



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y SERVICIO
EN SUELOS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

**ALMACENES DE CARBONO EN SISTEMAS
AGROFORESTALES DE CAFÉ EN RELACIÓN
CON LAS PRÁCTICAS DE MANEJO**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

Presenta:

LISSET REYES HERNÁNDEZ

Bajo la supervisión de:

DRA. ROSA MARÍA GARCÍA NÚÑEZ



Chapingo, Estado de México, mayo 2026

**ALMACENES DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ
EN RELACIÓN CON LAS PRÁCTICAS DE MANEJO**

Tesis realizada por **LISSET REYES HERNÁNDEZ**, bajo la dirección del Comité
Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

DIRECTORA:



DRA. ROSA MARÍA GARCÍA NÚÑEZ

ASESOR:



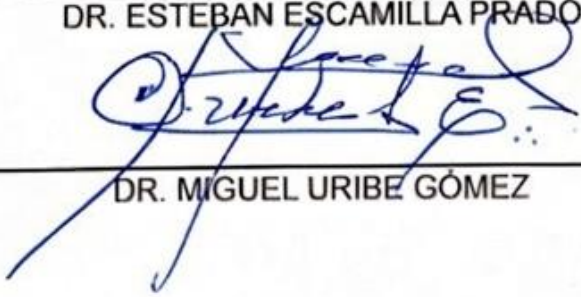
M.C. JUAN ANGEL TINOCO RUEDA

ASESOR:



DR. ESTEBAN ESCAMILLA PRADO

ASESOR:



DR. MIGUEL URIBE GÓMEZ

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE APÉNDICES	ix
ABREVIATURAS USADAS.....	x
DEDICATORIAS	xii
AGRADECIMIENTOS.....	xiv
DATOS BIOGRÁFICOS	xvi
RESUMEN GENERAL	xvii
GENERAL ABSTRACT	xviii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Hipótesis	5
1.4. Estructura de la tesis	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1. Sistemas de cultivo de Café	6
2.1.1. Sistemas agroforestales de café bajo sombra diversificada.....	7
2.1.2. Sistema de producción de café a pleno sol.....	10
2.2. Aspectos socioeconómicos de la producción de café en Huatusco, Veracruz	11

2.2.1. Contexto económico.....	12
2.2.2. Contexto social.....	15
2.3. Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café.....	16
2.3.1. Almacenamiento de carbono en los diferentes componentes del sistema agroforestal	17
2.3.2. Factores que influyen en el almacenamiento de carbono.....	19
2.4. Estimación de almacenamiento de carbono.....	22
2.4.1. Estimación de carbono en biomasa aérea mediante modelos alométricos	22
2.4.2. Estimación de carbono orgánico del suelo mediante el método Walkley y Black.....	23
2.5. Literatura citada	24
3. CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA Y SOCIOECONÓMICA DE SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ EN HUATUSCO, VERACRUZ.....	32
3.1. Resumen	32
3.2. Abstract.....	33
3.3. Introducción	34
3.4. Materiales y métodos.....	36
3.4.1. Área de estudio	36
3.4.2. Caracterización del medio biofísico del área de estudio	37
3.4.3. Caracterización de la estructura y composición de las perennes multipropósito integradas en los sistemas agroforestales.	39
3.4.4. Identificación de las prácticas de manejo y aspectos socioeconómicos importantes en los SAF y APS	42

3.5. Resultados y discusión	43
3.5.1. Caracterización del medio biofísico del área de estudio	43
3.5.2. Caracterización de la estructura y composición de las perennes multipropósito integradas en los SAF.....	52
3.5.3. Caracterización socioeconómica de los SAF y APS.....	59
3.6. Conclusiones	65
3.7. Literatura citada	66
4. CUANTIFICACIÓN DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CAFETALEROS EN RELACIÓN CON LAS PRÁCTICAS DE MANEJO.....	71
4.1. Resumen	71
4.2. Abstract.....	72
4.3. Introducción	73
4.4. Materiales y métodos.....	75
4.4.1. Área de estudio	75
4.4.2. Diseño de muestreo	76
4.4.3. Estimación de los reservorios de carbono.....	78
4.5. Resultados y discusión	83
4.5.1. Reservorio del componente arbóreo: especies perennes de sombra	83
4.5.2. Reservorio del componente arbustivo: cafetos	84
4.5.3. Reservorio del componente herbáceo.....	85
4.5.4. Reservorio de hojarasca	85
4.5.5. Reservorio del componente suelo	86

4.5.6. Carbono total almacenado	87
4.5.7. Relación de prácticas de manejo con el almacenamiento de carbono	
88	
4.6. Conclusiones	92
4.7. Literatura citada	94
5. CONCLUSIONES GENERALES.....	99

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Superficie de siembras y cosechas de café cereza en Huatusco, Veracruz.....	12
Cuadro 2. Fórmulas utilizadas para estimar parámetros estructurales de la vegetación.	40
Cuadro 3. Fórmulas usadas para estimar la diversidad de la vegetación.....	41
Cuadro 4. Climas presentes en el municipio de Huatusco, Veracruz.....	46
Cuadro 5. Especies perennes más abundantes en las parcelas muestreadas.	53
Cuadro 6. Características de la composición estructural de los SAF.....	55
Cuadro 7. Cobertura del suelo de acuerdo a cada sistema agroforestal.	56
Cuadro 8. Índice de valor de importancia relativa de las EPM registradas en los sistemas ESP y POL.....	57
Cuadro 9. Riqueza y diversidad de especies perennes de sombra por SAF. ...	58
Cuadro 10. Prácticas de manejo identificadas en los sistemas de cultivo de café.	62
Cuadro 11. Prácticas de manejo implementadas en cada punto de muestreo SAF.	77
Cuadro 12. Ecuaciones alométricas utilizados en la estimación de la biomasa seca de especies perennes de sombra y cafetos.	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas agroforestales de café.....	6
Figura 2. Parcelas de sistema de policultivo tradicional en Huatusco, Veracruz. 8	
Figura 3. Parcelas bajo el sistema especializado en Huatusco, Veracruz.	9
Figura 4. Parcelas de sistema de café a pleno sol en Huatusco, Veracruz.	11
Figura 5. Almacenes de carbono en comunidades vegetales.....	17
Figura 6. Interacciones de los componentes de los sistemas agroforestales de café y sus flujos de carbono.....	19
Figura 7. Ubicación del área de estudio.....	36
Figura 8. Pendientes presentes en Huatusco, Veracruz.	43
Figura 9. Topoformas presentes en Huatusco, Veracruz.	45
Figura 10. Unidades climáticas presente en Huatusco, Veracruz.	47
Figura 11. Diagrama climático de Walter & Lieth de la Normal climatológica, clave 30342, estación Centro Regional Huatusco, para el periodo 1991-2020.....	48
Figura 12. Uso del suelo y vegetación delimitados en Huatusco, Veracruz.	49
Figura 13. Unidades del paisaje delimitadas en Huatusco, Veracruz.	50
Figura 14. Distribución de familias y géneros en los SAF evaluados.....	53
Figura 15. Variables evaluadas del eje natural por sistema de manejo	60
Figura 16. Redes de apoyo de los cafeticultores por sistema de manejo.	64
Figura 17. Ubicación del área de estudio y puntos de muestreo.	75
Figura 18. Diseño de las parcelas de muestreo.....	76
Figura 19. Carbono almacenado en especies perennes de sombra, por UM. ..	84
Figura 20. Carbono orgánico del suelo de tres sistemas cafetaleros a tres profundidades.	86
Figura 21. Carbono almacenado en tres sistemas cafetaleros	87
Figura 22. ACP de prácticas de manejo, variables estructurales y C total almacenado en SAFC.....	91

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice 1. Pendientes presentes en Huatusco, Veracruz.	101
Apéndice 2. Topoformas presentes en Huatusco, Veracruz.....	101
Apéndice 3. Climas presentes en Huatusco, Veracruz.	102
Apéndice 4. Uso del suelo y vegetación presentes en Huatusco, Veracruz. ..	104
Apéndice 5. Unidades del paisaje presentes en Huatusco, Veracruz.	106
Apéndice 6. Especies perennes multipropósito presentes en los sistemas agroforestales de café evaluados.	126
Apéndice 7. Encuesta semiestructurada basada el modos de vida sostenibles de las familias cafetaleras.....	129
Apéndice 8. Correlaciones del carbono con las prácticas de manejo.	133

ABREVIATURAS USADAS

Abreviatura	Significado
APS	Sistema de café a pleno sol
CEM	Continuo de Elevaciones Mexicano
CITES	Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres
C	Carbono
Ccaf	Carbono en cafetos
Cherb	Carbono en herbáceas
Choj	Carbono en hojarasca
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
COS	Carbono orgánico del suelo
CPer	Carbono en especies perennes de sombra
CTot	Carbono total (referente al sistema)
D	Índice de Simpson
EPM	Especies perennes multipropósito
ESP	Sistema agroforestal de café especializado
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEI	Gases de Efecto Invernadero
H'	Índice de Shannon-Wiener
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático).

Abreviatura	Significado
IVI	Índice de Valor de Importancia
MgC ha ⁻¹	Megagramos de carbono por hectárea
ONU	Organización de las Naciones Unidas
POL	Sistema agroforestal de café-policultivo tradicional
RENE	Registro Nacional de Emisiones
SADER	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
SAF	Sistema Agroforestal
SAFC	Sistema Agroforestal de Café o Sistemas Agroforestales Cafetaleros.
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
SIG	Sistemas de Información Geográfica
t ha ⁻¹	Toneladas por hectárea
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza

DEDICATORIAS

A mis padres. A mi madre, **Enriqueta Hernández Juan**, por su amor y apoyo constante. A la memoria de mi padre **Roberto Soto Sánchez**, quien fue un pilar fundamental en mi vida. Gracias a los dos por guiarme, educarme con valores y formarme con amor y disciplina. Ustedes me inspiraron a esforzarme y superarme académicamente; gracias a su comprensión y apoyo soy en gran parte, la persona que soy el día de hoy.

A mis queridas hermanas. A mi hermana pequeña, **Ana Karen Hernández Juan**, esta dedicatoria es más que especial ya que en estos dos últimos años decidiste ser más que mi hermana, gracias por acompañarme en este nuevo reto y aventura, por seguir mis ideas, por ser mi compañera de clases y de desvelos y por apoyarme en este proyecto de investigación. A mi hermana mayor, **Matilde Arisbeth Reyes Hernández**, porque, aunque no siempre te lo digo con palabras, eres una de mis principales fuentes de inspiración. Tu constancia, fortaleza e inteligencia me impulsan a seguir superándome en todos los aspectos de mi vida.

A **René Yanny Olguín Luna**, mi mejor amigo, mi gran amor y próximamente mi gran compañero de vida. Gracias por enfrentar conmigo esta nueva aventura, por ser mi compañero de madrugadas con café y por brindarme siempre tu amor, cariño y apoyo incondicional. Sin ti este camino habría sido mucho más complicado.

A mis mejores y fieles amigas **Jaqueline Delgado Nava y Margarita Hernández Ramírez**. Gracias a su apoyo, risas y experiencias compartidas nos hemos motivado mutuamente a seguir creciendo académica y personalmente.

A **Lisset Reyes Hernández**, yo misma, por no rendirme nunca. Por enfrentar momentos difíciles y pensamientos complejos, superarlos y confiar en que era capaz de lograrlo.

Y de manera final y muy especial, a todas y todos los pequeños productores que sostienen la alimentación de nuestro país, que enseñan cómo cultivar con amor, paciencia y responsabilidad. A todos aquellos que velan por el cuidado de los recursos naturales y buscan aportar día a día un granito de arena a su preservación y protección.

AGRADECIMIENTOS

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, por el apoyo financiero otorgado a través de la beca de investigación, el cual hizo posible el desarrollo de este trabajo.

Al programa de Posgrado en **Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible (MCADS)** de mi alma mater, la **Universidad Autónoma Chapingo**, por brindarme la oportunidad de formarme profesional y académicamente, así como por las facilidades otorgadas que permitieron un adecuado desempeño durante el desarrollo de la investigación.

A la **Dirección General de Investigación, Posgrado y Servicio (DGIPS)**, por los recursos financieros proporcionados para la ejecución de gran parte del proyecto de investigación.

A mi directora de tesis **Dra. Rosa María García Núñez**, por su comprensión, guía, asesoría, supervisión y acompañamiento constante a lo largo de este proyecto de investigación.

Al **Dr. Juan Angel Tinoco Rueda**, por su apoyo en todo momento y por ser pieza clave en la toma de datos en campo, el acercamiento con los productores, así como en el diseño y aplicación de la metodología. Gracias por sus consejos, paciencia, enseñanzas y el asesoramiento durante el desarrollo de esta tesis.

Al **Dr. Miguel Uribe Gómez**, por sus valiosas aportaciones y consejos, derivados de su experiencia en el ámbito social del proyecto, los cuales permitieron ampliar y enriquecer la perspectiva del tema de investigación.

Al **Dr. Esteban Escamilla Prado**, por su amplia experiencia en el tema de investigación y por las aportaciones clave que contribuyeron al adecuado desarrollo del proyecto de investigación.

A aquellos **cafeticultores de Huatusco, Veracruz** que amablemente permitieron el muestreo en sus parcelas y proporcionaron la información necesaria para la realización de este trabajo.

A mis compañeras y compañeros **Dulce, Leslie, Juan Carlos, Víctor, Sarahí, Ana Karen y René Yanny**, por su apoyo y colaboración durante la toma de datos en campo.

Al personal de laboratorio **Araceli, Pedro y especialmente a Aide Tellez Sánchez** por el apoyo brindado en la realización de los análisis de suelos. Asimismo, agradezco al **Dr. David Cristóbal Acevedo y Dr. Joel Pineda Pineda**, responsables de los laboratorios, por facilitar los espacios de trabajo y orientarme con el personal técnico correspondiente.

Finalmente, un agradecimiento especial a **María Dolores Coronel Sánchez**, personal administrativo del programa MCADS, por el apoyo y la paciencia brindados con empatía y amabilidad en cada uno de los trámites administrativos, desde el ingreso al programa de maestría hasta el examen de grado.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Lisset Reyes Hernández

Fecha de nacimiento: 31 de octubre de 1996

Lugar de nacimiento: Martínez de la Torre, Veracruz

CURP: REHL961031MVZYRS06

Profesión: Ingeniera en Recursos Naturales Renovables

Cédula Profesional: 13744871



Desarrollo académico

Bachillerato:

Generación (2012-2015)	Telebachillerato Independencia. Martínez de la Torre, Veracruz.
---------------------------	---

Propedéutico:

Generación (2015-2016)	Centro Académico Regional sede Huatusco, Universidad Autónoma Chapingo, Huatusco, Veracruz.
---------------------------	---

Licenciatura:

Generación (2016-2020)	Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. México.
---------------------------	---

Posgrado:

Generación (2024-2026)	Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. México.
---------------------------	--

RESUMEN GENERAL

Almacenes de carbono en sistemas agroforestales de café en relación con las prácticas de manejo¹

Los sistemas agroforestales cafetaleros (SAFC) desempeñan un papel clave en el almacenamiento de carbono (C), debido a la estructura multiestratos y la diversidad vegetal que presentan, lo que los constituye como un componente estratégico en la mitigación del cambio climático. Sin embargo, su capacidad está sujeta a diversos factores ambientales y de manejo. El presente estudio evaluó el aporte de las prácticas de manejo al almacenamiento de C en tres sistemas cafetaleros de Huatusco, Veracruz: policultivo tradicional (POL), sistema especializado (ESP) y café a pleno sol (APS), mediante su caracterización biofísica, estructural-florística, socioeconómica, así como la estimación de sus reservorios de C y su relación con el manejo del sistema. Los resultados mostraron que el sistema POL mostró mayor complejidad estructural, diversidad vegetal y cobertura arbórea respecto al ESP y APS. En total, se registraron 36 especies de perennes multipropósito, destacando *Fabaceae* como la familia dominante. El sistema POL presentó valores más altos de diversidad ($H' = 2.67$, $D = 0.89$) y almacenamiento de carbono total ($135.20 \pm 35.55 \text{ MgC ha}^{-1}$), seguido del ESP ($97.32 \pm 30.73 \text{ MgC ha}^{-1}$) y APS ($58.27 \pm 24.69 \text{ MgC ha}^{-1}$). El C orgánico del suelo constituyó el principal reservorio en todos los sistemas acumulando en promedio el 75.20 % del C total. Las correlaciones y el análisis de componentes principales evidenciaron que variables asociadas a una mayor complejidad estructural, particularmente la densidad de especies perennes y la acumulación de residuos orgánicos, favorecieron el almacenamiento de C, mientras que prácticas más intensivas, como fertilización y podas frecuentes, tendieron a relacionarse con menores contenidos de C. En conjunto, los resultados destacan el potencial de los SAFC diversificados como sistemas estratégicos para la sostenibilidad productiva y la mitigación del cambio climático.

Palabras clave: servicios ecosistémicos; policultivo tradicional; biomasa aérea; carbono orgánico del suelo; diversidad vegetal; *Coffea arabica*.

