mismo tiempo que se promueve el desarrollo socioeconómico de las comunidades rurales [2], [14].

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en la parcela de una hectárea llamada Monte de los Olivos, ubicada en la comunidad chinanteca de Santiago Tlatepusco, perteneciente a la región cultural de la Chinantla, en el municipio de San Felipe Usila, Oaxaca (Figura 1), entre las coordenadas geográficas 17°49'55" latitud norte y 96°30'40" longitud oeste, a una altitud de 265 msnm. El clima de la zona es cálido húmedo (Am), con temperaturas que oscilan entre 15,5 °C y 44 °C, y una precipitación anual que varía de 1 200 a 2 000 mm [15], [16]; la vegetación predominante de la zona es vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia [17]. En el área de estudio, el sistema agroforestal de café establecida en 2018 con dos variedades (*Coffea arabica* L. cv. Mundo Novo y Caturra) presenta una densidad de 1 600 individuos ha⁻¹; durante su establecimiento, se conservaron las especies frutales y forestales maderables que proporcionan sombra al cultivo. En 2022, se plantaron nuevos individuos de

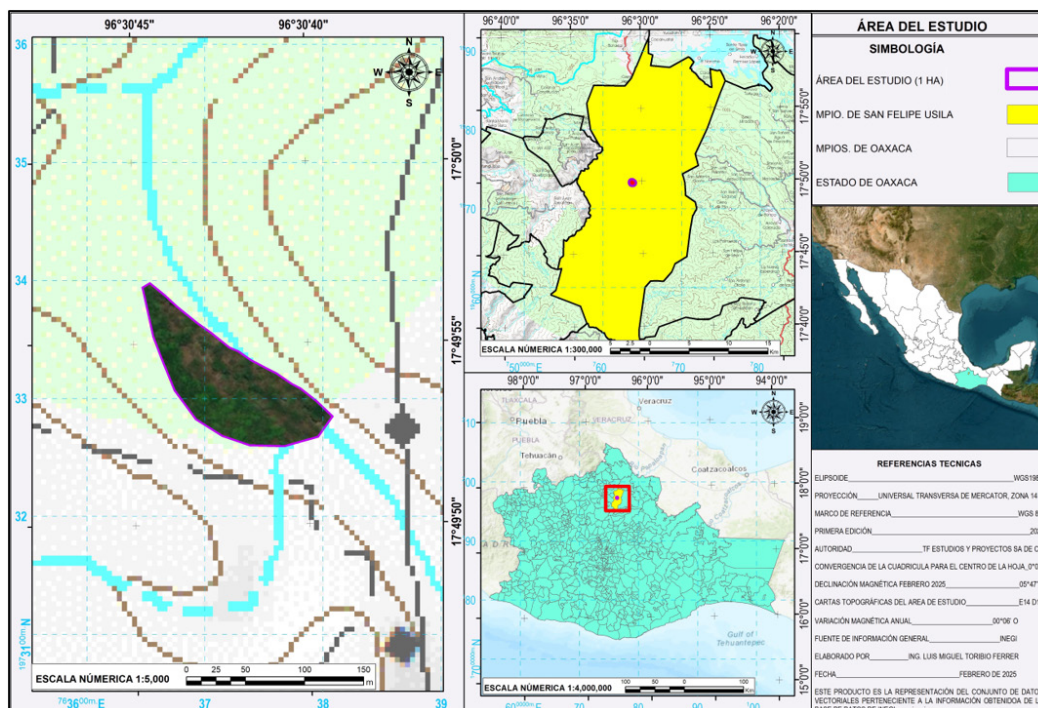


Figura 1. Localización del área de estudio en el municipio de San Felipe Usila, Oaxaca. (Comunidad de Santiago Tlatepusco, región de la Chinantla).

Figure 1. Location of the study area in the municipality of San Felipe Usila, Oaxaca. (Santiago Tlatepusco community, Chinantla region).

especies frutales, los cuales se encuentran en etapas juveniles y distribuidos de forma aleatoria en la parcela.

Evaluación en campo

Durante los meses de noviembre y diciembre de 2024, se llevó a cabo un censo en la parcela, evaluando todas las especies vegetales presentes: árboles, arbustos, palmas y plantas de café. Se midió la altura total (H), utilizando un clinómetro Suunto® PM5/360PC para las especies maderables (árboles y palmas) y un flexómetro Truper® modelo 12696 para arbustos y plantas de café; el diámetro basal (DB) y el diámetro normal (DN) se midieron con una cinta diamétrica Modelo 283D/5 m, 160 cm diámetro, mientras que el diámetro de copa (N-S y E-O) se determinó con el flexómetro. La identificación de las especies se realizó con apoyo del propietario y fue verificada en la plataforma de Tropicos® [18].

Análisis de la estructura horizontal arbórea

La estructura horizontal se evaluó mediante el Índice de Valor de Importancia (IVI) [19], el cual mide el peso ecológico de cada especie dentro de la comunidad; para su cálculo, se utilizaron los valores relativos de abundancia (ARI) y dominancia (DRI) (Cuadro 1) [20]. Aunque suele incluir la frecuencia relativa [21], su evaluación con solo dos variables es válida cuando

se realiza un censo en la población vegetal [19]. La dominancia se determinó a partir del área de copa (AC) de cada especie, extrapolada a hectárea [22]. En el análisis de la estructura no se consideró el café debido a su alta densidad, pero sí se incluyeron todas las especies leñosas, y el cálculo del IVI junto con la generación de gráficos se realizaron en el “software R”, versión 4.0.2 [23].