¹ Tesis de Maestría en Ciencias, Programa de Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Lisset Reyes Hernández

Directora de Tesis: Dra. Rosa María García Núñez

GENERAL ABSTRACT

Carbon stocks in coffee agroforestry systems in relation to management practices²

Coffee agroforestry systems (SAFC) play a key role in carbon (C) storage due to their multistrata structure and plant diversity, making them a strategic component for climate change mitigation. However, their storage capacity is influenced by various environmental and management factors. This study evaluated the contribution of management practices to C storage in three coffee-growing systems in Huatusco, Veracruz: traditional polyculture (POL), specialized coffee system (ESP), and full-sun coffee (APS), through their biophysical, structural-floristic, and socioeconomic characterization, as well as the estimation of their C pools and their relationship to system management. The results showed that the POL system exhibited greater structural complexity, plant diversity, and tree cover compared to the ESP and APS systems. A total of 36 species of multipurpose perennials were recorded, with *Fabaceae* identified as the dominant family. The POL system had higher values for diversity ($H' = 2.67$, $D = 0.89$) and total carbon storage ($135.20 \pm 35.55 \text{ MgC ha}^{-1}$), followed by the ESP ($97.32 \pm 30.73 \text{ MgC ha}^{-1}$) and APS ($58.27 \pm 24.69 \text{ MgC ha}^{-1}$). Soil organic C constituted the main reservoir in all systems, accounting on average for 75.20% of total C. Correlation analyses and principal component analysis showed that variables associated with greater structural complexity, particularly the density of perennial species and the accumulation of organic matter, promoted C storage, whereas more intensive practices, such as fertilization and frequent pruning, tended to be associated with lower carbon stocks. Overall, the results highlight the potential of diversified SAFC as strategic systems for productive sustainable production and climate change mitigation.

Key words: ecosystem services; traditional polyculture; aboveground biomass; soil organic carbon; plant diversity; *Coffea arabica*.

² Master's Thesis in Science, Graduate Program in Agroforestry for Sustainable Development, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Lisset Reyes Hernández

Advisor: Dra. Rosa María García Núñez

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

El dióxido de carbono (CO₂), es el principal gas de efecto invernadero (GEI) emitido por actividades humanas y una de las principales causas del calentamiento global (Ruíz Nápoles et al., 2023). De acuerdo con La Ley General de Cambio Climático, los GEI son componentes gaseosos de la atmósfera, que absorben y emiten radiación infrarroja (Congreso de la Unión, 2012). Estos actúan como una capa impermeable que envuelve a la Tierra, atrapando el calor e incrementando así las temperaturas en los sistemas terrestres y marinos a nivel global (INECC, 2018).

La alta concentración de CO₂ de origen antropogénico en la atmósfera proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles, que ha aumentado de manera acelerada desde la Revolución Industrial (IPCC, 2021; Mondragón, 2021). Esto ha provocado un aumento de la temperatura promedio global, estimado en 1.1°C/2°F desde la era preindustrial, y ha modificado las condiciones climáticas (IPCC, 2021). Dichos cambios se reflejan en sequías prolongadas, eventos climáticos extremos más frecuentes y aumento del nivel del mar que impacta a los ecosistemas dando como resultado cambios ecológicos y degradación de las tierras (IPCC, 2021; Ruíz Nápoles et al., 2023). Lo que, a su vez, amenaza directamente al bienestar humano y a la sostenibilidad de los sistemas productivos y ecológicos (UNCCD, 2015).

En México, los sectores de energía, transporte e industria concentran la mayor parte de las emisiones de CO₂, seguidos del agropecuario y el de residuos. Datos del Registro Nacional de Emisiones (RENE) muestran que, en el periodo 2015-2018, el CO₂ representó más del 70 % de las emisiones totales de GEI reportadas en el país, lo que reafirma el papel dominante en la contribución al cambio climático y la necesidad de reducir estas emisiones (SEMARNAT, 2020).

Los sistemas agroforestales cafetaleros (SAFC) desempeñan un papel crucial en la captura y almacenamiento de carbono, gracias a que integran una gran diversidad de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas (Farfán Valencia, 2014). Estos agroecosistemas aseguran la producción de café y forman un ecosistema que diversifica la producción generando servicios ecosistémicos que son claves en todas las expresiones de vida del planeta desempeñando un rol estratégico insustituible en el ciclo del carbono en la Tierra (Burbano Orjuela, 2018). Por lo que, se han convertido en un componente estratégico para proyectos que buscan la mitigación de los efectos del cambio climático (Ulian et al., 2023).

No obstante, la magnitud del almacenamiento de carbono en estos sistemas depende de diversos factores ambientales y de manejo. Entre estos sobresalen aquellos relacionados al clima donde se desarrollan como: la temperatura, precipitación, grado altitudinal y condición del suelo, así como el manejo de los sistemas agroforestales (SAF) que incluyen diversas prácticas que influyen significativamente en las reservas de carbono de los sistemas cafetaleros (Jurado Riascos et al., 2020; Salazar Zavala et al., 2018). Entre estas prácticas resalta la heterogeneidad de las plantaciones, relacionada con la densidad de plantación, la edad de las plantaciones y el manejo técnico-agrícola (Espinoza-Domínguez et al., 2012). Junto con la rotación del cultivo, composición del sistema, la selección de las especies y el suministro de materia orgánica del suelo (Ruíz-García et al., 2022).

Considerar los diversos factores que influyen en los reservorios de carbono nos proporciona una visión integral de los aspectos que deben ser ajustados para maximizar este proceso y aprovechar plenamente el potencial de los SAF (Ruíz García, 2015). Una forma de conocer y analizar estos factores que inciden es mediante la realización de una caracterización. Esto permite identificar la composición de especies de árboles que proveen sombra al café, así como también analizar y comparar las características estructurales, funcionales y socioeconómicas del sistema de interés (Celi-Delgado & Aguirre-Mendoza, 2022; Zapata Arango, 2019).

Por otro lado, la región de Huatusco, Veracruz, destaca por su área cafetalera, principalmente caracterizada por sistemas de producción bajo sombra diversificada, lo que contribuye significativamente al almacenamiento de carbono. Un estudio reciente estimó que estos sistemas contienen un alto potencial de captura, calculando alrededor de $245.08 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono (Valdés-Velarde et al., 2022). No obstante, a pesar de la importancia ambiental y social de la cafecultura, ésta genera bajos beneficios económicos para los productores de la región, debido a la disminución de los rendimientos de los cafetales, incidencia de plagas y enfermedades, el aumento de temperatura, variaciones en las fechas de floración, fructificación, cosecha y sin dejar de lado la implementación de prácticas de manejo no adecuadas al sistema (Ayala-Montejo et al., 2021).

Como respuesta a esta problemática los productores optan por transitar hacia otros sistemas de monocultivo como el chayote, caña de azúcar, limón, aguacate, entre otros, ya que ven en estos, mayores oportunidades de ganancias económicas, sin embargo, estas alternativas pueden traer consecuencias negativas en la sostenibilidad social y ambiental, afectando la diversificación de la producción, el almacenaje de materia orgánica y la dinámica de servicio ecosistémico de captura de carbono (Ayala-Montejo et al., 2021).

Para contribuir a esta problemática, se proponen opciones que pueden contribuir a los rendimientos económicos en beneficio de los productores, sin comprometer la sostenibilidad. Una de estas opciones es la adopción de prácticas de manejo estratégicas, como la rotación de cultivos a un tiempo adecuado y a la selección e incorporación de especies perennes multipropósito con importancia en la región y con alto potencial de captura de carbono, que beneficien los rendimientos del café y el almacenamiento de carbono y que además aporten otras fuentes de ingresos para los cafecultores. Así como la incorporación de los cafecultores a los mercados de carbono o el pago por servicios ambientales, ya que estos proporcionan fuentes adicionales de ingresos y agregan valor a los sistemas productores de café.

Por lo tanto, el presente estudio tiene como propósito caracterizar los sistemas de cultivo de café bajo sombra diversificada así como evaluar el aporte de las prácticas de manejo al proceso de almacenamiento de carbono en los SAFC en Huatusco, Veracruz, con el fin de aportar elementos que orienten al diseño de estrategias para mejorar la eficiencia del almacenamiento de carbono e impulsar a los cafeticultores a la participación de mercados de carbono.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar el aporte de las prácticas de manejo al almacenamiento de carbono en SAFC bajo sombra diversificada en Huatusco, Veracruz, mediante su caracterización y la estimación de los reservorios de carbono para generar recomendaciones estratégicas que incrementen la productividad de los sistemas e impulsen a los cafeticultores a la participación de mercados de carbono.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar los sistemas de cultivo café bajo sombra diversificada, a través de factores; bióticos, abióticos y antropogénicos, para identificar los factores que inciden en mayor grado en el almacenamiento de carbono.
2. Estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea y en el suelo, mediante ecuaciones alométricas y análisis químico del suelo, con el propósito de generar información que permita evaluar el aporte de las prácticas de manejo al proceso de almacenamiento de carbono.
3. Evaluar los reservorios de carbono potencial en relación con las prácticas de manejo, para diseñar estrategias de manejo efectivas y adoptables que ayuden a mejorar su productividad e incrementar el almacenamiento de carbono.

1.3. Hipótesis

La implementación de prácticas de manejo apropiadas, como la rotación de cultivos, las podas y la incorporación de especies perennes multipropósito con alto potencial de almacenamiento de carbono incrementa significativamente la capacidad de los sistemas agroforestales de café para almacenar carbono en comparación con sistemas a pleno sol.

1.4. Estructura de la tesis

La presente tesis está estructurada en cinco capítulos. El capítulo uno, titulado “Introducción general”, presenta el contexto del estudio, abordando las problemáticas asociadas al cambio climático y los retos que enfrentan los sistemas de producción cafetaleros. Asimismo, se destaca la importancia de analizar el almacenamiento de carbono de los sistemas agroforestales cafetaleros de café y se encuentran los objetivos e hipótesis que guían la investigación.

El capítulo dos corresponde a la revisión de literatura, la cual proporciona conceptos e información necesaria para la comprensión y sustento del trabajo realizado.

Por su parte los capítulos tres y cuatro, corresponden a los artículos científicos derivados del proyecto de investigación y que responden al cumplimiento de los objetivos planteados. El capítulo tres da respuesta al primer objetivo que es la caracterización de los sistemas agroforestales de café. Mientras que capítulo cuatro, aborda el segundo y tercer objetivo, enfocados en la estimación de los almacenes de carbono y el análisis de las prácticas de manejo que influyen en ello. Finalmente, el capítulo cinco presenta las conclusiones generales del proyecto de investigación.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Sistemas de cultivo de Café

El cultivo de café es uno de los principales sistemas productivos a nivel internacional y nacional. De acuerdo con Orús (2024), a finales de diciembre y principios del 2024 se reportó una producción mundial de 171.4 millones de sacos de 60 kilogramos de café lo que representan alrededor de 10.3 millones de toneladas. Por su parte el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP (2023), informó que para dicho año la producción en México fue de 1,056,388 t de café cereza.

Esta producción de café se realiza a través de diversos sistemas de cultivo que varían de acuerdo a la ubicación geográfica, a factores bióticos como el clima y el suelo, los recursos económicos disponibles y aspectos sociales como las prácticas culturales. De acuerdo con Escamilla Prado & Díaz Cárdenas (2016) en México estos sistemas se agrupan en cinco tipos principales: el sistema natural o de montaña, sistema de policultivo tradicional, sistema especializado, sistema de policultivo comercial y sistema a pleno sol. Los primeros cuatro sistemas están dentro del enfoque de sistemas agroforestales ya que se caracterizan por incorporar una gran diversidad de especies leñosas perennes que proporcionan sombra diversificada al café.



Figura 1. Sistemas agroforestales de café.

Fuente: Escamilla-Prado et al. (2026).

2.1.1. Sistemas agroforestales de café bajo sombra diversificada

Los sistemas de cultivo de café que se desarrollan con la integración de sombra diversificada, se diferencian entre sí, de acuerdo a su composición estructural de la vegetación y al nivel de manejo empleado (Moguel & Toledo, 1999; Salgado-Mora et al., 2021a).

Sistema natural o de montaña

El sistema natural o de montaña, también conocido como sistema rústico o rusticano, es un sistema que se caracteriza por aprovechar la vegetación natural predominante, utilizando el estrato arbóreo generalmente de selvas y bosques para brindar sombra y protección al cultivo de café (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016).

El sistema consiste en sustituir el sotobosque (estrato inferior de la vegetación donde predominan hierbas y arbustos) por plantas de café, manteniendo intactos los estratos superiores, es decir, el componente forestal, lo que lo convierte en una forma de agrobosque (M. Toledo & Moguel, 1996).

Un aspecto que diferencia este sistema del resto es el uso mínimo o nulo de insumos y labores agrícolas, en algunos casos se llegan a realizar sólo algunas podas en café y eliminación de arbustos del dosel bajo (Villavicencio-Enríquez, 2013).

Según M. Toledo & Moguel (1996), en México, este sistema es común en áreas aisladas y comunidades indígenas, donde el café se incorpora como parte del ecosistema nativo, resultando en rendimientos bajos, pero en armonía con el entorno natural.

Sistema de policultivo tradicional

El sistema de policultivo tradicional (POL) consiste en un plantío de café bajo sombra, que integra una alta diversidad de especies vegetales, tanto de vegetación primaria como secundaria, sin un arreglo espacial definido (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016).

Es muy similar al sistema natural o rusticano por la alta diversidad de especies que se incluyen lo que genera una estructura vertical y horizontal similar, sin embargo, se diferencia en que este sistema recibe una mayor intervención por parte del productor, es decir mayores prácticas de manejo como podas periódicas o incorporación de insumos como biofertilizantes. El sistema además de conservar especies nativas incorpora algunas otras que son de interés para el productor como plátano, cacao, macadamia o cítricos, que contribuyen tanto a su subsistencia como al comercio (M. Toledo & Moguel, 1996).

Un aspecto importante que resaltar es que en este sistema se aprovecha el café de manera integral, además de obtener otros productos como madera, leña, frutos y plantas medicinales. En la mayoría de las regiones cafetaleras, el sistema tradicional es una parte esencial de la economía campesina, que también se complementa con milpa, jornaleo y producción de traspatio (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016).



Figura 2. Parcelas de sistema de policultivo tradicional en Huatusco, Veracruz.

Sistema especializado

El sistema de cultivo de café especializado (ESP) es diferente al resto de los sistemas mencionados anteriormente debido a que este sistema se centra en la producción exclusiva de café, disminuyendo por mucho la diversidad de especies utilizadas para sombra y adoptando un diseño y arreglo específicos. Este sistema promovido por el INMECAFE a partir de la década de 1970 emplea variedades de café altamente productivas y en cuanto a la sombra se utilizan especies leguminosas, especialmente del género *Inga* (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016).

Este sistema llegó a representar una gran parte de las plantaciones cafetaleras de México, especialmente en el centro de Veracruz. Sin embargo, la crisis de precios en los años 90 llevó a muchos cafetales especializados a convertirse en policultivos. Aunque el sistema ESP puede ofrecer altos rendimientos, su sostenibilidad es cuestionada debido a la pérdida de biodiversidad y a que genera una vulnerabilidad económica a los productores por solo depender del café (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016).



Figura 3. Parcelas bajo el sistema especializado en Huatusco, Veracruz.

Sistema de policultivo comercial

Este sistema se distingue por la producción de café junto con otras especies asociadas de alto valor comercial, como frutales, plantas para forraje, hortalizas, maderables, especias, entre otras, las cuales se establecen siguiendo un diseño planificado. Su principal interés es maximizar el uso del espacio y los recursos disponibles, generando múltiples productos destinados principalmente a la comercialización por lo cual la diversidad vegetal se reduce a un número limitado de especies, generalmente de dos a cuatro, pero manteniendo un nivel de diversidad suficiente para reducir la dependencia de un solo producto y mejorar la estabilidad económica de los productores (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016; M. Toledo & Moguel, 1996).

2.1.2. Sistema de producción de café a pleno sol

El sistema a pleno sol (APS) o también llamado a cielo abierto es un monocultivo de café sin sombra diversificada, es decir, no cuenta con cobertura de árboles y en donde las plantas de café están expuestas de manera directa a la luz solar. Este sistema busca obtener una mayor producción de café a través de la exposición total al sol (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016; M. Toledo & Moguel, 1996).

Este modelo representa un sistema de la agricultura convencional y pierde el carácter agroforestal que posee los otros sistemas (M. Toledo & Moguel, 1996). Ha sido adoptado por grandes cafeticultores quienes han introducido tecnologías y prácticas de cultivo de otros países, como Brasil y Costa Rica, que son los que principalmente implementan este sistema, buscando mejorar la eficiencia y la productividad (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016).

El sistema brinda altos rendimientos de café por unidad de superficie. Sin embargo, también requiere de mayor tecnificación y uso de grandes insumos como agroquímicos o maquinaria, así como mayores cuidados, por lo que al mismo tiempo incrementan la necesidad de mano de obra extra y con ello los costos de producción (M. Toledo & Moguel, 1996).

Esto propicia una dependencia a un solo cultivo, lo que puede ocasionar que los productores de café sean vulnerables a las fluctuaciones de los precios y a problemas relacionados con plagas y enfermedades (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016). Además, este tipo de sistema es favorable solo en regiones con condiciones climáticas específicas, como áreas de alta nubosidad y temperaturas medias no superiores a 18°C. Esto permite que el café se desarrolle adecuadamente a plena exposición solar (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016).



Figura 4. Parcelas de sistema de café a pleno sol en Huatusco, Veracruz.

2.2. Aspectos socioeconómicos de la producción de café en Huatusco, Veracruz

La mayoría de los cafecultores en México provienen de 12 entidades federativas; Chiapas, Veracruz, Puebla, Oaxaca, Guerrero, Hidalgo, San Luis Potosí, Tabasco, Jalisco, Nayarit, Colima y Edomex (SADER, 2024). El cultivo de café en el país representa la generación de empleos de más de 500 mil productores de 15 estados de la república y 480 municipios (SADER, 2022).

La región cafetalera de Huatusco, Veracruz es considerada una de la más importante del estado y a nivel nacional también es una de las más relevantes por su producción por unidad de superficie.

De acuerdo con datos del SIAP, hasta el 31 de marzo del 2025, la superficie sembrada en Huatusco de café cereza fue de 7,467 ha, de la cual se obtuvo una producción de 14,038 t, lo que equivale el 5.25 % de la producción estatal y el 1.39 % nacional; asimismo, la producción del municipio representa un rendimiento de 1.88 t ha⁻¹, qué está un poco arriba del rendimiento estatal y nacional.

Cuadro 1. Superficie de siembras y cosechas de café cereza en Huatusco, Veracruz.