Cuantificación de la biomasa seca y carbono almacenado

La biomasa seca aérea (BA en kg) por individuo se estimó utilizando ecuaciones alométricas específicas por especie (Cuadro 2), seleccionadas con base en estudios previos desarrollados en condiciones ecológicas y estructurales similares a las del área de estudio [12], [24]. El área basal (AB) se calculó a partir del DN medido a 1,30 m de altura [19], y la densidad de la madera (Wd) se obtuvo de investigaciones previas sobre las especies presentes en el área de estudio [25], [26]. Estudios recientes han determinado que el contenido de carbono representa, en promedio, el 50 % de la biomasa seca [27], aunque este valor puede variar según la especie y la edad [28]. En el presente trabajo, el carbono almacenado se estimó como el 50 % de la biomasa seca, siguiendo la recomendación para

Cuadro 1. Fórmulas utilizadas para estimar el índice de valor de importancia y la estructura horizontal arbórea en el sistema agroforestal Monte de los Olivos, Santiago Tlapeusco.

Table 1. Formulas used to estimate the importance value index and tree horizontal structure in the Monte de los Olivos agroforestry system, Santiago Tlapeusco.

Ecuaciones	Descripción
$Ai = (Ni/S)$ $ARI = (Ai/\sum Ai) * 100$	Ai = Abundancia absoluta Ni = Número de individuos de la especie i S = Superficie muestreada (ha) ARI = Abundancia relativa de la especie i con relación a la abundancia total
$Di = (ACi/S)$ $DRI = (Di/\sum Di) * 100$	Di = Dominancia absoluta ACi = Área de copa de la especie i S = Superficie (ha) DRI = Dominancia relativa de la especie i con relación a la dominancia total
$IVI = (ARI + DRI)/2$	ARI = Abundancia relativa de la especie i DRI = Dominancia relativa de la especie i IVI = Índice de Valor de Importancia

especies hojosas en ausencia de datos específicos sobre especies frutales [29].

Resultados y discusión

Abundancia

Se registro un total de 311 individuos, distribuidos en 27 especies y 15 familias, destacando Anacardiaceae, Fabaceae y Rutaceae como las más representadas con tres o más especies. *Theobroma cacao* L. presentó (19,29 %), seguidas de *Citrus sinensis* (L.) Osbeck (9,32 %), *T. cacao* L. var. tigre (7,68 %) y *Musa paradisiaca* L. (7,71 %) (Figura 2A). La predominancia de especies cultivadas con valor agroproductivo coincide con lo reportado en SAF de Tabasco, donde las especies frutales dominan en la composición florísticas [12]. No obstante, la densidad observada en este estudio fue mayor en comparación con lo documentada en SAF tradicionales de Chiapas, donde se registraron 279 individuos pertenecientes a 23 especies, lo que sugiere que las prácticas de manejo pueden reducir la heterogeneidad estructural del sistema [4]. Estudios previos han indicado que los SAF diversificados pueden mejorar la estabilidad ecológica y los servicios ecosistémicos, mientras que aquellos con menor diversidad tienden a ser más vulnerables a plagas y enfermedades [2].

La abundancia de especies arbóreas nativas como *C. odorata*, *C. alliodora*, *Inga inicuill* (Kunth) DC y *Persea schiedeana* Nees en SAF refleja su importancia ecológica y económica en la región [11], [12], [13]. En el presente estudio, *C. odorata* mostró una densidad de 23 árboles ha⁻¹ (7,40 %), mientras que *C. alliodora*

e *I. inicuill* registran 12 individuos ha⁻¹ (3,86 % cada una), y *P. schiedeana* alcanzó 10 individuos ha⁻¹ (3,22 %). Estos valores coinciden con estudios realizados en SAF de cacao en Tabasco, México, donde *C. odorata* fue la más abundante con 23,33 % y en tercer lugar *C. alliodora* con 11 % [43]. En SAF de café en Chiapas, los géneros cordia e inga se destacaron por su riqueza específica, con tres especies cada uno [4].

Las especies con menor densidad fueron *Byrsonima crassifolia* (L.) Kunth. y *Nephelium lappaceum* L., con una representación total de 0,64 % de la abundancia. La mayor parte de la producción de estos árboles frutales se destina al autoconsumo de la familia propietaria. Las especies con menores densidades corresponden a aquellas establecidas en 2022, con el propósito de aumentar la diversidad de frutas en el SAF.

Dominancia

La cobertura de las especies leñosas alcanzó los 4 223,38 m² ha⁻¹, lo que representa el 42,23 % de la superficie de estudio, por su parte, las plantas de café registraron una cobertura de 4 494,94 m² ha⁻¹ (44,94 %). En conjunto, la cobertura total de SAF ascendió al 87,18 %; un valor comparable al reportado en SAF de café con especies frutales, cuya cobertura oscila entre 87 % y 100 % [42]. La mayor dominancia en cobertura sin considerar a las plantas de café correspondió a *T. cacao* (874,08 m² ha⁻¹, 20,70 %), seguido de *C. odorata* (581,70 m² ha⁻¹, 13,77 %) y *C. sinensis* (561,17 m² ha⁻¹, 13,29 %) (Figura 2B). Estos valores de dominancia relativa son comparables a los reportados en otros SAF de café y cacao, donde *C. sinensis* vario entre 9,76 y 23,49 %, *C. odorata* con un rango de 10,28 y 59,61 % [4], [42].