Nivel	Superficie (ha)			Producción (t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
	Sembrada	Cosechada	Siniestrada		
Nacional	700,435.94	658,642.03	0.00	1,009,686.59	1.53
Estatad	145,293.10	143,512.60	0.00	267,269.41	1.86
Municipal	7,467.00	7,467.00	0.00	14,038.00	1.88

Fuente: Elaboración propia con información de (SIAP, 2025).

t = toneladas, t ha⁻¹ = toneladas por hectárea

2.2.1. Contexto económico

Veracruz es el segundo estado productor de café del país, mientras que la región cafetalera de Huatusco aporta alrededor de 23 % de la cosecha estatal y 6 % de la nacional (Velandia et al., 2023). La importancia de la cafeticultura en la región y en el municipio recae en que es la base de la economía familiar, aproximadamente el 65.5 % de los ingresos de las familias productoras en la zona centro proviene directamente del cafetal, en grupos competitivos, este ingreso puede representar hasta el 95 % del total (López Morgado et al., 2020).

A nivel estatal el 98.1 % de los productores de café tiene predios de entre media y cinco ha, los cuales contribuyen con casi la mitad del café que se produce en el estado (Guajardo Panes et al., 2020).

Particularmente la región de Huatusco se caracteriza por el minifundio, ya que cerca del 80 % de los productores poseen menos de tres ha (Rojas-Herrera & Martín Olguín-Pérez, 2018).

Rentabilidad, costos e ingresos

Un de los principales problemas de esta actividad económica es su baja rentabilidad, ocasionada por una combinación de factores socioeconómicos, ambientales y políticos (Gabriel-Hernández & Barradas, 2024). Dentro de los socioeconómicos se encuentran los costos de producción elevados, rendimientos bajos y precios de mercado fluctuantes (Contreras Hernández et al., 2020). Esto puede ocasionar que los productores busquen otras fuentes de ingresos o inclusive que abandonen la actividad productiva. Por ejemplo un estudio sobre el cambio de uso de suelo en SAFC en Chiapas, identificó que la caída de precios en 1989 fue un factor crítico que afectó la rentabilidad de los cafetales, lo cual incentivó el cambio de uso del suelo (Montejo Morales et al., 2022). Dentro de los aspectos ambientales se encuentran las variaciones climáticas ocasionadas por el cambio climático, que propician la incidencia cada vez mayor de los cafetos a adquirir plagas y enfermedades como la roya (Salgado-Mora et al., 2021b). Generando bajos rendimientos en la producción de café.

También podemos sumar que las afectaciones al sistema por las cuestiones ambientales incrementan la necesidad de la utilización de insumos externos, para controlar las plagas y enfermedades o para aminorar los daños ya ocasionados, así como balancear la falta de algunos nutrientes por deficiencia en los suelos, aumentan así los costos de producción y reduciendo la rentabilidad del sistema.

De acuerdo con Contreras Hernández et al. (2020) los costos de producción por hectárea oscilan entre \$16,000 y \$20,000 pesos, mientras que los rendimientos promedio suelen ser de 3 a 4 t ha⁻¹ de café cereza. Se estima que un productor requiere cosechar al menos 4.3 t ha⁻¹ para alcanzar el punto de equilibrio y recuperar sus costos directos (López Morgado, et al., 2021a).

Canales de comercialización y mercado

La comercialización del café, se realiza a través de diferentes estados físicos del grano y canales de comercialización, factores que determinan el precio recibido por el productor. En la región de Huatusco, alrededor del 82 % de los productores vende su cosecha en fruto fresco, el mismo día de la corta, es decir, bajo la modalidad de café cereza (López Morgado, 2021). En esta modalidad el productor es más vulnerable, pues no agrega valor al producto y se obliga a una venta inmediata para evitar el deterioro del producto. La segunda forma de venta más frecuente es el café pergamino, con una participación de alrededor del 26 % de los productores (López Morgado, 2021). Otras modalidades de venta en menor porcentaje de participación son café oro verde, tostado, molido o de especialidad.

El café llega al mercado a través de diversas rutas que incluyen intermediarios locales, empresas transnacionales, cooperativas y organizaciones de productores, y mercados de especialidad. Los intermediarios locales, comúnmente conocidos como “coyotes”, acopian el grano directamente en las comunidades productoras y lo revenden a beneficios industriales o exportadores, frecuentemente por debajo del precio de mercado, lo que posiciona a los pequeños productores en una situación de alta vulnerabilidad (Hernández Martínez et al., 2020). A escala mayor, el mercado veracruzano está dominado por grandes empresas transnacionales que adquieren café cereza para procesamiento industrial masivo (Hernández Martínez et al., 2020). En contraste, las cooperativas y organizaciones de productores buscan reducir la dependencia de intermediarios mediante el acopio conjunto y el beneficio húmedo y seco, con el fin de acceder directamente a los mercados de exportación. Los mercados de especialidad incluyen certificaciones como café orgánico, Comercio Justo, Rainforest Alliance, entre otras. Estos mercados permiten a los productores obtener sobrepuestos de hasta 240 % por encima del mercado convencional (Hernández Martínez et al., 2020). Aunque el acceso a estos esquemas sigue siendo limitado para la mayoría de los pequeños productores.

2.2.2. Contexto social

La cafeticultura se mantiene por tradición familiar y como forma de vida, estrechamente ligada al cultivo bajo sombra. En muchos casos, el conocimiento se transmite de manera intergeneracional de abuelos a padres e hijos, lo que refuerza una identidad cafetalera y prácticas de manejo heredadas (Aguirre-Cadena et al., 2016).

Las familias cafetaleras suelen desarrollarse en contextos de pobreza rural, caracterizados por baja escolaridad, escaso acceso a servicios básicos y fuerte dependencia de intermediarios para la comercialización (Aguirre-Cadena et al., 2016; Loreto et al., 2017). Para compensar los bajos ingresos del café, los productores diversifican sus fuentes de ingresos mediante actividades extra parcelarias, migración y empleo rural no agrícola, lo que modifica la estructura familiar y laboral (Apodaca-González et al., 2020; Rosales-Martínez et al., 2020). A ello se suma un marcado envejecimiento de los cafeticultores y la escasa incorporación de jóvenes a la actividad, factores que comprometen la continuidad generacional del sector (Aguirre-Cadena et al., 2016; Velandia et al., 2023).

En el ámbito de género, las mujeres participan tanto como productoras propietarias como esposas de cafeticultores. Las primeras presentan mayores niveles de empoderamiento y capacidad de decisión sobre el sistema productivo, mientras que las segundas presentan una mayor dependencia económica, lo que restringe su participación en decisiones productivas y comunitarias (Gasperín García et al., 2023). En este contexto, la migración masculina y la salida de jóvenes del campo han impulsado el aumento del trabajo femenino en el sector agrícola (Hernández Cuadra et al., 2025).

Finalmente, las redes sociales y organizativas del sector son frágiles, puesto que existe baja densidad de vínculos entre productores, instituciones y proveedores, lo que dificulta la adopción de buenas prácticas e innovaciones (Martínez-Davila et al., 2018).

Aunque las cooperativas de Huatusco han sido un pilar para la defensa de precios y el acceso a apoyos, su desarrollo ha sido desigual y muchas han enfrentado crisis o procesos de privatización que han debilitado su función social y organizativa (Rojas-Herrera & Martín Olguín-Pérez, 2018; Velandia et al., 2023).

2.3. Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café

Los SAF se caracterizan por estar compuestos de tres componentes; el componente de biomasa viva en el cual se incluye, los estratos de la vegetación arbóreo, arbustivo y herbáceo; el componente de biomasa muerta en el que se agrupan la hojarasca y las ramas y troncos muertos; y el componente del suelo.

Gracias a esta compleja estructura y composición diversificada de especies, los SAFC de café pueden almacenar y capturar una cantidad considerable de CO₂, por lo que estos sistemas se consideran un elemento clave para la mitigación de los efectos del cambio climático (Ulian et al., 2023). Estos sistemas pueden almacenar cantidades significativas de carbono en la biomasa aérea, con valores que varían dependiendo del tipo de manejo. Valdés-Velarde et al. (2022) determinaron que en un sistema de café especializado con roble encino, el componente arbóreo puede almacenar 302.54 Mg ha⁻¹ de carbono.

Además, el manejo conservacionista que tiene la mayoría de estos sistemas y el uso de especies perennes incluidas para sombra, hacen que se aprovechen en su gran mayoría los recursos disponibles, incluyendo los residuos de los árboles que se incorporan al suelo, lo que garantiza el almacenamiento de carbono (Valdés-Velarde et al., 2022). Por lo que los SAF basados en café son una excelente alternativa técnica, social y económicamente viable con gran potencial para el almacenamiento del carbono y reducción de emisiones de CO₂ (Masuhara et al., 2015; Jurado Riascos et al., 2020).

2.3.1. Almacenamiento de carbono en los diferentes componentes del sistema agroforestal

De acuerdo con el Programa Mexicano del Carbono (2022) los SAFC presentan cinco almacenes de carbono: biomasa viva aérea, biomasa viva por debajo del suelo, biomasa muerta sobre el suelo, mantillo y suelo.

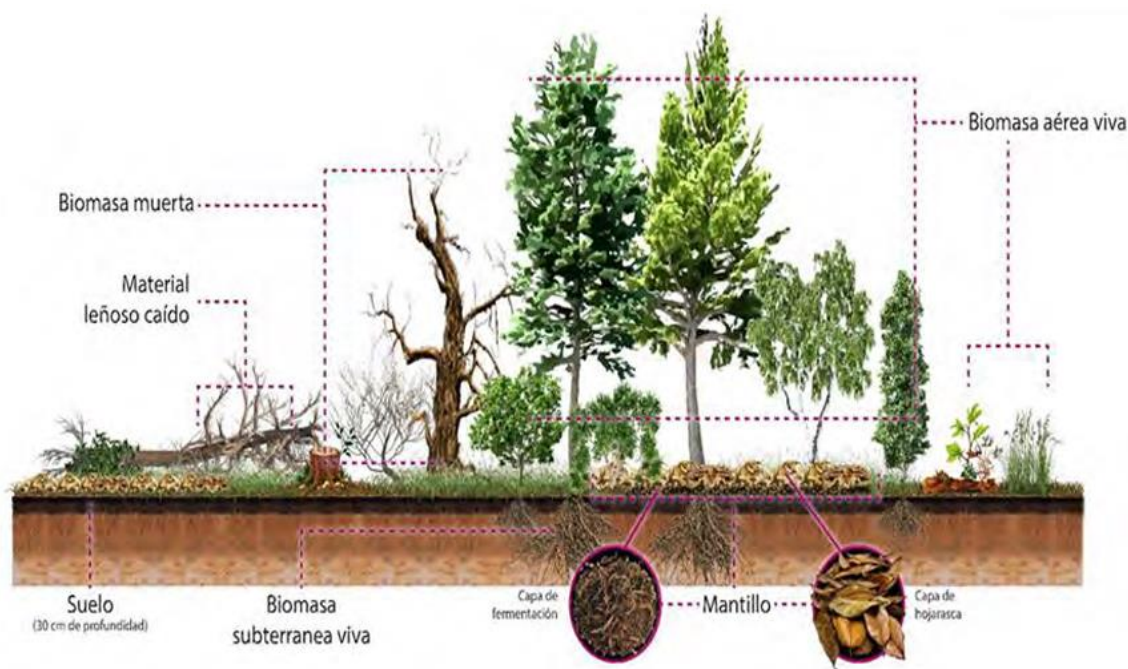


Figura 5. Almacenes de carbono en comunidades vegetales.
Fuente: Programa Mexicano del Carbono (2022).

Biomasa viva aérea

Este reservorio comprende toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo, correspondiente a los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo (Programa Mexicano del Carbono, 2022). En los SAFC, el estrato arbóreo está conformado por las especies perennes de sombra, el arbustivo por los cafetos y especies de porte bajo, y el herbáceo por la vegetación de sotobosque.

Los árboles de sombra constituyen generalmente el segundo reservorio más importante del sistema, con aportes que oscilan entre el 30 y el 75 % del carbono total, en función de la densidad, altura y diversidad de especies (Ararsa & Endalamaw, 2024; Soto-Pinto & Aguirre-Dávila, 2014).

Por ejemplo, en un SAFC bajo sombra de *Inga jinicuil*, este componente almacenó 64.3 Mg ha⁻¹ de carbono (40.8 % del carbono total), siendo la pendiente, la altitud, la edad del cafetal, la conductividad eléctrica y la profundidad del suelo las variables de mayor influencia (Hernández Vásquez et al., 2019). El componente café aporta entre el 2 y el 7 % del carbono total, y aunque su contribución es menor, resulta relevante por la producción de residuos que alimentan el suelo, y por su parte, las herbáceas contribuyen entre el 0.02 y el 0.3 % (Salgado Veramendi et al., 2025).

Biomasa viva debajo del suelo

Este almacén incluye la biomasa de raíces vivas de todas las especies que integran el sistema (Programa Mexicano del Carbono, 2022). Las raíces de las herbáceas, cafetos y árboles de sombra contribuyen al carbono orgánico del suelo (COS), aunque en muchos estudios este componente se integra directamente al COS (Espinoza-Domínguez et al., 2012).

Suelo

Comprende el COS contenido en la materia orgánica, el cual proviene de la descomposición de hojarasca, raíces finas, residuos de café y podas, favorecida por la cobertura arbórea y la menor perturbación del suelo (Espinoza-Domínguez et al., 2012; Ovalle Rivera, 2016). El suelo es el reservorio más importante en los SAFC, con contribuciones que van del 47 a más de 90 % del carbono total almacenado, de acuerdo al diseño y manejo del sistema (Salgado Veramendi et al., 2025).

Mantillo

Este reservorio incluye la biomasa no viva en distintos estados de descomposición sobre la superficie del suelo, cuyo principal aporte proviene de la hojarasca de las especies perennes de sombra (Programa Mexicano del Carbono, 2022). Su contribución al carbono total del sistema oscila entre 0.6 a 1.9 % (Salgado Veramendi et al., 2025).

Biomasa muerta

También llamada necromasa es la biomasa conformada por árboles muertos en pie, tocones y material leñoso caído, generados principalmente por podas intensas, mortalidad de árboles de sombra, maderables o incluso de café, y de rotación de árboles en el diseño del sistema (Navarro-Martínez et al., 2024; Programa Mexicano del Carbono, 2022). Este reservorio puede contribuir en un 3 al 5 % del carbono total del sistema (Soto-Pinto & Aguirre-Dávila, 2014).

2.3.2. Factores que influyen en el almacenamiento de carbono

Debido a la complejidad y la dinámica del ciclo del carbono, así como a las interacciones que hay entre los componentes de los SAFC (Figura 6), la capacidad de almacenamiento de estos sistemas va a depender de varios factores de tipo abiótico, biótico y antropogénico (causados por el manejo del agricultor), como el tipo de sistema, la composición de especies, su arreglo topológico, la edad, la ubicación geográfica y los factores ambientales (Masuhara et al., 2015).

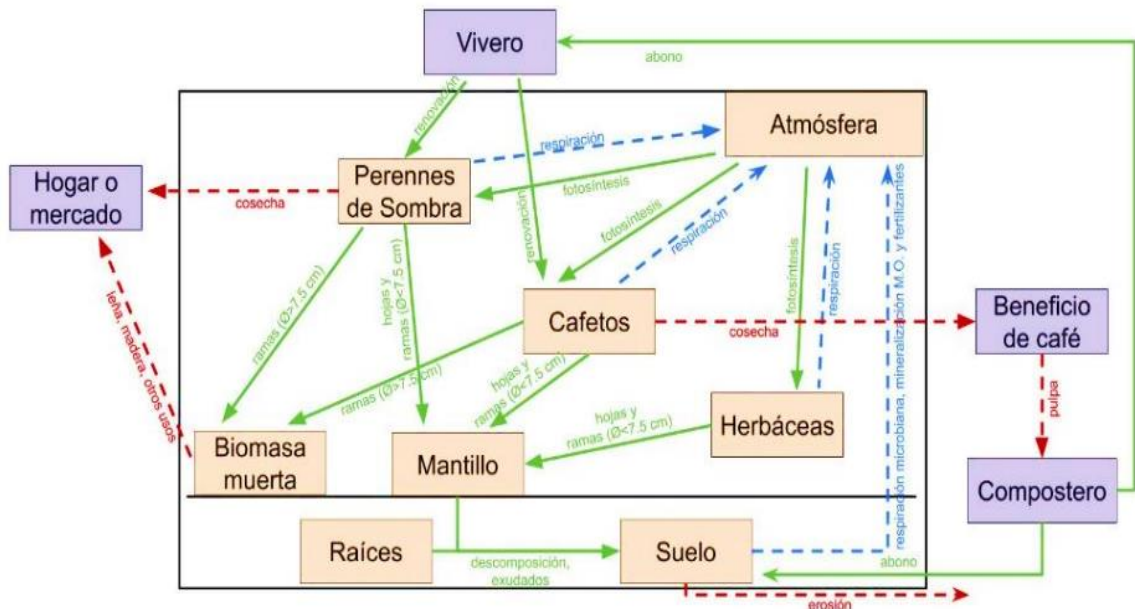


Figura 6. Interacciones de los componentes de los sistemas agroforestales de café y sus flujos de carbono.
Recuperado de (Tinoco Rueda, 2024).

Factores abióticos

Dentro de los factores de carácter abiótico destacan las características de la topografía y del suelo del sistema, así como el uso del suelo, la profundidad, el rango altitudinal y el clima. Jurado Riascos et al. (2020), observó que los sistemas productivos de café a altitudes menores a 1,600 msnm presentan menores niveles de almacenamiento de carbono, lo cual lo atribuyó a la menor acumulación de materia orgánica en los suelos y a las prácticas de manejo aplicadas en esas altitudes.

Anteriormente De la Cruz Osorio (2015), mencionó que un factor que influye en la cantidad de COS es la pendiente, debido a que el contenido de carbono orgánico aumenta conforme la pendiente disminuye. Por tal razón, el autor resaltó la importancia de considerar la topografía y el uso del suelo en la evaluación de los almacenes de carbono en SAF. Sin embargo, también cabe mencionar que el efecto de la pendiente en el contenido de COS varía dependiendo del uso del suelo y vegetación del área debido a que interceden otros factores como la presencia de vegetación, su altura y la cobertura arbórea.

Factores bióticos

La composición de la vegetación en los SAF, incluyendo aspectos morfológicos, de diversidad, densidad e incluso de edad, influyen significativamente en el almacenamiento de carbono.

Manchabajoy Cañar et al. (2022) encontraron que la presencia de árboles de sombra diversificada en sistemas productivos de café se correlaciona con un mayor almacenamiento de carbono en biomasa aérea y suelo. Además, la heterogeneidad de las plantaciones, incluyendo la densidad de plantación, el manejo técnico-agrícola y la edad de las plantas, ejerce una influencia considerable en esta capacidad de almacenamiento (Espinoza-Domínguez et al., 2012).

En investigaciones más recientes se encontró que las especies presentan diferentes cantidades de carbono almacenado en su biomasa aérea, dependiendo de la combinación de especies forestales, frutales y las que se usan

para sombra dentro de un SAF, aunado al tipo de diseño agroforestal, así como también de los factores fisiográficos, edáficos, climáticos y de manejo (Ruíz-García et al., 2022).

Clemente-Arenas (2022) evidenció que la competencia interespecífica puede influir en la cantidad de carbono almacenado por cada especie. Además, se resaltó que algunos sistemas agroforestales presentan una mayor productividad en términos de crecimiento y almacenamiento de carbono debido a combinaciones específicas de especies forestales y frutales.

Por otro lado, la edad del componente arbóreo, también tiene relevancia en los reservorios de café, pese a que muchas veces no es tomado en cuenta. Los SAF de menor edad tienen una mayor capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo en comparación con los sistemas de mayor edad. Esto se debe a la mayor acumulación de biomasa en el suelo, especialmente por la presencia de hojarasca, lo que permite un mayor almacenamiento de carbono (Salazar Zavala et al., 2018).

Factores antropogénicos

Un factor que por lo general ha sido poco valorado, pero que resulta fundamental tanto para el funcionamiento del sistema como para el almacenamiento de carbono, son todas aquellas acciones por parte del productor, es decir, las prácticas de manejo empleadas en el sistema. Dentro de estas prácticas se incluyen actividades que van desde la selección de las especies perennes multipropósito utilizadas para la sombra, hasta labores como poda, fertilización, renovación de los cafetos, entre otras.

Alvarez Espinoza (2023) realizó un análisis comparativo sobre la estructura del suelo en distintos SAF concluyendo que las decisiones de actividades de manejo impactan los resultados del almacenamiento de carbono, destacando, por ejemplo, que la incorporación de diversos elementos agroforestales y la minimización de prácticas convencionales pueden aumentar el carbono del suelo y reducir las emisiones de CO₂.

Por su parte, Cajas Lino (2024), indica que la variabilidad del almacenamiento depende de especies arbóreas, manejo como poda y arreglos agroforestales, propiedades del suelo y factores climáticos, además resalta que, estas prácticas llevadas de manera estratégica contribuyen al aumento de las reservas de carbono tanto en el componente de biomasa como en el suelo.

2.4. Estimación de almacenamiento de carbono

La medición del almacenamiento y captura de carbono en SAF es parte fundamental en la gestión forestal sostenible y el diseño de estrategias de reducción de emisiones. Sin embargo, cuantificar con precisión los flujos netos de carbono entre el sistema y la atmosfera, representa un desafío, debido al complejo ciclo biogeoquímico del carbono. A pesar de ello, constituye un paso indispensable para formular estrategias viables de mitigación del cambio climático (Morfin Ríos et al., 2015). Una forma de estimar los reservorios de carbono de los SAF es mediante el uso de ecuaciones alométricas.

2.4.1. Estimación de carbono en biomasa aérea mediante modelos alométricos

Las ecuaciones alométricas permiten estimar el almacenamiento de carbono en la biomasa forestal y agroforestal a partir de variables dendrométricas fáciles de medir, como el diámetro normal y la altura total, evitando el derribo masivo de árboles. Estas ecuaciones relacionan de forma estadística el diámetro, la altura, la densidad de la madera u otros atributos con la biomasa y el contenido de carbono, alcanzando coeficientes de determinación ajustados superiores al 0.9 en muchos de los casos, lo que se traduce en alta precisión a nivel de árbol y de rodal (Guzmán-Santiago et al., 2024; Vargas-Larreta et al., 2017).

Su principal ventaja metodológica es que ofrecen una estimación no destructiva, rápida y de bajo costo en comparación con el muestreo destructivo, por lo que son adecuadas para inventarios forestales y sistemas agroforestales, donde el recurso debe conservarse (Brown, 2002; Camargo García et al., 2023; Dutta Roy et al., 2023).

Además, las ecuaciones específicas por especie o por sitio mejoran notablemente la exactitud frente a modelos genéricos reduciendo sesgos de entre 50 y 60 % en la estimación de biomasa y, por ende, de carbono (Ameztegui et al., 2022; Darcha et al., 2025; Joncas et al., 2024). Por ello, el uso de ecuaciones alométricas locales y específicas se considera hoy una herramienta clave para cuantificar con confiabilidad las reservas de carbono y apoyar programas de mitigación como REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest) y los mercados de carbono voluntarios (Gauí et al., 2024; Kralicek et al., 2017).

2.4.2. Estimación de carbono orgánico del suelo mediante el método Walkley y Black

Es una técnica clásica que la NOM-021-SEMARNAT-2000 adopta en su método AS-07. Consiste en la estimación del COS mediante la oxidación del carbono con dicromato de potasio en medio ácido sulfúrico concentrado. Para ello, se pesa una muestra de suelo seco (0.500 g), se agrega dicromato de potasio 1 N y ácido sulfúrico concentrado, se agita y se deja enfriar (la reacción es violenta y genera vapores), luego se diluye con agua destilada, se añaden ácido fosfórico y un indicador (difenilamina u ortofenantrolina), y se titula el exceso de dicromato con sulfato ferroso 1 N hasta obtener un color verde; el carbono orgánico se calcula a partir de la diferencia entre el blanco y la muestra, aplicando un factor de corrección que generalmente es 1.724, esto porque el método no oxida completamente todo el carbono, actuando principalmente sobre las formas más activas y dejando sin oxidar parte del material orgánico fresco y grueso, lo que puede subestimar ligeramente la materia orgánica del suelo (Francisco et al., 2025).

Este método es adecuado en relación a su costo y efectividad. Sin embargo, es importante considerar que su exactitud depende fuertemente del tipo de suelo, del protocolo (con o sin calentamiento) y del factor de corrección aplicado.

2.5. Literatura citada

- Aguirre-Cadena, J. F., Cadena-Iñiguez, J., Ramírez-Valverde, B., Trejo-Téllez, B. I., Juárez Sánchez, J. P., & Morales-Flores, F. J. (2016). Diversificación de cultivos en fincas cafetaleras como estrategia de desarrollo. Caso de Amatlán. *Acta Universitaria*, 26(1), 30–38. <https://doi.org/10.15174/au.2016.833>
- Alvarez Espinoza, H. (2023). *Estudio comparativo en la estructura físico química de los suelos de sistemas agroforestales instalados por los proyectos de desarrollo alternativo en el Valle del Monzón-Tingo Maria*. [Maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/982ffd5d-654b-4929-a69e-904c5b068a8c/content>
- Ameztegui, A., Rodrigues, M., & Granda, V. (2022). Uncertainty of biomass stocks in Spanish forests: a comprehensive comparison of allometric equations. *European Journal of Forest Research*, 141(3), 395–407. <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01444-w>
- Apodaca-González, C., Juárez-Sánchez, J. P., Ramírez-Valverde, B., Díaz-Ruiz, R., Rodríguez-Escobedo, F. J., & Vázquez-Solís, V. (2020). La alimentación familiar de pequeños productores de café y variabilidad climática en Huehuetla, Puebla, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 17(2), 375–396.
- Ararsa, F., & Endalamaw, T. (2024). Carbon Sequestration Potential of Coffee Based Agro-Forestry Systems in Nono Sale Forest, Southwest Ethiopia. *International Journal of Environmental Protection and Policy*, 12(2), 44–53. <https://doi.org/10.11648/j.ijepp.20241202.12>
- Ayala-Montejo, D., Valdés-Velarde, E., & Romo-Lozano, J. L. (2021). Análisis y priorización de sistemas de producción asociadas al café y aguacate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(3), 525–539. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i3.2377>
- Brown, S. (2002). Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116(3), 363–372. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00212-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00212-3)
- Burbano Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Cajas Lino, P. (2024). *Relación entre el gradiente altitudinal y el carbono almacenado de los cafetales en el distrito de Chaglla, Región Huánuco*. [Licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/0a975e5b-1758-4e9b-b2ef-54484264737b/content>

- Camargo García, J. C., Arango Arango, A. M., & Trinh, L. (2023). The potential of bamboo forests as a carbon sink and allometric equations for estimating their aboveground biomass. *Environment, Development and Sustainability*, 26(8), 20159–20187. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03460-1>
- Celi-Delgado, L., & Aguirre-Mendoza, Z. (2022). Caracterización de los sistemas agroforestales tradicionales de la parroquia Zumba, cantón Chinchipe, Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), 814–837. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2626
- Clemente-Arenas, E. R. (2022). Carbono almacenado en la biomasa aérea y su valoración económica en los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo, Madre de Dios - Perú. *Revista Forestal Del Perú*, 37(1), 54–68. <https://doi.org/10.21704/rfp.v37i1.1593>
- Congreso de la Unión. (2012). *Ley General de Cambio Climático*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>
- Contreras Hernández, A., Osorio Rosales, M. L., & Ortega-Argueta, A. (2020). Proyecto Café In Red en la Zona Centro del Estado de Veracruz: proceso metodológico y resultados generales. In R. López Morgado & G. Díaz Padilla (Eds.), *Diagnóstico, productividad y ambiente en cafetales: estudios regionales y de caso* (Primera, pp. 5–21). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Darcha, G., Birhane, E., Kassa, H., & Gebrewahid, Y. (2025). Allometric equations to predict aboveground biomass and carbon stock of *Faidherbia albida* in parkland agroforestry. *Forest Science and Technology*, 21(3), 221–232. <https://doi.org/10.1080/21580103.2025.2497246>
- Dutta Roy, A., Das, S. K., & Debnath, B. (2023). A non-destructive approach to develop tree-level allometric equations for estimating aboveground biomass in the forests of Tripura, Northeast India. *Tropical Ecology*, 64(3), 532–542. <https://doi.org/10.1007/s42965-022-00280-8>
- Escamilla Prado, E., & Díaz Cárdenas, S. (2016). *Sistemas de cultivo de café en México* (S. Córdova Santamaría, Ed.; Segunda). Centro Nacional de Investigación Innovación y Desarrollo Tecnológico del Café.
- Escamilla-Prado, E., Ayala-Montejo, D., & Quispe-Huisñay, G. C. (2026). *Los Sistemas Agroforestales para el Bienestar Social Comunitario en México. Volumen II: Tradición y experiencias agroforestales desde los territorios: II* (Primera). Comisión Nacional Forestal, Universidad Autónoma Chapingo, El Colegio de la Frontera Sur.
- Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., & Torres-Rivera, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revistas Chapingo Seria Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVIII(1), 57–70. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.04.030>

- Farfán Valencia, F. (2014). *Agroforestería y sistemas agroforestales con café* (S. M. Marín L., Ed.). FNC-Cenicafé. https://www.cenicafe.org/es/publications/Agroforester%C3%ADa_y_sistemas_agroforestales_con_caf%C3%A9.pdf
- Francisco, J., Guzmán, P., Vazquez, A., & Robledo-Santoyo, E. (2025). *Procedimientos de análisis para diagnosticar la fertilidad del suelo* (Primera). Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. <https://www.researchgate.net/publication/391773424>
- Gabriel-Hernández, L., & Barradas, V. L. (2024). Panorama of Coffee Cultivation in the Central Zone of Veracruz State, Mexico: Identification of Main Stressors and Challenges to Face. *Sustainability*, 16(2), 802. <https://doi.org/10.3390/su16020802>
- Gasparín García, E. M., Nava Tablada, M. E., Escamilla Prado, E., & Vilaboa Arroniz, J. (2023). Participación de la mujer en la cafecultura de las altas de Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(2). <https://doi.org/10.56369/tsaes.4759>
- Gauí, T. D., Cysneiros, V. C., de Souza, F. C., de Souza, H. J., Silveira Filho, T. B., Carvalho, D. C. de, Pace, J. H. C., Vidaurre, G. B., & Miguel, E. P. (2024). Biomass Equations and Carbon Stock Estimates for the Southeastern Brazilian Atlantic Forest. *Forests*, 15(9), 1568. <https://doi.org/10.3390/f15091568>
- Guajardo Panes, R. A., Díaz Padilla, G., López Morgado, R., & Hernández Martínez, G. (2020). Ordenamiento e implementación de un Observatorio Cafetalero en la Zona Centro del Estado de Veracruz (OC-ZCEV). In R. López Morgado & G. Díaz Padilla (Eds.), *Diagnóstico, productividad y ambiente en cafetales: estudios regionales y de caso*. (Primera, pp. 22–56). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Guzmán-Santiago, J. C., De los Santos-Posadas, H. M., Vargas-Larreta, B., Gómez-Cárdenas, M., & Marroquín-Morales, P. (2024). Estimación de biomasa y carbono aéreo en bosques templados del sur de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(2). <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.3934>
- Hernández Cuadra, E., Pineda Gómez, J. A., Hernández Moreno, T., & Vargas Álvarez, D. (2025). Retos Organizativos y Productivos en Zonas Productoras de Café: Revisión De Literatura. *Ibero Ciencias - Revista Científica y Académica* - ISSN 3072-7197, 4(4), 340–365. <https://doi.org/10.63371/ic.v4.n4.a385>
- Hernández Martínez, G., Escamilla Femat, S., Velázquez Premio, T., & Martínez Marín, J. L. (2020). Análisis de la cadena de suministro del café en el Centro de Veracruz: situación actual, retos y oportunidades. In R. López Morgado & G. Díaz Padilla (Eds.), *Diagnóstico, productividad y ambiente en cafetales:*

- estudios regionales y de caso* (Primera, pp. 81–111). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Hernández Vásquez, E., Campos Ángeles, G. V., Enríquez del Valle, J. R., Rodríguez-Ortiz, G., & Velasco Velasco, V. A. (2019). Captura de carbono por *Inga jinicuil* Schltdl. En un sistema agroforestal de café bajo sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(9), 11–21. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i9.536>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018, May 18). *¿Qué es el cambio climático?* <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/que-es-el-cambio-climatico>
- IPCC. (2021). *Cambio Climático 2021: Un resumen para todo el mundo* (Cambridge University Press., Tran.). <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Joncas, M., Atangana, A. R., Wolf, V. L. F., Kouassi, G., Kouamé, C., & Khasa, D. (2024). Improving the precision of estimating carbon sequestration potential in four tree and shrub agroforestry species through the comparison of general and specific allometric equations in Côte d'Ivoire. *Agroforestry Systems*, 98(7), 2533–2545. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01049-9>
- Jurado Riascos, M. A., Ordóñez Jurado, H. R., & Lagos Burbano, T. C. (2020). Evaluación de la captura de carbono en sistemas productivos (*Coffea arabica* L.), Consacá, Nariño, Colombia. *Revista Luna Azul*, 51, 166–181. <https://doi.org/10.17151/luaz.2020.51.9>
- Kralicek, K., Huy, B., Poudel, K. P., Temesgen, H., & Salas, C. (2017). Simultaneous estimation of above- and below-ground biomass in tropical forests of Viet Nam. *Forest Ecology and Management*, 390, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.030>
- López Morgado, R. (2021). Beneficiado del café . In R. López Morgado, G. Díaz Padilla, & A. Zamarripa Colmenero (Eds.), *El sistema producto café en México: problemática y tecnología de producción* (Primera, pp. 389–422). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- López Morgado, R., García Mayoral, L. E., & Castillo Guerrero, M. C. (2021). Manejo del cafetal. In López Morgado, G. Díaz Padilla, & A. Zamarripa Colmenero (Eds.), *El sistema producto café en México: problemática y tecnología de producción* (Primera, pp. 163–206). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- López Morgado, R., Guajardo Panes, R. A., & García Mayoral, L. E. (2020). Diagnóstico participativo de la cafecultura en la Zona Centro del Estado de Veracruz: sistematización estadística de variables. In R. López Morgado & G. Díaz Padilla (Eds.), *Diagnóstico, productividad y ambiente en cafetales: estudios regionales y de caso* (Primera, pp. 47–80). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