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas específicas utilizadas para estimar la biomasa aérea (kg) en el sistema agroforestal Monte de los Olivos, Santiago Tlapeusco.

Table 2. Species-specific allometric equations used to estimate aboveground biomass (kg) in the Monte de los Olivos agroforestry system, Santiago Tlapeusco.

Nombre científico	Ecuaciones alométricas	Fuentes
<i>Annona reticulata</i> L.	$BA = \text{Exp}(-1,716) \cdot (DN)^{2,413}$	[30]
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth.	$BA = \text{Exp}(-2,286 + 2,471 \cdot \ln(DN))$	[31]
<i>Cedrela odorata</i> L.	$BA = 0,00341 \cdot (DN)^{3,38248}$	[32]
<i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm.	$BA = -3,3488 + 2,7483 \cdot \ln(DN)$	[33]
<i>Citrus limon</i> (L.) Burm. f.	$BA = 10^{((-1,11 + 2,64 \cdot \log(DN)))}$	[34]
<i>Citrus reticulata</i> Blanco	$BA = 6,64 + 0,279 \cdot AB + 0,000514 \cdot (AB)^2$	[11]
<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck	$BA = 6,64 + 0,279 \cdot AB + 0,000514 \cdot (AB)^2$	[11]
<i>Cocos nucifera</i> L.	$BA = 4,5 + 7,7 \cdot H$	[35]
<i>Coffea arabica</i> L. cv. Caturra	$BA = 0,2811 \cdot (DN)^{2,0635}$	[11]
<i>Coffea arabica</i> L. cv. Mundo Novo	$BA = 0,2811 \cdot (DN)^{2,0635}$	[11]
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken	$BA = (0,0391 \cdot ((DBH^2 H)^{0,5151}) + (0,0085 \cdot (DB^2 H)^{1,045}) + (0,0853 \cdot ((DB^2 H)^{0,5345}))$	[36]
<i>Inga inicuil</i> (Kunth) DC	$BA = \text{Exp}(-1,76) \cdot (DN)^{2,26}$	[37]
<i>Inga vera</i> Willd	$BA = \text{Exp}(-1,76) \cdot (DN)^{2,26}$	[37]
<i>Litchi chinensis</i> Sonn	$BA = 0,0673 \cdot ((Wd(DN)^2 H)^{0,976})$	[38]
<i>Mangifera indica</i> L. 'Manila'	$BA = 0,0530 \cdot (DN^2 H^{0,7})^{1,0072}$	[12]
<i>Mangifera indica</i> L. 'Petacón'	$BA = 0,0530 \cdot (DN^2 H^{0,7})^{1,0072}$	[12]
<i>Manilkara zapota</i> (L.) P.Royen	$BA = 0,0447 \cdot (DN^2 H)$	[8]
<i>Musa acuminata</i> Colla	$BA = -0,0927 + 0,0203 \cdot DN^2$	[9]
<i>Musa paradisiaca</i> L.	$BA = -0,0927 + 0,0203 \cdot DN^2$	[9]
<i>Nephelium lappaceum</i> L.	$BA = 0,0673 \cdot Wd(DN^2 H)^{0,976}$	[38]
<i>Persea americana</i> Mill.	$BA = 0,0509 \cdot (Wd(DN)^2 H)$	[39]
<i>Persea schiedeana</i> Nees	$BA = 0,0509 \cdot (Wd(DN)^2 H)$	[39]
<i>Pouteria sapota</i> (Jacq.) H.E. Moore & Stearn	$BA = 0,0447 \cdot (DN)^2 H$	[8]
<i>Psidium friedrichsthalianum</i> O. Berg.	$BA = 0,246689 \cdot (DN)^{2,24992}$	[40]
<i>Spondias mombin</i> L.	$BA = \text{Exp}(-1,716) \cdot (DN)^{2,413}$	[30]
<i>Spondias purpurea</i> L.	$BA = \text{Exp}(-1,716) \cdot (DN)^{2,413}$	[30]
<i>Tamarindus indica</i> L.	$BA = 0,112 \cdot (Wd(DN)^2 H)^{0,916}$	[39]
<i>Theobroma cacao</i> L.	$BA = 0,202 \cdot (DB)^{2,112}$	[41]
<i>Theobroma cacao</i> L. var. tigre	$BA = 0,202 \cdot (DB)^{2,112}$	[41]

Las especies con la menor dominancia relativa fueron *B. crassifolia* (0,42 %), *N. lappaceum* (0,41 %) y *Spondias purpurea* L. (0,37 %); en contraste, las especies nativas presentaron una dominancia promedio destacada, con *C. alliodora* (7,04 %), *I. inicuil* (3,36 %) y *P. schiedeana* (3,36 %). Esta dominancia en cobertura de las especies nativas puede atribuirse a su mayor altura y mayor volumen en follaje en comparación con las especies frutales de la parcela. La predominancia de las especies nativas puede contribuir a la estabilidad y biodiversidad de los SAF [4], [13], [42], además de proporcionar productos útiles como la leña, tablas y cercas vivas [12].