- Loreto, D., Esperón-Rodríguez, M., & Barradas, V. L. (2017). The climatic-environmental significance, status and socio-economic perspective of the grown-shade coffee agroecosystems in the central mountain region of Veracruz, Mexico. *Investigaciones Geográficas*, (92). <https://doi.org/10.14350/rig.51876>
- M. Toledo, V., & Moguel, P. (1996). El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad. *Ciencias, Facultad de Ciencias de UNAM*, (43), 40–51. <https://www.revistacienciasunam.com/images/stories/Articles/43/CNS04306.pdf>
- Manchabajoy Cañar, J. P., Andrade Díaz, D., & Castillo Marín, Á. J. (2022). Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café en el departamento de Nariño. *Ciencia y Agricultura*, 19(1), 28–44. <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358>
- Martínez-Davila, J. P., Rosales-Martínez, V., Osorio-Acosta, F., López-Romero, G., Asiaín-Hoyos, A., & Estrella-Chulím, N. (2018). Aspectos culturales, sociales y productivos para una tipología de cafecultores. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 15(1), 47–61. <https://www.scielo.org.mx/pdf/asd/v15n1/1870-5472-asd-15-01-47.pdf>
- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J. C., Salcedo, E., Juárez, M. de J., & Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica y Tecnología*, 4(1), 66–93.
- Moguel, P., & Toledo, V. M. (1999). Biodiversity Conservation in Traditional Coffee Systems of Mexico. *Conservation Biology*, 13(1), 11–21. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97153.x>
- Mondragón, F. (2021). Carbon dioxide cycles in the formation and use of fossil fuels and their effect on climate change. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(176), 833–849. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1364>
- Montejo Morales, A. K., Castillo Santiago, M. Á., Soto Pinto, M. L., & León Martínez, N. S. (2022). Cambio en la cobertura y uso de suelo en sistemas agroforestales de café durante el periodo 1989-2020 en Ocosingo, Chiapas. *Revista de Geografía Agrícola*, (69), 147–165. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2022.69.07>
- Morfin Ríos, J. E., Michel Fuentes, J. M., González Murguía, R., Carrillo, O., Mayorga, R., Rangel, L., Orozco Orozco, J., Rodríguez Alcaraz, G., & Guerrero Pacheco, G. (2015). *Protocolo: Estimación de las reservas de carbono en la biomasa forestal en México*. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/35/6917Anexo%208.pdf>
- Navarro-Martínez, J., Godínez-Jaimes, F., Rosas-Acevedo, J. L., & Méndez-González, J. (2024). Reservorio de carbono en necromasa y sotobosque en

- un ecosistema forestal templado de Guerrero, México. *Madera y Bosques*, 30(3), e3032683. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3032683>
- Orús, A. (2024, March 19). *Statista*. Producción Mundial de Café Desde 2003/04 Hasta 2023/24.
- Ovalle Rivera, O. (2016). *Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café en Costa Rica*. <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/7b6f222f-4f07-45f4-aaff-d04d3086045b/content>
- Programa Mexicano del Carbono. (2022). *Manual de muestreos cuantitativos de carbono para bosques y selvas*. https://www.pmc carbono.org/pmc/descargas/proyectos/rescms/Manual_muestreo_carbono.pdf
- Rojas-Herrera, J. J., & Martín Olguín-Pérez, A. (2018). Origen, desarrollo y perspectivas de las cooperativas cafetaleras de Huatusco, Veracruz. *LiminaR. Estudios Sociales y Humanísticos*, XVI(1), 119–133.
- Rosales-Martínez, V., Martínez-Dávila, J. P., & Casanova-Pérez, L. (2020). Coffee Agroecosystem in Mexico: Productive Culture between Tradition and Change. *Agro Productividad*, 13(11). <https://doi.org/10.32854/agrop.v13i11.1817>
- Ruíz García, P. (2015). *Diseño de tecnologías agroforestales con mayor potencial de fijación de carbono en Ajuchitlán, Morelos* [Maestría]. Universidad Autónoma Chapingo.
- Ruíz Nápoles, P., Castañeda León, J., & Moreno Reyes, E. (2023). Greenhouse gas emissions in the Mexican economy and mitigation policies, 2020-2030. *Trimestre Económico*, 90(358), 531–551. <https://doi.org/10.20430/ete.v90i358.1662>
- Ruíz-García, P., Monterroso-Rivas, A. I., Valdés-Velarde, E., Escamilla-Prado, E., & Gómez-Díaz, J. D. (2022). Reservas de carbono en sistemas agroforestales con café (*C. arabica* L.) ante el cambio climático: caso México. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3). <https://doi.org/10.15517/am.v33i3.48671>
- SADER. (2022, October 13). *Cultivo de café en México*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-de-cafe-en-mexico>
- SADER. (2024, May 29). *Cultivo de café: Desde la planta hasta tu taza*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-de-cafe-desde-la-planta-hasta-tu-taza>
- Salazar Zavala, A., Saucedo Bardales, J. C., & Méndez Fasabi, L. D. (2018). Evaluación de la captura de carbono en suelos de sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica* L.) en los distritos Mariscal Benavides y Longar, provincia Rodríguez de Mendoza, departamento de Amazonas. *Revista*

- Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 1(1), 20–26.
<https://doi.org/10.25127/ucni.v1i1.261>
- Salgado Veramendi, N., Romero-Chavez, L. E., Huerto Pajuelo, E. S., Ibarra Porras, C. del C., Cunyas-Camayo, J. M., Aldava Pardave, U., Vallejos-Torres, G., & Solórzano Acosta, R. (2025). Carbon Storage in Coffee Agroforestry Systems: Role of Native and Introduced Shade Trees in the Central Peruvian Amazon. *Agriculture*, 15(13), 1415.
<https://doi.org/10.3390/agriculture15131415>
- Salgado-Mora, M. Guadalupe., Esquinca Ruíz, Humberto., Cerda Ocaranza, M. Gerardo., & Pinoargote Chang, Miryan. (2021a). *Tópicos selectos de investigación en conservación de recursos naturales en América Latina*. Universidad Autónoma de Chiapas.
- Salgado-Mora, M. Guadalupe., Esquinca Ruíz, Humberto., Cerda Ocaranza, M. Gerardo., & Pinoargote Chang, Miryan. (2021b). *Tópicos selectos de investigación en conservación de recursos naturales en América Latina*. Universidad Autónoma de Chiapas.
- SEMARNAT. (2020). *Informe de Resultados del Registro Nacional de Emisiones 2015-2018*.
- SIAP. (2023). *Café: Producción nacional y estatal por rendimiento y superficie*.
<https://www.gob.mx/siap>
- SIAP. (2025). *Avance de siembras y cosechas por estado y cultivo*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
https://nube.agricultura.gob.mx/avance_agricola/
- Soto-Pinto, L., & Aguirre-Dávila, C. M. (2014). Carbon Stocks in Organic Coffee Systems in Chiapas, Mexico. *Journal of Agricultural Science*, 7(1).
<https://doi.org/10.5539/jas.v7n1p117>
- Tinoco Rueda, J. Á. (2024). *Guía para la Determinación del Almacenamiento de Carbono en Territorios Cafetaleros de Veracruz*.
- Ulian, T., Way, M., Gianella, M., Bell, E., Flores Ortiz, C. M., Cabrera Santos, D., Sampayo Maldonado, S., Rodríguez Arévalo Norma Isela, Rojas Rojas Angela Viviana, Vázquez Corzas, F. G., Cobos Silva, J., Miranda García, L., & Hunter Manson, R. (2023). *Incrementando la captura de carbono en cafetales bajo sombra: 1ra. Edición* (J. Cobos Silva, D. Cabrera Santos, & M. Gianella, Eds.). Royal Botanic Gardens, Kew, FESI-UNAM, Pronatura Veracruz A.C.
- UNCCD. (2015). *Cambio climático y degradación de la tierras: Acercar los conocimientos a las partes interesadas*.
https://www.unccd.int/sites/default/files/documents/2015_Climate_LD_Outcomes_CST_conf_SPA_0.pdf

- Valdés-Velarde, E., Vázquez-Domínguez, L. P., Tinoco-Rueda, J. Á., Sánchez-Hernández, R., Salcedo-Pérez, E., & Lagunes-Fortiz, E. (2022). Servicio ecosistémico de carbono almacenado en cafetales bajo sombra en sistema agroforestal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(28), 287–297. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3283>
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., & Álvarez-González, J. G. (2017). Allometric Equations for Estimating Biomass and Carbon Stocks in the Temperate Forests of North-Western Mexico. *Forests*, 8(8), 269. <https://doi.org/10.3390/f8080269>
- Velandia, M., Trejo-Pech, C., Rodríguez-Padrón, B., Servín-Juárez, R., & Stripling, C. (2023). Challenges and managerial strategies of coffee cooperatives from the Huatusco Region in Mexico: The Perspective of leaders. *Agrociencia*. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i8.2741>
- Villavicencio-Enríquez, L. (2013). Caracterización agroforestal en sistemas de café tradicional y rústico, en San Miguel, Veracruz, México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 67–80. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.051>
- Zapata Arango, P. C. (2019). Composición y estructura del dosel de sombra en sistemas agroforestales con café de tres municipios de Cundinamarca, Colombia. *Ciencia Florestal*, 29(2), 685–697. <https://doi.org/10.5902/1980509827037>

3. CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA Y SOCIOECONÓMICA DE SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ EN HUATUSCO, VERACRUZ.³

3.1. Resumen

Los sistemas agroforestales de café (SAFC) constituyen una estrategia clave para la sostenibilidad productiva y la mitigación del cambio climático, debido a su capacidad para almacenar carbono, que está sujeta a múltiples factores. Ante ello, surge la necesidad de caracterizar estos sistemas a nivel local. En este contexto, el objetivo de este estudio fue caracterizar los SAFC de Huatusco, Veracruz, mediante el análisis integrado de sus componentes biofísicos, estructurales, florísticos y socioeconómicos. La caracterización biofísica se realizó mediante la delimitación de unidades del paisaje con Sistemas de Información Geográfica, integrando variables fisiográficas, climáticas y de uso de suelo. La estructura y composición de la vegetación se evaluaron en nueve parcelas mediante índices de diversidad (Shannon y Simpson) y el índice de valor de importancia (IVI), mientras que el componente socioeconómico se analizó mediante encuestas semiestructuradas con base en el enfoque de “Modos de vida de las familias cafetaleras” aplicadas a 14 parcelas. Los resultados muestran que los SAFC representan el uso del suelo predominante con 7,847.38 ha (38.67 % del territorio). Mientras que el ESP y APS ocuparon una superficie considerablemente menor con 238.08 ha (1.17 %) y 42.14 ha (0.21 %). Los SAFC se concentraron en lomeríos de zona baja, bajo condiciones semicálidas húmedas, con pendientes moderadas y altitudes intermedias (850-1,410 msnm), condiciones favorables para la producción de biomasa y acumulación de carbono. El SAFC de policultivo tradicional presentó mayor complejidad estructural, diversidad vegetal y heterogeneidad florística respecto al sistema especializado ($H' = 2.67$; $D = 0.89$) con diferencias significativas ($p < 0.001$) y baja similitud florística. En los aspectos socioeconómicos se identificó que los productores emplean prácticas de manejo como chapoleo, la renovación de cafetales, las podas de selección y mantenimiento, el control de plagas y enfermedades, y la aplicación de fertilizantes y abonos orgánicos.

Palabras clave: policultivo tradicional; sistemas de cultivo de café; unidades del paisaje; diversidad vegetal; almacenamiento de carbono.

³ Tesis de Maestría en Ciencias, Programa de Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Lisset Reyes Hernández

Directora de Tesis: Dra. Rosa María García Núñez

BIOPHYSICAL AND SOCIOECONOMIC CHARACTERIZATION OF COFFEE AGROFORESTRY SYSTEMS IN HUATUSCO, VERACRUZ.⁴

3.2. Abstract

Coffee agroforestry systems (SAFC) are a key strategy for sustainable production and climate change mitigation, due to their carbon storage capacity, which is influenced by multiple factors. Therefore, there is a need to characterize these systems at the local level. In this context, the objective of this study was to characterize the SAFC of Huatusco, Veracruz, through an integrated analysis of their biophysical, structural, floristic, and socioeconomic components. The biophysical characterization was conducted by delineating landscape units using Geographic Information Systems, integrating physiographic, climatic, and land-use variables. Vegetation structure and composition were assessed on nine plots using diversity indices (Shannon and Simpson) and the Importance Value Index (IVI), while the socioeconomic component was analyzed through semi-structured surveys based on the “Lifestyles of Coffee-Farming Families” approach, applied to 14 plots. The results show that SAFC represent the predominant land use, covering 7,847.38 ha (38.67% of the territory). In contrast, ESP and APS occupied a considerably smaller area, at 238.08 ha (1.17%) and 42.14 ha (0.21%), respectively. SAFC were concentrated on lowland hillsides, under warm-humid conditions, with moderate slopes and intermediate elevations (850–1,410 m a.s.l.), conditions favorable for biomass production and carbon sequestration. The traditional polycultural agroforestry system exhibited greater structural complexity, plant diversity, and floristic heterogeneity compared to the specialized system ($H' = 2.67$; $D = 0.89$), with significant differences ($p < 0.001$) and low floristic similarity. In terms of socioeconomic aspects, it was found that producers employ management practices such as weeding, coffee plantation renewal, selective and maintenance pruning, pest and disease control, and the application of fertilizers and organic compost.

Key Words: traditional polyculture; coffee farming systems; landscape units; plant diversity; carbon storage.

⁴ Master's Thesis in Science, Graduate Program in Agroforestry for Sustainable Development, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Lisset Reyes Hernández

Advisor: Dra. Rosa María García Núñez

3.3. Introducción

Durante los últimos años, los sistemas agroforestales (SAF) han cobrado gran relevancia en los campos de la agricultura, conservación ambiental y crisis climática (Marroquin-Morales et al., 2024; FAO, 2026). Estos sistemas se definen como la integración deliberada de componentes forestales, agrícolas y/o pecuarios dentro de una misma unidad de superficie, que permiten obtener beneficios ambientales, económicos y sociales (Escamilla-Prado et al., 2026; SADER, 2020).

Entre los SAF más representativos en México destacan los sistemas cafetaleros bajo sombra, caracterizados por una elevada complejidad estructural derivada de la integración de diversos estratos de vegetación que interactúan con el cultivo de café (Ulian et al., 2023). Esta estructura favorece diversas interacciones ecológicas y productivas que contribuyen a la optimización del uso del suelo, la diversificación de la producción y al mantenimiento de funciones ecológicas del agroecosistema (Casanova-Lugo et al., 2011; Farfán Valencia, 2014). En este contexto, los sistemas cafetaleros bajo sombra pueden mejorar la estabilidad económica de los productores al diversificar las fuentes de ingreso, reducir la vulnerabilidad ante fluctuaciones del mercado, plagas o condiciones climáticas adversas, y favorecer la conservación y provisión de diversos servicios ecosistémicos (Ruiz García et al., 2020; Ulian et al., 2023).

Dentro de los servicios ecosistémicos asociados a estos sistemas, el almacenamiento de carbono (C) adquiere especial relevancia. En los últimos años la cuantificación de los reservorios de C en SAF se ha convertido en un componente clave de diversos proyectos que buscan alternativas viables a la mitigación del cambio climático (De la Cruz Osorio, 2015). No obstante, la capacidad de estos reservorios se ve influenciada por múltiples factores biofísicos y socioeconómicos, entre los que destacan el manejo agronómico, la composición de especies, las condiciones ambientales y las características socioeconómicas de los productores (Masuhara et al., 2015; Ruiz García et al., 2020).

En este sentido, resulta fundamental identificar, cuantificar y analizar los factores que inciden en cada sistema productivo de interés con el fin de comprender su dinámica y aprovechar su potencial de forma más precisa y eficiente. Una herramienta clave para ello, es la caracterización, la cual permite describir de manera integral y actualizada los aspectos fisicobióticos, socioeconómicos y culturales del sistema productivo, lo que proporciona información relevante para definir su estructura, funcionamiento, potencialidades y limitantes (Ballesteros Possú et al., 2024; CONAFOR, 2025).

De manera específica, la caracterización a través de la identificación de unidades del paisaje, distingue áreas relativamente homogéneas en función de factores biofísicos (Marquina Pérez et al., 2024). Para ello, el uso de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ayuda a integrar información espacial y temática para delimitar estas unidades con mayor precisión y rapidez. En adición, el análisis de la diversidad vegetal y de los aspectos socioeconómicos aportan a tener un contexto amplio sobre los componentes y funcionamiento del sistema de producción (Bautista Calderon et al., 2018).

En regiones cafetaleras, como Huatusco, Veracruz, los SAF presentan una marcada heterogeneidad ambiental y productiva, resultado de la interacción entre los distintos factores que intervienen. Por lo cual, la caracterización constituye un aspecto clave para comprender la distribución y dinámica de los sistemas agroforestales de café (SAFC). No obstante, en la región de Huatusco, Veracruz, existe información limitada sobre la caracterización biofísica y socioeconómica de los SAFC, particularmente en relación con los factores que influyen en su funcionamiento y capacidad potencial para almacenar C.

Es por lo anterior que, el objetivo de este trabajo fue caracterizar los sistemas de cultivo de café bajo sombra diversificada en Huatusco, Veracruz, a través del análisis de sus componentes bióticos, abióticos y antropogénicos, con el propósito de comprender las condiciones en las que se desarrollan estos sistemas e identificar factores que pueden incidir en el almacenamiento de C así como en su estabilidad y bienestar.

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el municipio de Huatusco, Veracruz, el cual, cuenta con una extensión de 20,290.91 ha y se localiza en la región montañosa del estado, entre las coordenadas extremas 97°03'22.32" y 96°41'02.40" longitud oeste y 19°04'21.00" y 19°13'07.32" latitud norte (Figura 7) (INEGI, 2025).