Índice de valor de importancia

T. cacao (19,99 %) y *C. sinensis* (11,31 %) fueron las especies con mayor valor de importancia, lo que resalta su relevancia productiva en el sistema agroforestal. La alta demanda de *T. cacao* en la comunidad indígena se debe a su uso en la preparación del popo (atole tradicional), especialmente en diciembre [44], [45], [46]. En tanto, la producción de *C. sinensis* se destina al autoconsumo y la venta local. Las especies maderables nativas *C. odorata* (10,58 %), *C. alliodora* (8,18 %) y *P. schiedeana* (3,31 %) presentan un alto valor en los SAF

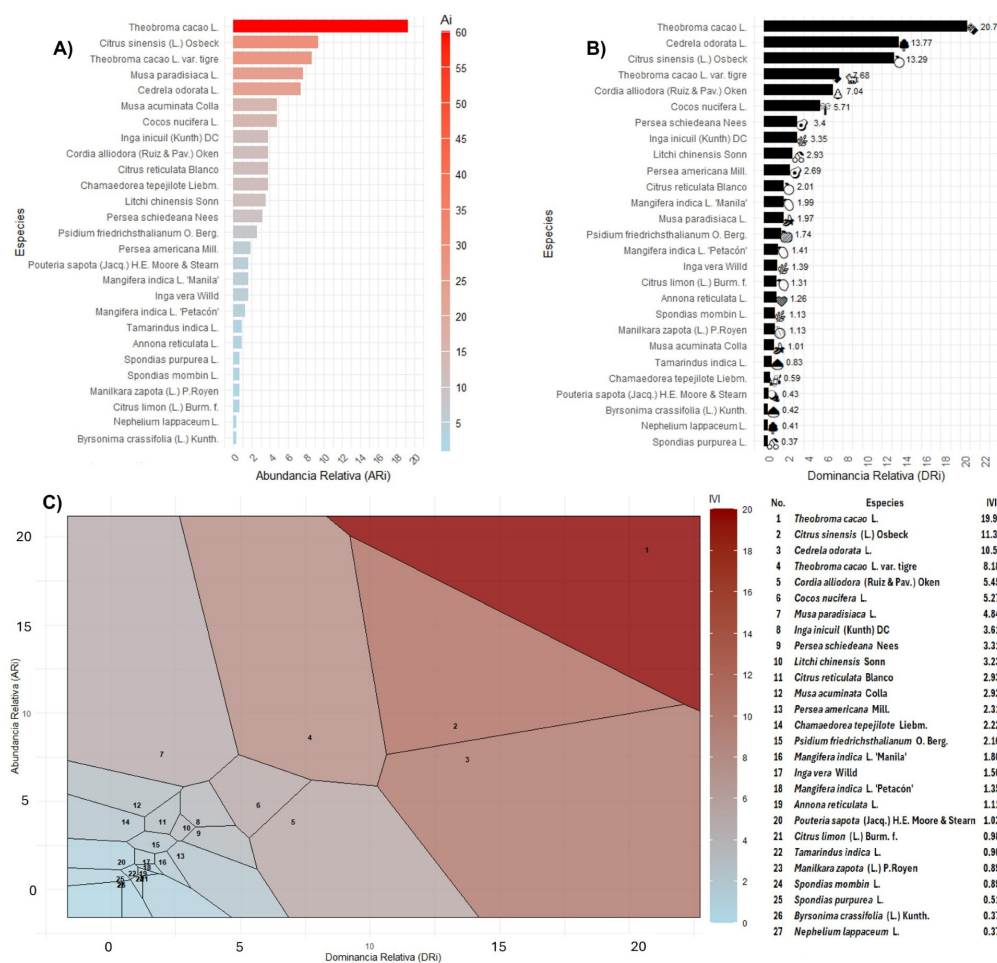


Figura 2. Abundancia relativa (A), dominancia relativa (B) e índice de valor de importancia (C), de las especies arbóreas presentes el Sistema Agroforestal (SAF) Monte de los Olivos, Santiago Tlatepusco.

Figure 2. Relative abundance (A), relative dominance (B), and Importance Value Index (C) of the tree species present in the Agroforestry System (SAF) Monte de los Olivos, Santiago Tlatepusco.

por sus diversos usos, incluyendo madera, medicina, cercos vivos, sombra, leña, artesanías y apicultura [39]. Las especies *Musa paradisiaca* L. y *Musa acuminata* Colla presentaron un IVI de 4,84 y 2,92 %, respectivamente, valores comparables a los reportados en otros SAF de cacao [12], [42]. En contraste, *C. alliodora*, principal especie empleada como sombra en cultivos de café, ha mostrado un IVI que varía entre 36,00 % y 74,1 % en otros estudios [4], [13], valores considerablemente superiores a los registrados en el presente trabajo.

En el diagrama de Voronoi (Figura 2C) se observa que *Citrus limon* (L.) Burm. f., *Tamarindus indica* L., *Manilkara zapota* (L.) P. Royen, *Spondias mombin* L., *Spondias purpurea* L., *Byrsonima crassifolia* y *Nephelium lappaceum* presentaron los valores de importancia más bajos, con un IVI inferior al 1 %, a pesar de su baja presencia en el SAF, estas especies

frutales son comunes en los sistemas agroforestales de café en la comunidad de Santiago Tlatepusco, donde se destinan sus productos principalmente al autoconsumo.