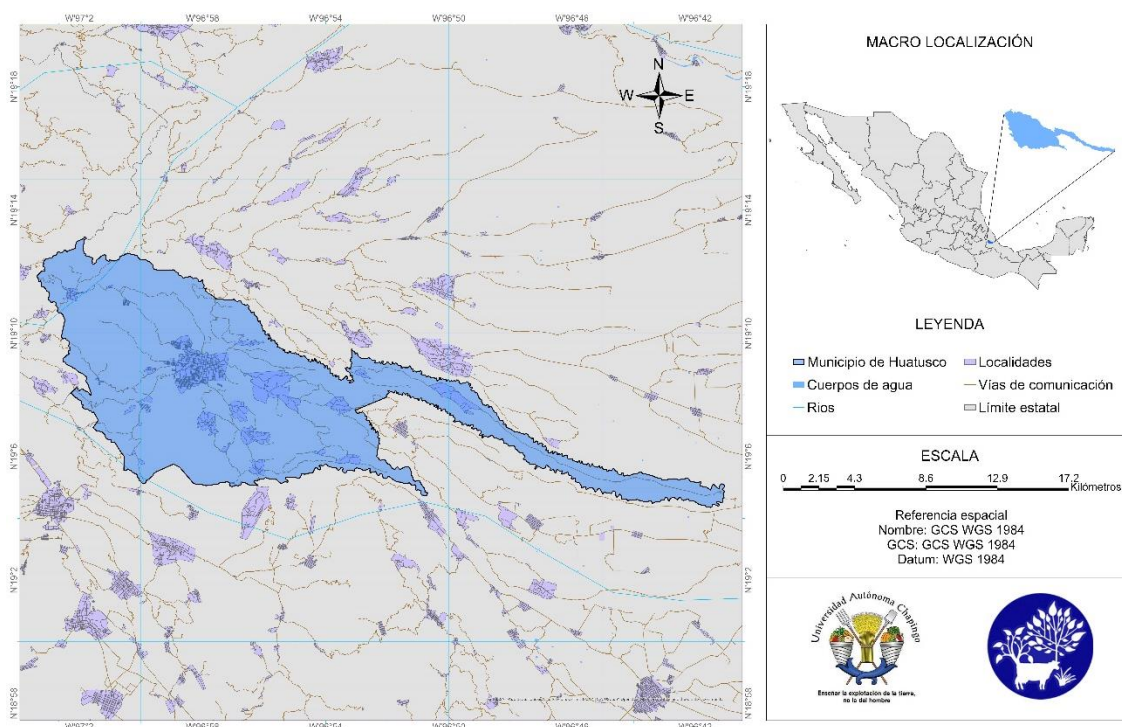


Figura 7. Ubicación del área de estudio.

Huatusco pertenece a una de las principales regiones cafetaleras del estado de Veracruz, con una superficie de alrededor de 7,467 ha cultivadas de acuerdo con reportes de (SIAP, 2025). Estas se distribuyen en diversos sistemas de cultivo, destacando los establecidos bajo sombra diversificada. Cuyos mayores representantes son el sistema especializado (ESP) y el policultivo tradicional (POL), abarcando aproximadamente el 50 % y 45 % de los predios, respectivamente (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016). Con base en esta distribución, se seleccionaron dichos sistemas como unidades de análisis del estudio, además del sistema de café a pleno sol (APS).

3.4.2. Caracterización del medio biofísico del área de estudio

La caracterización biofísica se realizó mediante la identificación y delimitación de las unidades del paisaje, siguiendo la metodología descrita por Arrazate Jiménez et al. (2022) y Valencia-Trejo et al. (2020), con ajustes específicos para el área de estudio. La metodología integra información fisiográfica, climática y de uso de suelo y vegetación mediante el análisis espacial con SIG. Para ello, se utilizó el software QGIS Desktop versión 3.36.3 (QGIS Development Team, 2024).

Posteriormente, las unidades del paisaje obtenidas fueron validadas mediante recorridos de campo, verificando la correspondencia entre cartografía y las condiciones observadas en el sitio. A partir de estas, se seleccionaron sitios de muestreo representativos de los dos principales sistemas cafetaleros bajo sombra: ESP y POL.

Mapa fisiográfico

Para su elaboración se utilizó el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) con una resolución espacial de 15 m, obtenido de INEGI. Este insumo, fue proyectado al sistema de coordenadas UTM y se le aplicó la herramienta “rellenar celdas sin datos” en QGIS, con el fin de corregir vacíos en la información.

A partir del CEM se generó un shapefile de curvas a nivel a cada 50 m, y un modelo Triangulated Irregular Network (TIN), para la representación de las alturas y del relieve. Asimismo, con el CEM se obtuvo el mapa de pendientes, el cual se reclasificó en cinco categorías en relación al porcentaje: plano (0-2 %), moderadamente inclinado (2-8 %), inclinado (8-15 %), moderadamente escarpado (15-40 %) y escarpado (>40 %) de acuerdo con (Arrazate Jiménez et al., 2022). Finalmente, las geoformas fueron delimitadas mediante interpretación visual, utilizando como base los mapas elaborados de pendientes, curvas de nivel y el modelo de topoformas, considerando además las provincias y subprovincias fisiográficas, así como el conocimiento previo del área de estudio.

Mapa climático

Se elaboró con el shapefile de unidades climáticas de CONABIO, en coordenadas geográficas y escala 1:1000000, basada en la clasificación de Köppen modificada por García (CONABIO, 2025). Esta información fue recortada con respecto a límite del municipio de Huatusco. De manera complementaria, se incorporaron atributos climáticos como la precipitación media anual y la temperatura media, mínima y máxima anual, que se emplearon para la descripción detallada del factor climático en el área de estudio.

Mapa de uso de suelo y vegetación

Se elaboró a partir de la capa shapefile serie VII del geoportal de la CONABIO, a una escala de 1 a 250, 000 y en coordenadas geográficas, recortada con respecto al área de estudio. Posteriormente, se realizó una actualización mediante digitalización manual apoyada en imágenes satelitales de Google Satellite y Google Earth Pro y conocimiento previo del sitio. Durante este proceso se detallaron los polígonos de Huatusco y se agregaron cinco nuevas categorías de uso de suelo específicas del área de estudio: área minera, cuerpos de agua artificial (jagüey), cultivo de café APS, sistema ESP y SAFC. Esta última incluyen los sistemas de POL y comercial, esto debido a la dificultad para distinguirlos con precisión a partir de la información disponible. Además, la vegetación se subdividió en tres niveles de densidad (baja, media y alta) con el fin de mejorar la resolución de la clasificación.

Mapa de unidades del paisaje

Finalmente, las capas de fisiografía, clima y uso de suelo y vegetación se integraron para generar el mapa de unidades del paisaje. La delimitación se realizó mediante la superposición de todas las capas con la herramienta “Intersección múltiple” de QGIS, considerando la correspondencia espacial entre los distintos factores, para obtener unidades relativamente homogéneas.

3.4.3. Caracterización de la estructura y composición de las perennes multipropósito integradas en los sistemas agroforestales.

Se evaluaron un total de nueve parcelas, cinco correspondientes al sistema POL y cuatro al ESP. El POL se caracteriza por una alta diversidad de especies perennes multipropósito, principalmente frutales y maderables de utilidad local, las cuales, además de proporcionar sombra al cultivo de café, contribuyen a la diversificación de la producción. Mientras que, el sistema ESP presenta una menor diversidad de especies de sombra, generalmente dominada por especies del género *Inga.*, cuyo propósito principal es proporcionar la sombra adecuada para el desarrollo del cafeto.

En cada parcela se estableció una Unidad de Muestreo (UM) de 25 x 25 m (625 m²), delimitada con una cinta métrica de 100 m y estacas, y georreferenciada mediante la aplicación para teléfono móvil llamada *GPS Status*.

La caracterización agroecológica de los SAF se siguió como base la metodología de Escamilla Prado (2007), evaluando atributos de estructura de la vegetación, diversidad de especies y el valor de importancia de las especies incorporadas en los sistemas. El registro e identificación de las especies se realizó con el apoyo de los productores, complementado con verificación taxonómica mediante investigación en fuentes especializadas, registrando así cada especie con su nombre común y científico.

Estructura de la vegetación

Se evaluaron tres estratos: arbóreo, arbustivo y herbáceo. El primero conformado principalmente por las especies perennes multipropósito utilizadas para la sombra de los cafetos. El arbustivo, representado principalmente por los cafetos junto con algunas otras especies asociadas y el herbáceo representado por vegetación de porte bajo. La medición de las alturas se realizó con ayuda de cintas métricas y con la aplicación gratuita *Trees*. La cobertura y el porcentaje de sombra se estimaron mediante el método de muestreo por cuadrantes.

Para ello, cada UM se dividió en cuatro secciones, realizando mediciones en su punto central. Por otro lado, la cobertura del dosel y porcentaje de sombra se determinó mediante el procesamiento de fotografías digitales con la herramienta ImageJ versión 1.46 r (Schneider et al., 2012).

Composición florística

Para determinar la composición de las especies perennes multipropósito (estrato arbóreo) utilizadas para diversificación del cultivo de café, se utilizó el índice de Valor de importancia (IVI), índice estructural desarrollado por Curtis & McIntosh (1951), empleado principalmente para jerarquizar la dominancia de cada especie. Para su cálculo, se registraron todos los individuos de especies perennes y se midió el diámetro normal. Con esta información se estimaron los parámetros estructurales: densidad, dominancia y frecuencia.

Cuadro 2. Fórmulas utilizadas para estimar parámetros estructurales de la vegetación.

Parámetro	Fórmula	Descripción
Índice de valor de importancia	$IVI = \frac{AR_i + DR_i + FR_i}{3}$	AR_i = Densidad relativa DR_i = Dominancia relativa FR_i = Frecuencia relativa
Densidad (Relativa)	$AR_i = \left[\frac{A_i}{\sum_{i=1...n} A_i} \right] \times 100$ $A_i = N_i / E$	AR_i = densidad relativa de la especie i respecto a la densidad total. A_i = densidad absoluta N_i = número de individuos de la especie i E = superficie de muestreo (ha)
Dominancia (Relativa)	$DR_i = \left[\frac{D_i}{\sum_{i=1...n} D_i} \right] \times 100$ $D_i = \frac{AB}{E}$ $AB = \frac{\pi}{4} DAP^2$	DR_i = cobertura relativa de la especie i respecto a la cobertura D_i = dominancia absoluta AB = área basal de la especie i DAP = Diámetro a la altura del pecho (1.30 m)

Parámetro	Fórmula	Descripción
Frecuencia (Relativa)	$FR_i = \left[\frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \right] \times 100$ $F_i = \frac{P_i}{NS}$	FR_i = frecuencia relativa de la especie i respecto a la suma de las frecuencias F_i = frecuencia absoluta P_i = número de sitios en el que está presente la especie i NS = el número total de sitios de muestreo

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a la recopilación de (Gerardo Valdez et al., 2018).

Diversidad de especies

La diversidad de especies perennes se evaluó mediante los índices de Shannon-Wiener (H') y Simpson (D). El índice de Shannon es una herramienta muy buena para evaluar la biodiversidad específica, sin embargo, puede ser sesgado hacia la riqueza de especie ya que es más sensible al número de especies que a la abundancia relativa por lo que, se recomienda complementarse con otros índices para una visión más completa (Kiernan, 2024). Por tal razón, también se implementó el índice de Simpson.

Por su parte, el índice de Simpson propuesto por Pielou en 1969, mide la probabilidad de que dos individuos, dentro de un hábitat o comunidad, seleccionados al azar pertenezcan a la misma especie (Gerardo Valdez et al., 2018; Reyes Reyes et al., 2022). Ambos índices se calcularon a partir de la abundancia de especies registradas en cada UM, permitiendo una evaluación complementaria de la diversidad en los sistemas estudiados.

Cuadro 3. Fórmulas usadas para estimar la diversidad de la vegetación.

Índice	Fórmula	Descripción
Shannon-Wiener	$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln(P_i)$	H' = índice de Shannon-Wiener, concentrado entre 0 y $\ln(S)$ S = número total de especies (riqueza)

Índice	Fórmula	Descripción
	$P_i = \frac{ni}{N}$	P_i = proporción de individuos de la especie i con respecto al total de individuos en la comunidad ni = número de individuos de la especie i N = abundancia total de las especies ln = Logaritmo natural
Simpson	$D = \frac{\sum_{i=1}^S ni(ni - 1)}{N(N - 1)}$	D = índice de Simpson, el cual varía entre 0 y 1 S = número total de especies (riqueza) ni = Número de individuos de la especie i N = Número total de individuos de todas las especies

Fuente: Elaboración propia con base en Shannon & Weaver (1949) y (SIMPSON, 1949).

3.4.4. Identificación de las prácticas de manejo y aspectos socioeconómicos importantes en los SAF y APS

De manera simultánea a la recopilación de datos para la caracterización de la vegetación, se aplicaron cuestionarios a los productores responsables de las parcelas evaluadas.

El cuestionario fue diseñado con base en el enfoque de “Modos de vida de las familias cafetaleras” integrando variables clave para el análisis socioeconómico de los sistemas productivos (Herrera et al., 2024). Esta herramienta estuvo conformada de cinco ejes temáticos: datos personales, eje natural, eje productivo, eje humano y eje social.

3.5. Resultados y discusión

3.5.1. Caracterización del medio biofísico del área de estudio

Mapa fisiográfico

Derivado del análisis de las curvas de nivel, se obtuvo que el municipio de Huatusco, Veracruz presenta un amplio rango altitudinal que varía de 350 a 2,050 msnm. En cuanto a la pendiente, se observó una alta heterogeneidad en la forma del relieve, sin embargo, predominan las pendientes inclinadas y pronunciadas.

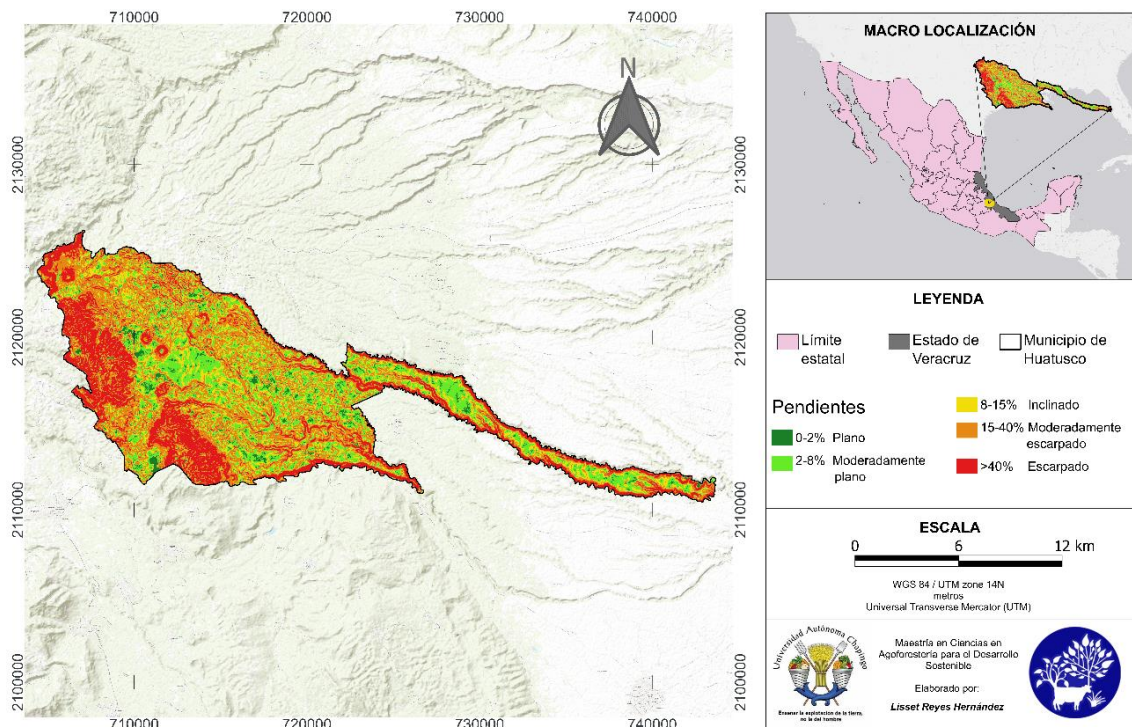


Figura 8. Pendientes presentes en Huatusco, Veracruz.

Las pendientes planas representan únicamente el 3.83 % de la superficie municipal (777.11 ha), mientras que las pendientes moderadamente inclinadas cubren el 20.49 % (4,157.65 ha). Las pendientes inclinadas corresponden al 16.95 % del territorio (3,439.50 ha). De manera contrastante, las pendientes moderadamente escarpadas constituyen la categoría predominante, con alrededor del 33.52 % de la superficie (6,801.68 ha), seguidas por las pendientes escarpadas que ocupan el 25.21 % de la superficie total (5,114.97 ha).

Espacialmente, las pendientes más pronunciadas se localizan en la parte noroeste y oeste del municipio, mientras que las zonas con pendientes planas o moderadas se concentran en la parte central, en donde se ubica la cabecera municipal, así como también en la parte sureste. Esta distribución, se debe gracias a que el municipio se encuentra sobre las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico y la Llanura Costera del Golfo Sur (INEGI, 2010).

Desde el punto de vista agroecológico, la pendiente no es una limitante para el establecimiento de cafetales en la región, ya que, en su mayoría, la distribución de cafetales está en pendientes de laderas inclinadas y escapadas (Ruiz-García et al., 2020). No obstante, estas condiciones tienen mayor riesgo de erosión y dificultan las labores agrícolas. De acuerdo con Díaz Padilla et al. (2021), las pendientes más idóneas para el cultivo de *Coffea arabica* son menores al 20 %, y para *Coffea canephora* var. Robusta menores al 25 %. Bajo este criterio, se estima que aproximadamente el 41.27 % del municipio (8,374.26 ha) presenta pendientes favorables para el establecimiento del cultivo de café.

En cuanto a las topoformas, la digitalización permitió identificar siete unidades fisiográficas distintas (Figura 9), clasificando los lomeríos y planicies en zona baja y zona alta. Los lomeríos destacan como la topoforma predominante, en conjunto estos representan poco más del 57 % del territorio (11,605.16 ha). Los lomeríos de zona alta constituyen la categoría más extensa (29.39 %), seguidos por los de zona baja (27.80 %). Las sierras representan la segunda unidad fisiográfica más representativa, estas cubren el 16.49 % de la superficie (3,346.38 ha), caracterizadas por pendientes pronunciadas y mayores altitudes, localizándose principalmente en las zonas noroeste y sur del municipio. Por su parte, los valles, ocupan el 11.78 % del territorio (2,390.10 ha) y se distribuyen principalmente en la franja sureste, asociados a la red hidrográfica del municipio. Las planicies de zona alta coinciden con el área urbana del municipio y representan el 6.55 % (1,329.19 ha), mientras que las de zona baja representan el 7.29 % (1,479.73 ha), localizándose en la porción sureste y asociadas de igual forma a la red de drenaje, lo que les confiere un alto potencial para uso agrícola.

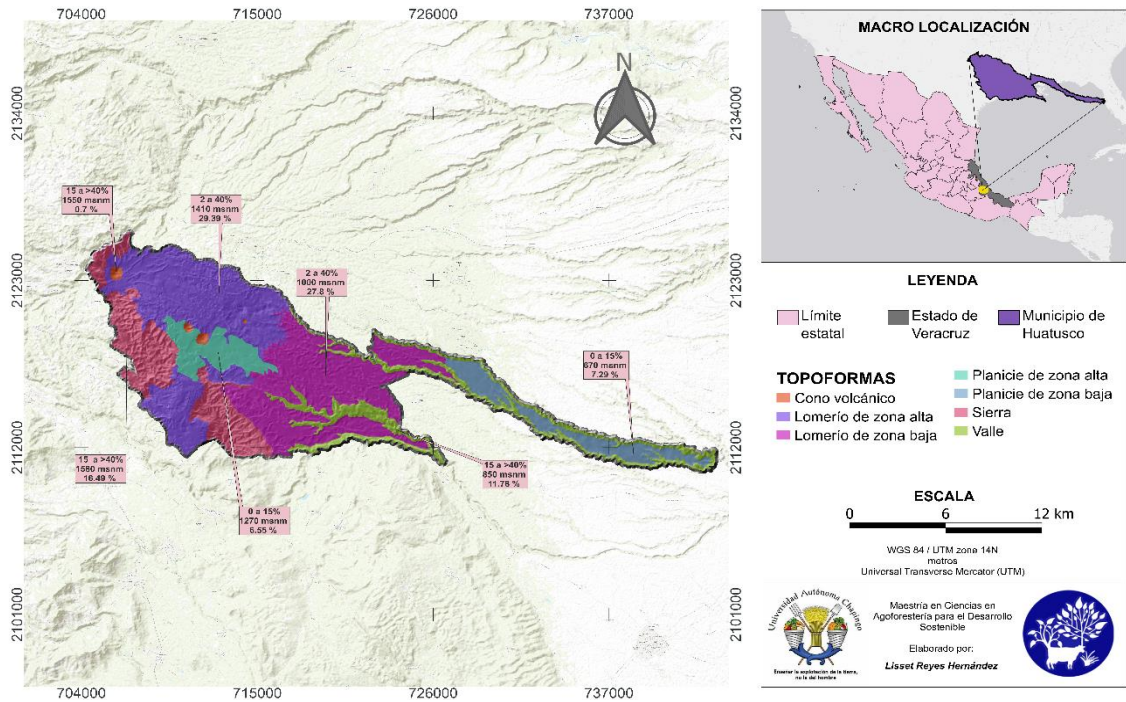


Figura 9. Topoformas presentes en Huatusco, Veracruz.

Los resultados muestran un relieve predominantemente accidentado, característico de la región, asociado a su ubicación en el piedemonte del Pico de Orizaba y a la influencia de las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico y la Llanura Costera del Golfo Sur (Díaz Padilla et al., 2021; INEGI, 2010). La fisiografía constituye un factor importante a considerar tanto para la calidad y productividad de café, como en el almacenamiento de carbono. Se ha documentado que la pendiente influye en el contenido de carbono orgánico del suelo (COS), registrándose mayores concentraciones en áreas con menor inclinación (De la Cruz Osorio, 2015). Respecto a la calidad del café, esta se encuentra estrechamente relacionada con la altitud: en México, de acuerdo con Escamilla Prado (2007) el rango idóneo oscila entre los 900 y 1,500 msnm, y considerando este rango el 63.74 % del territorio presenta altitudes favorables para la producción de café de buena calidad. Además, la altitud, al estar íntimamente relacionada con variables climáticas condiciona la distribución, el establecimiento y la producción de biomasa de las especies arbóreas que pueden integrar los SAF, afectando la capacidad del almacenamiento de C (García-García et al., 2024).

Mapa climático

Con base a la cartografía de CONABIO (2025) y la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García, se identificaron ocho unidades climáticas en el municipio de Huatusco (Figura 10), lo que muestra una alta variabilidad climática, dominada por los climas semicálidos húmedos y subhúmedos (Cuadro 4). La unidad más representativa es (A)C(m)(f), que se distribuye en poco más de la mitad del territorio (50.66 %), concentrándose en la parte centro-sur del municipio.

Cuadro 4. Climas presentes en el municipio de Huatusco, Veracruz.

Clave del clima	Tipo de clima	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
C(f)	Templado, húmedo,	2,049.85	10.10
Aw1	Cálido subhúmedo	1,195.31	5.89
	Semicálido subhúmedo del		
(A)C(w2)	grupo C	1,308.53	6.45
(A)C(m)(f)	Semicálido húmedo del grupo C	10,280.34	50.66
(A)C(fm)	Semicálido húmedo del grupo C	11,22.44	5.53
C(m)(f)	Templado, húmedo	3,464.16	17.07
Aw2	Cálido subhúmedo	220.51	1.09
(A)C(m)	Semicálido húmedo del grupo C	649.76	3.20
Total		20,290.91	100.00

La distribución espacial de las unidades climáticas reafirma que Huatusco presenta condiciones climáticas en donde predominan la humedad. También es posible notar una transición altitudinal bien definida entre los tipos de climas semicálidos y templados, lo cual influye directamente en el uso del suelo, la aptitud agrícola y la distribución de los sistemas de producción de café en el municipio.

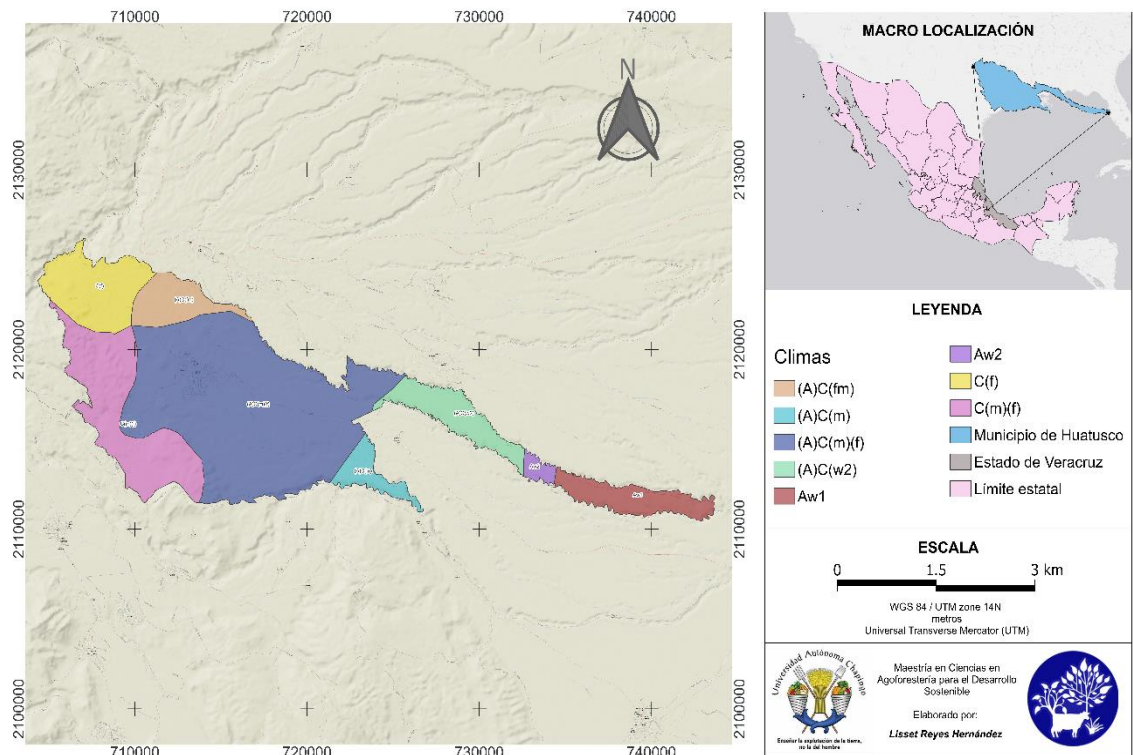


Figura 10. Unidades climáticas presente en Huatusco, Veracruz.

Temperatura y precipitación

A partir de los registros de la estación meteorológica 30342, ubicada en el municipio de Huatusco, para el período 1991-2020, se obtuvo una temperatura media anual de 17.1°C, con valores estables durante el año. Las temperaturas máximas y mínimas oscilan entre los 23 y 11.3°C, respectivamente. Los valores más bajos se registran entre diciembre y febrero, mientras que las más altas ocurren entre mayo y agosto. Este régimen térmico se considera óptimo para el cultivo de *C. arabica* (Díaz Padilla et al., 2021; Escamilla Prado, 2007).

En cuanto a la precipitación, el promedio anual es de 2,006 mm, valor que se encuentra dentro del rango óptimo 1,000 a 3,000 mm reportado para el buen desarrollo del café (Díaz Padilla et al., 2021). Sin embargo, la distribución temporal de las lluvias resulta igualmente determinante, al estar estrechamente vinculada con la fenología del cultivo (Parada Molina et al., 2020).

El régimen pluvial se concentra entre mayo y octubre, con valores máximos entre junio y septiembre, superando los 300 mm mensuales, lo cual favorece la floración, el desarrollo del fruto y el crecimiento vegetativo. Sin embargo, de acuerdo con el criterio de Walter & Lieth (1967) no se registraron meses con déficit hídrico, ya que la precipitación mensual supera consistentemente la temperatura media, condición que puede limitar la inducción de la floración, dado que el cultivo requiere de un periodo de estrés hídrico de al menos tres meses consecutivos para romper latencia e iniciar su ciclo productivo (Parada Molina et al., 2020). A pesar de ello, entre noviembre a abril se presenta una reducción significativa de la precipitación, especialmente en febrero y marzo, lo que genera condiciones más secas, que resultan suficiente para inducir parcialmente este proceso.

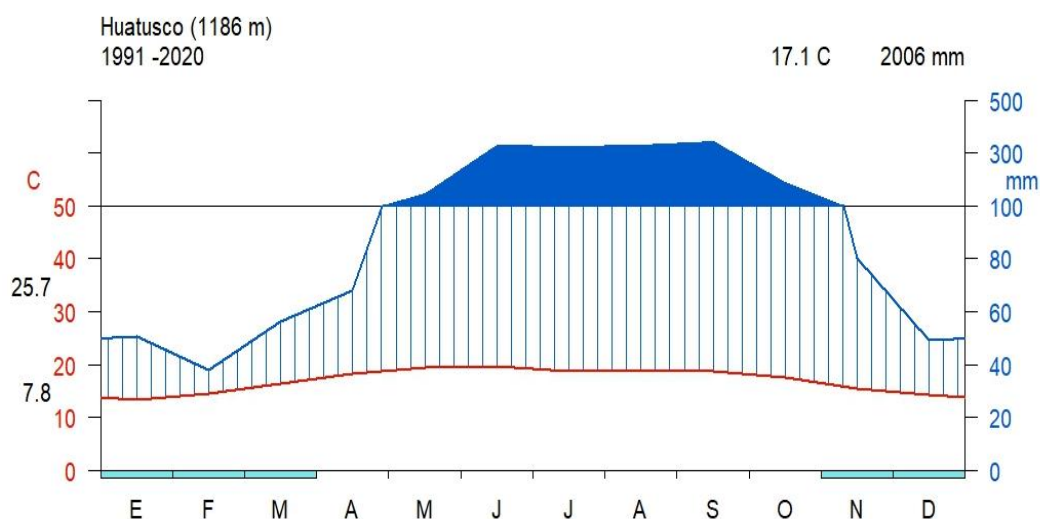


Figura 11. Diagrama climático de Walter & Lieth de la Normal climatológica, clave 30342, estación Centro Regional Huatusco, para el periodo 1991-2020. Fuente: Elaboración propia con información del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, 2020).

Por otra parte, tanto la temperatura como la precipitación ejercen una influencia determinante sobre el almacenamiento de C, al regular la fotosíntesis y, con ello, la producción de biomasa de las especies que conforma el sistema. Simultáneamente, ambas variables condicionan la actividad microbiana del suelo y la tasa de la materia orgánica, modificando el contenido de COS (Ruíz-García et al., 2022).

Mapa de uso de suelo y vegetación

Se identificaron 24 tipos de uso del suelo y vegetación en el área de estudio. Los sistemas de cultivo de café constituyen la cobertura dominante, al abarcar el 40.05 % del territorio (8,127.60 ha). Por su parte, la agricultura; incluyendo sistemas de temporal, anuales, permanentes y semipermanentes, ocupa el 19.94 % (4,035.66 ha). En conjunto, la superficie destinada a la actividad agrícola representa casi el 60 % de la superficie municipal, valor superior al reportado por (INEGI, 2010).

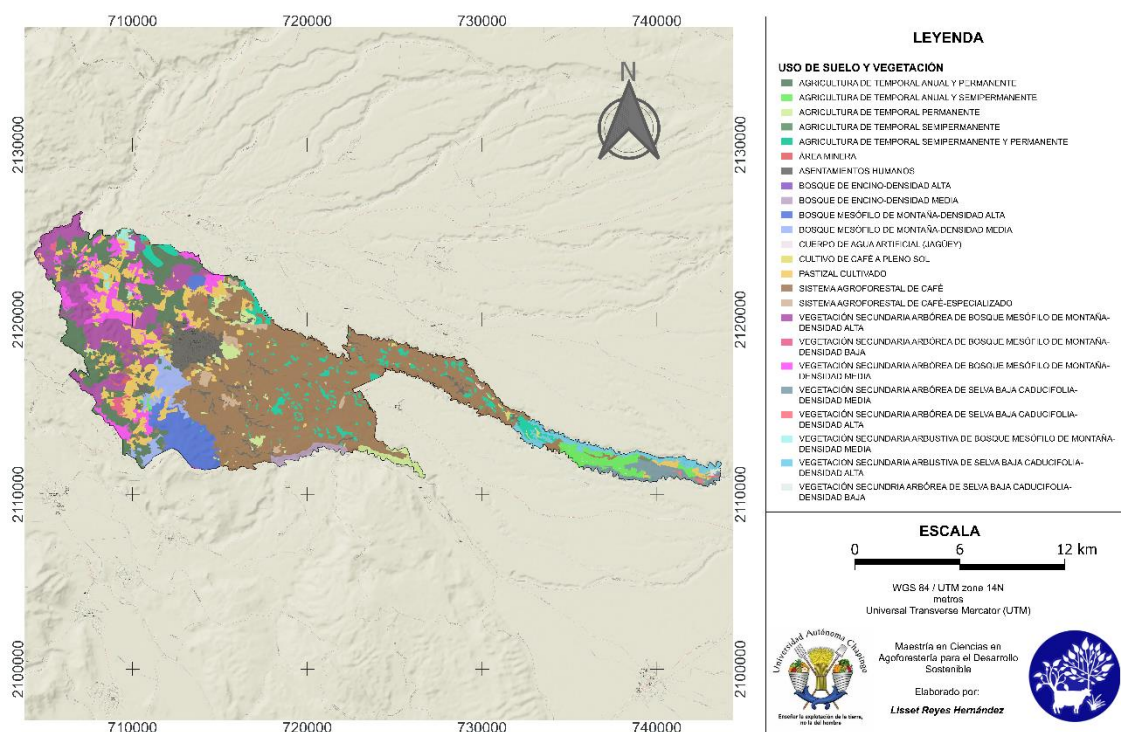


Figura 12. Uso del suelo y vegetación delimitados en Huatusco, Veracruz.

Dentro de los sistemas cafetaleros, la categoría de SAFC es claramente dominante, con 7,847.38 ha (38.67 % del territorio), mientras que el sistema ESP y el APS ocupa superficies considerablemente menores: 238.08 ha (1.17 %) y 42.14 ha (0.21 %), respectivamente. En cuanto a la cobertura vegetal, la categoría más representativa es la vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña de alta densidad, con 1,850.73 ha, equivalente al 9.12 % del municipio. Esto confirma la relevancia de los sistemas cafetaleros como el principal uso productivo del territorio.

Esto sugiere que el clima semicálido húmedo, combinado con pendientes moderadas a escarpadas (2-40 %) y altitudes en torno a los 1,000 msnm, constituyen el ambiente más propicio para el establecimiento de estos sistemas en la región. Este patrón coincide con lo documentado por (De la Cruz Osorio, 2015), en el Centro Académico Regional de la Universidad Autónoma Chapingo, localizado dentro del mismo municipio, y con los hallazgos de Ruiz García (2022), en Chocamán, Veracruz, municipio aledaño a Huatusco. En conjunto, estos resultados indican que los SAF no se distribuyen de manera aleatoria, sino que corresponden a una combinación específica de factores biofísicos que optimizan tanto la producción como la estabilidad del sistema.

En contraste, los sistemas ESP y APS presentan una distribución considerablemente más restringida, tanto en superficie como en diversidad de condiciones biofísicas. El ESP se localiza principalmente en lomeríos y valles bajo condiciones similares a los SAF, pero en menor proporción. Este sistema fue impulsado por el ya extinto Instituto Mexicano del Café (INMECAFE) a partir de la década de 1970 y, para los años noventa, llegó a representar el 54.3 % de las plantaciones cafetaleras en el centro de Veracruz (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016). No obstante, en décadas posteriores su presencia se redujo debido a los fluctuantes precios del café, los elevados costos de producción, asociados al uso de variedades mejoradas e insumos como fertilizantes y fungicidas, así como la creciente demanda de sistemas agrícolas más sostenibles, impulsaron la transición hacia sistemas de policultivo comercial y tradicional (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016; López Morgado, Zamarripa Colmenero, et al., 2021).