Contenido de carbono almacenado

El contenido total de carbono en la parcela fue de 19,710 MgC ha⁻¹, ubicándose dentro de los rangos reportados en estudios previos sobre SAF de café, donde los valores para arbustos varían entre 1,46 y 11,97 MgC ha⁻¹ [3], y para especies arbóreas entre 2,00 y 114,00 MgC ha⁻¹ [11]. Las dos variedades de café contribuyeron significativamente al almacenamiento de carbono, con un total de 9,162 MgC ha⁻¹, consolidándose como los principales aportantes en el sistema. Monchabajoy-Cañar et al. [47] señalan que el contenido de carbono en los SAF de café está estrechamente relacionado con la densidad de los árboles de sombra. En su estudio, se reportó que los cafetales sin sombra pueden almacenar hasta 11,400 MgC ha⁻¹, mientras que, en sistemas

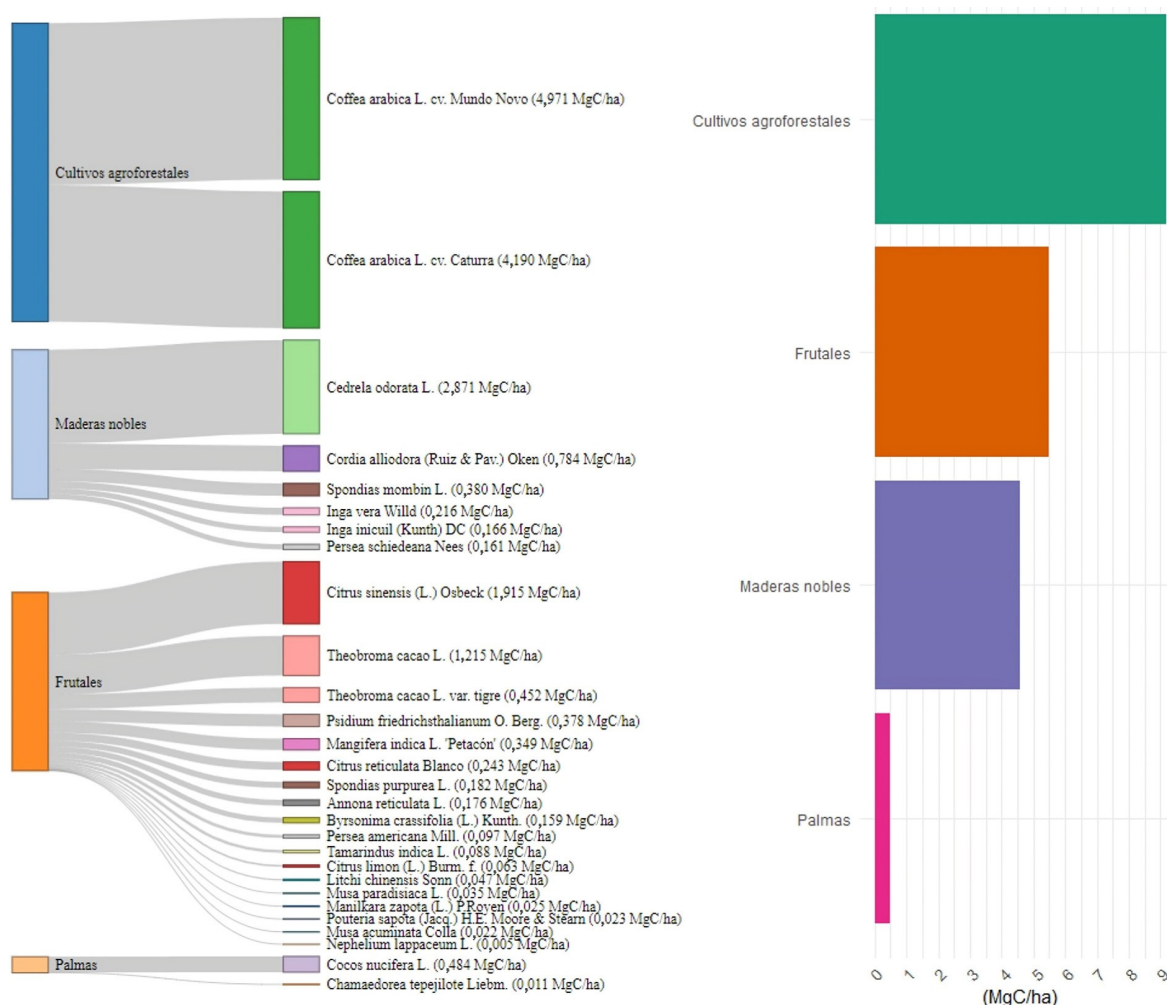


Figura 3. Contenido de carbono aérea en especies del Sistema Agroforestal (SAF) de la parcela Monte de los Olivos en la comunidad chinanteca de Santiago Tlatepusco, San Felipe Usila, Oaxaca.

Figure 3. Aboveground carbon content of the Agroforestry System (SAF) species of the Monte de los Olivos plot in the Chinantec community of Santiago Tlatepusco, San Felipe Usila, Oaxaca.

con alta densidad arbórea alcanzan valores de hasta 238,800 MgC ha⁻¹. No obstante, esta variabilidad está influenciada por la edad de los árboles y las especies utilizadas para el sombreado.

Las especies frutales registraron un contenido total de carbono de 5,475 MgC ha⁻¹, destacando entre ellas *C. sinensis* con 1,915 MgC ha⁻¹, seguido por *T. cacao* con 1,215 MgC ha⁻¹, *Psidium friedrichsthalianum* O. Berg. con 0,378 MgC ha⁻¹ y *Mangifera indica* L. 'Petacón' con 0,349 MgC ha⁻¹ (Figura 3), su alta presencia en el sistema responde a su importancia en la producción de alimentos para la comunidad. Estudios previos en SAF de cacao han reportado valores superiores para *C. sinensis* (3,40 MgC ha⁻¹) y *M. indica* (1,93 MgC ha⁻¹) [48], lo que indica que factores como la edad de los árboles, la densidad del sistema y las condiciones edafoclimáticas pueden influir en la acumulación de carbono. Por otro

lado, las especies maderables presentaron un mayor almacenamiento de carbono en comparación con SAF de cacao [48], destacando *C. odorata* (2,871 MgC ha⁻¹), *C. alliodora* (0,78 MgC ha⁻¹) e *I. vega* (0,216 MgC ha⁻¹). Estas especies poseen múltiples usos en las comunidades indígenas [46], particularmente en aquellas con una fuerte vinculación cultural y espiritual con los recursos forestales endémicos [44].

A pesar de que las palmas no son especies comúnmente utilizadas en los SAF de café, su alto valor comercial en la región ha favorecido su integración como árboles de sombra para optimizar la producción de coco. En la parcela de estudio, estas especies presentan un almacenamiento de carbono de 0,496 MgC ha⁻¹ (Figura 3). No obstante, dado su alta densidad y el predominio de individuos en etapa juvenil, se proyecta un incremento

significativo en su contribución al secuestro de carbono en los próximos años.

Los SAF representan un modelo de producción sostenible que integra especies arbóreas, cultivos agrícolas y, en algunos casos, especies pecuarias, favoreciendo la estabilidad ecológica y la provisión de servicios ecosistémicos clave [11], [12]. Estos sistemas han demostrado contribuir significativamente a la captura y almacenamiento de carbono, con valores de 114,00 MgC ha⁻¹ en especies arbóreas y hasta 238,800 MgC ha⁻¹ en sistemas con alta densidad de sombra [47]. En particular, la combinación de especies frutales y maderables optimiza la funcionalidad del sistema al incrementar la diversidad estructural, mejorar la eficiencia en el uso de recursos y reducir la vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos [8], [9], [37]. Además, los SAF desempeñan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad al mantener hábitats para fauna y flora silvestres, al tiempo que proveen beneficios socioeconómicos para las comunidades locales, a través de la producción de alimentos, madera, leña y otros productos forestales no maderables. La implementación de SAF diversificados no solo contribuye a la mitigación del cambio climático mediante el secuestro de carbono, sino que también favorece la conservación de la biodiversidad, la restauración de los suelos y la sostenibilidad de los sistemas productivos a largo plazo [4], [2].

Conclusiones

El sistema agroforestal de café evaluado presentó una estructura vegetal diversificada, con un total de 311 individuos leñosas, correspondientes a 27 especies y 15 familias. Las especies más abundantes fueron *Theobroma cacao* (19,29 %) y *Citrus sinensis* (9,32 %), mientras que *Cedrela odorata* fue la especie maderable nativa con mayor densidad (23 árboles ha⁻¹). La cobertura total del sistema agroforestal fue de 87,18 %, siendo *T. cacao* la especie con mayor cobertura (874,08 m² ha⁻¹). Según el Índice de Valor de Importancia (IVI), *T. cacao* y *C. sinensis* obtuvieron los mayores valores (19,99 % y 11,31 %, respectivamente), lo que confirma su papel central en el sistema.

El contenido total de carbono almacenado fue de 19,710 MgC ha⁻¹, de los cuales 9,162 MgC ha⁻¹ fueron aportados por las plantas de café. Las especies frutales contribuyeron con 5,475 MgC ha⁻¹, destacando *C. sinensis* (1,915 MgC ha⁻¹) y *T. cacao* (1,215 MgC ha⁻¹). Las especies maderables aportaron 4,040 MgC ha⁻¹, siendo *C. odorata* la principal (2,871 MgC ha⁻¹).

El sistema agroforestal estudiado demuestra un alto potencial para la captura de carbono, así como para

la conservación de la biodiversidad y el desarrollo sostenible. Su diseño multiespecífico, la alta densidad de individuos y el mantenimiento de especies nativas permiten optimizar la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para las comunidades rurales.

Agradecimientos

Expresamos nuestro sincero agradecimiento al Sr. Victorino T. Cruz, propietario de la parcela, por su valioso apoyo durante la recolección de datos dendrométricos en el campo, cuyo compromiso y colaboración fueron esenciales para la realización de este estudio.

Referencias

- [1] M. A. Altieri y C. Nicholls, "Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas," *Agroecología*, vol. 3, Dic., pp. 7-24, 2008.
- [2] F. Casanova-Lugo, et al., "Servicios ambientales de los sistemas agroforestales tropicales," *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, vol. 22, no. 3, Apr., pp. 269-284, 2016. 10.5154/r.rchscfa.2015.06.029
- [3] E. Valdés-Velarde, et al., "Servicio ecosistémico de carbono almacenado en cafetales bajo sombra en sistema agroforestal," *Remexca*, vol. 13, no. 28, Sep-Oct., pp. 287-297, 2022. doi: 10.29312/remexca.v13i28.3283
- [4] J. Reyes-Reyes, et al., "Diversidad y estructura de los árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco, Chiapas," *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 13 no. 71, May-Jun., pp. 4-27, 2002. doi: 10.29298/rmcf.v13i71.1191
- [5] A. P. Teresa, "Población y recursos en la región chinanteca de Oaxaca," *Desacatos Revista de Ciencias Sociales*, no. 1, Jul., pp. 125-151, 1999. doi: 10.29340/1.1278
- [6] P. K. Ramachandran, et al., "Agroforestry as a strategy for carbon sequestration," *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 172, no. 1, Feb., pp. 10-23, 2009. doi: 10.1002/jpln.200800030
- [7] R. J. Zomer, et al., "Global Tree Cover and Biomass Carbon on Agricultural Land: The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets," *Scientific Reports*, vol. 6, no. 1, Jul., pp. 1-12, 2016. doi: 10.1038/srep29987
- [8] M. A. Cairns, et al., "Composition and aboveground tree biomass of a dry semi-evergreen forest on Mexico's Yucatan Peninsula," *Forest Ecology and Management*, vol. 86, Dec., pp. 125-132, 2003. doi: 10.1016/S0378-1127(03)00229-9
- [9] A. Alcudia-Aguilar, et al., "Home garden agrobiodiversity in cultural landscapes in the tropical lowlands of Tabasco, México," *Agroforestry Systems*, vol. 92, no. 5, Feb., pp. 1329-1339, 2017. doi: 10.1007/s10457-017-0078-5
- [10] V. L. Morán-Villa, et al., "Floristic composition and arrangement of agroforestry systems of cocoa in Tabasco,

- México,” Tropical and Subtropical Agroecosystems, vol. 25, no. 2, Mar., pp. 1-19, 2022. doi: 10.56369/tsaes.3840
- [11] W. Espinoza-Domínguez, et al., “Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café,” Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente, vol. 18, no. 1, Dic., pp. 57-70, 2012. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.04.030
- [12] P. Salvador-Morales, et al., “Estructura y carbono específico en una cronosecuencia de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en Tabasco, México,” Madera y Bosques, vol. 26, no. 3, Dic., e2632131, 2020. doi: 10.21829/myb.2020.2632131
- [13] L. E. García-Mayoral, et al., “Estructura y diversidad arbórea en sistemas agroforestales de café en la Sierra de Atoyac, Veracruz,” Madera y Bosque, vol. 21, no. 3, Feb., pp. 69-82, 2016. doi: 10.21829/myb.2015.213457.
- [14] L. Soto-Pinto, et al., “Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, México,” Agroforest Systems, vol. 78, Jul., pp. 39-51, 2010. doi: 10.1007/s10457-009-9247-5.
- [15] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), “conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas”, 2008. [En Línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568> [Fecha de acceso: 20 de enero de 2025].
- [16] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), “conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Temperatura media anual”, 2007. [En Línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267551> [Fecha de acceso: 20 de enero de 2025].
- [17] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), “conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie V Conjunto Nacional Oaxaca de Juárez”, 2013. [En Línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825568924> [Fecha de acceso: 20 de enero de 2025].
- [18] Tropicos.org, “Missouri Botanical Garden”, 2025. [En línea]. Disponible: <https://tropicos.org> [Fecha de acceso: 05 de enero de 2025].
- [19] B. Mostacedo y T. S. Fredericksen, “Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal,” BOLFOR, Santa Cruz, Bolivia, 2000.
- [20] J. T. Curtis and R. P. McIntosh, “An Upland Forest Continuum in the Prairie-Forest Border Region of Wisconsin,” Ecology, vol. 32, no. 3, Jul., pp. 476-496, 1951. doi: 10.2307/1931725.
- [21] J. R. Lozada-Dávila, “Consideraciones metodológicas sobre los estudios de comunidades forestales,” Revista Forestal Venezolana, vol. 54, no. 1, Feb., pp. 77-88, 2010.
- [22] A. M. De la Fuente-Solís, et al., “Análisis de la regeneración natural de un bosque árido templado en el noreste de México,” Revista Forestal Mesoamericana Kurú, vol. 22, n. 50, Ene-Jun., pp. 1-22, 2025. doi: 10.18845/rfmk.v22i50.7755
- [23] R Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria”, 2020. [En Línea]. Disponible: <https://www.R-project.org/>
- [24] F. Rojas-García, et al., “Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests,” Annals of Forest Science, vol. 72, no. 6, Jan., pp. 835-864, 2015. doi: 10.1007/s13595-015-0456-y
- [25] G. Riesco-Muñoz, et al., “Densidad de la madera de 59 especies del orden Sapindales procedentes de bosques naturales brasileños,” Madera y Bosques, vol. 25, no. 2, Sep., e2521817, 2019. doi: 10.21829/myb.2019.2521817
- [26] J. A. B. Ordóñez-Díaz, et al., “Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación,” Madera y Bosques, vol. 21, Nov., pp. 77-126, 2015. doi: 10.21829/myb.2015.210428
- [27] R. Díaz-Franco, et al., “Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham,” Madera y Bosques, vol. 13, no. 1, Ago., pp. 25-34, 2007. doi: 10.21829/myb.2007.1311233
- [28] L. A. Rodríguez-Larramendi, et al., “Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México,” Revista Mexicana De Ciencias Forestales, vol. 7, no. 37, Oct., pp. 77-94, 2016. doi: 10.29298/rmcf.v7i37.53
- [29] G. Graciano-Ávila, et al., “Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de durango, México,” Revista Fitotecnia Mexicana, vol. 42, no. 2, Jun., pp. 119-127, 2019. doi: 10.35196/rfm.2019.2.119
- [30] E. M. Nogueira, et al. “Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories,” Forest Ecology and Management, vol. 256, no. 11, Jul., pp. 1853-1867, 2008. Doi: 10.1016/j.foreco.2008.07.022
- [31] C. A. Sierra, et al., “Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia,” Forest Ecology and Management, vol. 243, May., pp. 299-309, 2007. doi: 10.1016/j.foreco.2007.03.026
- [32] J. de D. Benavides-Solrío, et al., “Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono aéreos de *Cedrela odorata* L. en plantaciones forestales,” Revista Mexicana de Ciencias Forestales, vol. 12, no. 65, Abr., pp. 89-111, 2021. doi: 10.29298/rmcf.v12i65.791
- [33] R C. Goodman, et al. “Amazon palm biomass and allometry,” Forest Ecology and Management, vol. 310, Dec., pp. 994-1004, 2013. doi: 10.1016/j.foreco.2013.09.045
- [34] M. Segura y H. J. Andrade, “¿cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?,” Revista Agroforestería en las Américas, vol. 46, Dic., pp. 89-96, 2008.
- [35] J. L. Frangi, and A. E. Lugo, “Ecosystem dynamics of a subtropical floodplain forest,” Ecological Monographs, vol. 55, Sep., pp. 351-369, 1985. doi: 10.2307/1942582

- [36] T. G. Cole and J. J. Ewel, "Allometric equations for four valuable tropical tree species," *Forest Ecology and Management*, vol. 229, Jul., pp. 351-360, 2006. doi: 10.1016/j.foreco.2006.04.017
- [37] M. Acosta-Mireles, et al., "Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México," *Agrociencia*, vol.36. no. 6, Nov-Dic., pp. 725-736, 2002.
- [38] J. Chave, et al., "Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees," *Global Change Biology*, vol. 20, no. 10, May., pp. 3177-3190, 2014. doi: 10.1111/gcb.12629
- [39] J. Chave, et al., "Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests," *Oecologia*, vol. 145, no. 1, Jun., pp. 87-99, 2005. doi: 10.1007/s00442-005-0100-x
- [40] R. Rodríguez-Laguna, et al., "Carbono contenido en un bosque tropical subcaducifolio en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México," *Revista Latinoamericana De Recursos Naturales*, vol.4, no. 2, Jul., pp. 215 -222, 2008.
- [41] G. L. Smiley and J. Kroschel, "Temporal change in carbon stocks of cocoa-gliricidia agroforests in Cen-tral Sulawesi, Indonesia," *Agroforestry Systems*, vol. 73, no. 3, May., pp. 219-231, 2008. doi: 10.1007/s10457-008-9144-3
- [42] J. Solarte, et al., "Análisis florístico de los sistemas agroforestales tradicionales de cacao (*Theobroma cacao* L) en Nariño," *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol.14, no. 1, Ene-Jun., pp.11-29, 2022. doi: 10.22490/21456453.5648
- [43] J. Pérez-Nieto, et al., "Cobertura vegetal y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra," *Terra Latinoamericana*, vol. 30, no. 3, Jul-Sep., pp. 249-259, 2012.
- [44] L. Mateos-Maces, et al., "Manejo y aprovechamiento de la agrobiodiversidad en el sistema milpa del sureste de México," *Acta Agronómica*, vol. 65, no. 4, Oct., pp. 413-421, 2016. doi: 10.15446/acag.v65n4.50984
- [45] C. Mejía-Martínez, "Efectos De Los Megaproyectos hidroeléctricos Sobre La gastronomía indígena, ejemplo del municipio de San Felipe Usila, Oaxaca, México," *Iberoamérica Social: Iberoamérica Social*, vol. 15, no. 8, Dic., pp. 84-104, 2020.
- [46] M. L. Román-Miranda, A. Mora-Santacruz y G. A. González-Cueva, "Sistemas agroforestales con especies de importancia maderable y no maderable, en el trópico seco de México," *Avances en Investigación Agropecuaria*, vol. 20, no. 2, May-Ago., pp. 53-72, 2016.
- [47] J. P. Manchabajoy-Cañar, et al., "Carbon capture in coffee production systems in the department of Nariño," *Ciencias Agrícolas*, vol. 19, no. 1, Ene-Feb., pp. 28-44, 2022. doi: 10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358
- [48] H. E. Hernández-Núñez, et al., "Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos

Orientales de Colombia," *Revista De Biología Tropical*, vol. 69, no.1, Marz., pp. 352-368, 2020. doi: 10.15517/rbt.v69i1.42959