Los resultados obtenidos reflejan esta tendencia, ya que actualmente el sistema ESP ocupa únicamente 238 ha del territorio evaluado (1.17 %). Esto evidencia que, además de los factores biofísicos, los componentes sociales y económicos también influyen de manera importante en el establecimiento, permanencia y transformación de los sistemas cafetaleros.

Por su parte, el cultivo APS se distribuye en superficies principalmente de planicies y lomeríos de zona baja, lo que refuerza su baja representatividad territorial y su posible dependencia de condiciones específicas de manejo.

La predominancia de SAF en lomeríos y pendientes moderadas tiene efectos directos en procesos ecológicos clave, como la infiltración de agua, la retención de suelo y el almacenamiento de carbono. En particular, estas condiciones favorecen la acumulación de biomasa y materia orgánica, lo que posiciona a los SAF como sistemas estratégicos no solo para la producción, sino también para la provisión de servicios ecosistémicos.

3.5.2. Caracterización de la estructura y composición de las perennes multipropósito integradas en los SAF.

Estructura y composición

Los resultados mostraron diferencias importantes entre el sistema de POL y ESP. En conjunto, se registraron 161 individuos correspondientes a 36 especies de perennes multipropósito (EPM), 22 géneros y 16 familias botánicas. Del total de especies registradas, el 50 % fueron nativas y el 5.56 % endémicas. Además, el 52.78 % de las especies se encuentran incluidas en al menos uno de los siguientes listados: Lista roja de UICN, NOM-059-SEMARNAT-2010, o CITES. De acuerdo con los criterios de la UICN, 12 especies se clasifican en la categoría de Preocupación Menor (LC), tres en Casi Amenazado (NT), tres en Peligro (EN) y una en Vulnerable (VU).

En términos de la composición taxonómica, la familia más representativa fue la *Fabaceae* (Figura 14), con 43 individuos agrupados en tres especies, seguida de *Arecaceae*, *Lauraceae* y *Fagaceae*. Esta distribución de las familias y la dominancia de la familia *Fabaceae* coincide con lo reportado por García Mayoral et al. (2020) realizado en las regiones cafetaleras de la zona centro del estado de Veracruz, y Ruiz-García et al. (2020) en sistemas cafetaleros de la zona centro de Veracruz. Las formas de crecimiento registradas incluyeron árboles, arbustos, herbáceas y palmas, siendo los árboles los de mayor predominancia.

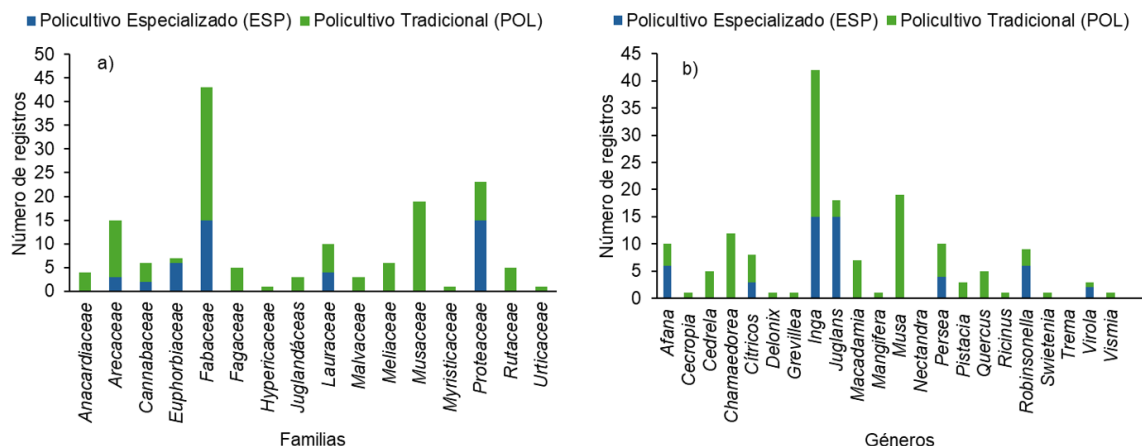


Figura 14. Distribución de familias y géneros en los SAF evaluados.

Nota: No fueron incluidos en las gráficas ocho registros que no pudieron ser identificados

En el sistema POL se registró una mayor diversidad de especies utilizadas para sombra y diversificación productiva, incluyendo frutales como *Musa × paradisiaca* y *Citrus x sinensis*, especies maderables como *Cedrela odorata* y *Swietenia macrophylla*, además de especies ornamentales y de uso múltiple como *Chamaedorea tepejilote* y *Delonix regia*. En contraste, el sistema ESP presentó menor riqueza y abundancia de perennes multipropósito, y fue dominado principalmente por *Inga vera*, *Grevillea robusta* y *Nectandra mollis*. Estas diferencias reflejan estrategias de manejo distintas, mientras que el POL busca diversificar ingresos y mantener mayor heterogeneidad estructural, el ESP prioriza especies con características específicas para proporcionar sombra funcional al cafeto.

Cuadro 5. Especies perennes más abundantes en las parcelas muestreadas.

Nombre común	Nombre científico	Familia	F.C.	E.C.	OR	ABN
Vainillo, jinicuil, Chalahuite	<i>Inga vera</i> Willd.	<i>Fabaceae</i>	Árbol	LC	NA	40
Plátano	<i>Musa × paradisiaca</i> L.	<i>Musaceae</i>	Herbácea	-	IN	19

Nombre común	Nombre científico	Familia	F.C.	E.C.	OR	ABN
Grevilea	<i>Grevillea robusta</i> A.Cunn. ex R.Br.	<i>Proteaceae</i>	Árbol	-	IN	16
Tepejilote	<i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm.	<i>Arecaceae</i>	Palma	LC	NA	13
Macadamia	<i>Macadamia integrifolia</i> Maiden & Betcher	<i>Proteaceae</i>	Árbol	-	IN	7
Higuerilla	<i>Ricinus communis</i> L.	<i>Euphorbiaceae</i>	Arbusto	-	IN	7
Cedro	<i>Cedrela odorata</i> L.	<i>Meliaceae</i>	Árbol	VU, Pr y Ap. II	NA	5
Chinine	<i>Persea schiedeana</i> Nees	<i>Lauraceae</i>	Árbol	EN	NA	5
Peinecillo	<i>Aphananthe monoica</i> (Hemsl.) J.-F.Leroy	<i>Cannabaceae</i>	Árbol	LC	NA	4
Naranja	<i>Citrus × sinensis</i> (L.) Osbeck	<i>Rutaceae</i>	Árbol	-	IN	4

F.C. = Forma de crecimiento. E.C. = Estado de conservación, de acuerdo con UICN, LC = Preocupación menor, VU = Vulnerable, EN = En peligro, de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010 Pr = Sujeta a protección especial y de acuerdo con CITES Ap. II = Apéndice II. OR = Origen, IN = Introducida, NA = Nativa. ABN = Abundancia (número de individuos registrados de cada especie).

La estratificación vertical también mostró diferencias importantes entre sistemas. En el POL se identificaron tres estratos bien definidos: herbáceo, arbustivo y arbóreo, además de tres niveles de altura dentro del componente arbóreo (bajo, medio y alto), asociados a la mayor diversidad de especies presentes. El estrato arbóreo alcanzó una altura promedio de 10.12 ± 6.13 m.

En contraste el ESP, presentó una estructura vertical más simplificada, sin diferenciación de niveles arbóreos y con una menor altura promedio del estrato arbóreo (7.47 ± 3.19 m). Asimismo, el POL registró mayores densidades de cafetos y perennes multipropósito, así como un porcentaje promedio de sombra superior (70.41 ± 16.69 %) respecto al ESP (57.24 ± 20.39 %).

Las diferencias estructurales observadas tienen implicaciones directas tanto para la productividad del sistema como para la provisión de servicios ecosistémicos y el almacenamiento de C. Diversos estudios señalan que la cobertura arbórea y el porcentaje de sombra influyen en la regulación microclimática, conservación de biodiversidad, reducción de impactos de eventos sinistros como vientos, heladas o sequías, y acumulación de COS (Encalada-Córdova et al., 2025; Escamilla Prado, 2007; Parada Molina et al., 2021). En este estudio, el sistema POL presentó mayores porcentajes tanto de sombra como de cobertura de hojarasca y menor proporción de suelo desnudo, condiciones que favorecen la acumulación de materia orgánica y la estabilización del C en el suelo. Además, la presencia de especies leguminosas fijadoras de nitrógeno, como *I. vera*, puede contribuir al incremento del COS superficial.

Cuadro 6. Características de la composición estructural de los SAF

UM	Altura promedio de los estratos				Perennes multipropósito	
	Herbáceo (cm)	Arbustivo (m)	Arbóreo (m)	Di cafetos ($\text{ind} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Di ($\text{ind} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Porcentaje de sombra (%)
POL1	8.75 ± 2.99	2.45 ± 0.90	5.35 ± 3.07	4063	256	74.28 ± 5.03
POL2	6.60 ± 1.14	1.92 ± 1.04	9.77 ± 4.22	4844	544	88.19 ± 2.62
POL3	7.60 ± 1.95	2.03 ± 0.53	8.21 ± 2.77	3594	176	55.58 ± 19.32
POL4	8.60 ± 2.07	2.83 ± 1.13	20.67 ± 12.49	4844	224	83.43 ± 4.95
POL5	5.20 ± 2.28	2.15 ± 0.86	6.59 ± 2.13	3125	560	50.57 ± 20.05
Media	7.35 ± 1.48	2.28 ± 0.37	10.12 ± 6.13	4094 ± 761	352 ± 185	70.41 ± 16.69
ESP1	40.00 ± 15.81	3.30 ± 0.66	9.86 ± 2.97	1094	272	68.55 ± 8.20
ESP2	30.75 ± 9.95	3.31 ± 0.85	7.40 ± 3.14	1719	368	59.99 ± 13.58
ESP3	18.40 ± 11.19	1.95 ± 0.55	2.98 ± 0.46	4219	64	27.70 ± 40.59
ESP4	-	1.69 ± 0.55	9.62 ± 3.15	5000	112	72.72 ± 16.20
Media	29.72 ± 10.84	2.56 ± 0.86	7.47 ± 3.19	3008 ± 1894	204 ± 141	57.24 ± 20.39

UM = Unidad de Muestreo, Di=Densidad, $\text{ind} \cdot \text{ha}^{-1}$ = cantidad de individuos por hectárea

Cuadro 7. Cobertura del suelo de acuerdo a cada sistema agroforestal.

UM	Porcentaje de cobertura del suelo		
	Herbáceas (%)	Hojarasca (%)	Suelo desnudo (%)
POL1	30.75 ± 29.03	68.55 ± 28.69	1.25 ± 0.50
POL2	5.20 ± 1.92	92.20 ± 1.48	2.60 ± 1.52
POL3	25.60 ± 25.93	72.40 ± 25.50	2.00 ± 0.71
POL4	13.60 ± 14.26	82.60 ± 13.46	3.80 ± 3.56
POL5	12.20 ± 10.50	83.20 ± 12.42	4.60 ± 4.16
Media	60.336 ± 18.97	79.78 ± 9.43	2.85 ± 1.35
ESP1	76.20 ± 29.15	15.40 ± 16.79	8.40 ± 12.42
ESP2	92.25 ± 3.20	4.00 ± 1.41	3.75 ± 2.75
ESP3	43.40 ± 26.02	20.20 ± 41.28	36.20 ± 25.03
ESP4	0.00 ± 0.00	52.75 ± 5.91	47.50 ± 6.14
Media	52.96 ± 40.74	23.09 ± 20.91	23.96 ± 21.25

UM = Unidad de Muestreo

Índices de diversidad y valor de importancia de las especies.

Los valores del IVI, revelaron diferencias claras en la composición y dominancia de especies entre sistemas. En el ESP, *I. vera* presentó el IVI más alto (28.87 %), seguida de *G. robusta* (26.51 %), reflejando un sistema simplificado dominado por pocas especies funcionales de sombra. Por el contrario, el POL mostró una distribución más equilibrada, donde *M. paradisiaca* alcanzó el mayor IVI más alto (19.17 %), seguida de *I. vera* (15.02 %), lo que evidencia una mayor heterogeneidad florística y funcional.

Estos resultados son parecidos a lo reportado por Ruiz-García et al. (2020) en sistema POL en donde las especies que destacaron fueron el plátano y vainillo o chalahuite.

Cuadro 8. Índice de valor de importancia relativa de las EPM registradas en los sistemas ESP y POL.

Nombre Común	Nombre científico	FRI	DRI	ARi	IVI
Policultivo especializado					
Vainillo, jinicuil, Chalahuite	<i>Inga vera</i> Willd.	20.00	37.21	29.41	28.87
Grevilea	<i>Grevillea robusta</i> A.Cunn. ex R.Br.	13.33	36.78	29.41	26.51
Laurel	<i>Nectandra mollis</i> (Kunth) Nees	13.33	11.91	7.84	11.03
Higuerilla	<i>Ricinus communis</i> L.	6.67	0.49	11.76	6.31
Ixpepe	<i>Trema micranthum</i> (L.) Blume	6.67	5.36	3.92	5.32
6 ESPECIES RESTANTES		40.00	8.25	17.65	21.97
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Policultivo tradicional					
Plátano	<i>Musa × paradisiaca</i> L.	5.56	34.68	17.27	19.17
Vainillo, jinicuil, Chalahuite	<i>Inga vera</i> Willd.	11.11	11.21	22.73	15.02
Tepejilote	<i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm.	5.56	0.49	11.82	5.95
Cedro	<i>Cedrela odorata</i> L.	5.56	6.01	4.55	5.37
Chinine	<i>Persea schiedeana</i> Nees	5.56	5.32	4.55	5.14
23 ESPECIES RESTANTES		66.67	42.27	39.09	49.34
Total		100.00	100.00	100.00	100.00

FRI=Frecuencia relativa, DRI=Dominancia relativa, ARi=Densidad relativa, IVI=Índice de Valor de Importancia.

Las diferencias encontradas de la composición entre sistemas, responden tanto a factores agroecológicos como a decisiones de manejo relacionadas con el conocimiento y necesidades de los productores (García Mayoral et al., 2020). De acuerdo con (Yépez et al., 2003) algunos de los atributos deseables para la selección de especies de sombra por parte de los productores son: copa abierta, rala, en forma de paraguas o sombrilla y alta o de altura media, alta producción de follaje, incorporación de materia orgánica al suelo, sistema radicular fuerte profundo y no competitivo, no susceptible a plagas ni enfermedades, tolerancia al estrés ambiental, adaptación a la zona de producción, ofrecimiento de otros servicios y/o productos, tallos no quebradizos y ausencia de efectos alelopáticos. En el sistema ESP *I. vera*, cuenta con una copa amplia aplanada, muy extendida con follaje ralo y abierta que produce una sombra ligera (CONABIO, 2026). Dentro de usos, además de aportar sombra y materia orgánica al suelo, es una especie fijadora de nitrógeno y tiene usos potenciales como medicinal, comestible (fruto), melífera, ambiental y cuenta con una capacidad de capturar carbono de 17.78 kg por árbol (Ulian et al., 2023). Por su parte, las especies del sistema POL responden mayormente a la diversificación de los ingresos sin comprometer la sombra idónea para el café.

Los índices de diversidad confirmaron una mayor complejidad florística en el sistema POL. Este sistema presentó mayor abundancia, riqueza y valores superiores en los índices de Shannon-Wiener, Simpson y alfa de Fisher, respecto al ESP.

Cuadro 9. Riqueza y diversidad de especies perennes de sombra por SAF.

Indicador	Sistema ESP	Sistema POL
Abundancia	51	110
Riqueza	11	28
Índice de Shannon-Wiener (H')	1.9	2.67
Equidad (E)	0.79	0.8
Índice de Simpson (D)	0.8	0.89
Alfa de Fisher (α)	4.31	12.12

Fuente: Elaboración propia

La prueba de t de Hutcheson con valor de 4.905 confirmó diferencias significativas en diversidad entre sistemas ($p < 0.0001$). Asimismo, los bajos valores de similitud florística (Sorensen = 0.20; Jaccard = 0.11) indican que ambos sistemas presentan composiciones vegetales marcadamente distintas. En conjunto, los resultados muestran que el sistema POL posee una mayor complejidad estructural funcional, lo que puede favorecer una mayor capacidad de almacenamiento de carbono y resiliencia ecológica.

3.5.3. Caracterización socioeconómica de los SAF y APS

La información obtenida mediante las encuestas aplicadas a productores de café evidenció un perfil socioecológico característico de sistemas de producción cafetaleros tradicionales, los componentes sociales, productivos y ambientales se encuentran estrechamente relacionados.

Los productores entrevistados corresponden principalmente a unidades de pequeña escala, con superficies de entre 1 y 5 ha, además, alrededor del 86 % de las parcelas evaluadas son de propiedad privada, y solo 14 % de régimen ejidal. Este patrón coincide con lo reportado para la cafecultura tradicional del centro de Veracruz, caracterizada por unidades de producción familiares y de pequeña escala (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016; López Morgado, Salazar García, et al., 2021).

Eje natural

Los sistemas POL y ESP se localizan dentro o cerca de bosque o selva, lo cual coincide con lo observado durante la caracterización biofísica de las unidades del paisaje. Esta proximidad favorece la presencia de fauna silvestre, reportándose especies como tlacuache (*Didelphis spp.*), mapache (*Procyon spp.*), armadillo (*Dasypus novemcinctus*), tejón (*Bassariscus spp.*), ardilla (*Ammospermophilus spp.*), conejo (*Sylvilagus florindanus*), tucanes (*Pteroglossus spp.* y *Aulacorhynchus spp.*) y gavilanes (*Accipiter spp.*), entre otras aves asociadas a ambientes agroforestales.

Asimismo, cerca del 36 % de parcelas evaluadas cuenta con algún sistema de almacenamiento de agua, ya sea natural o artificial como nacimientos, pozas, ollas de agua o tanques. Estos sistemas se registraron únicamente en parcelas POL y ESP, mientras que en APS no se identificó ningún mecanismo de almacenamiento hídrico.

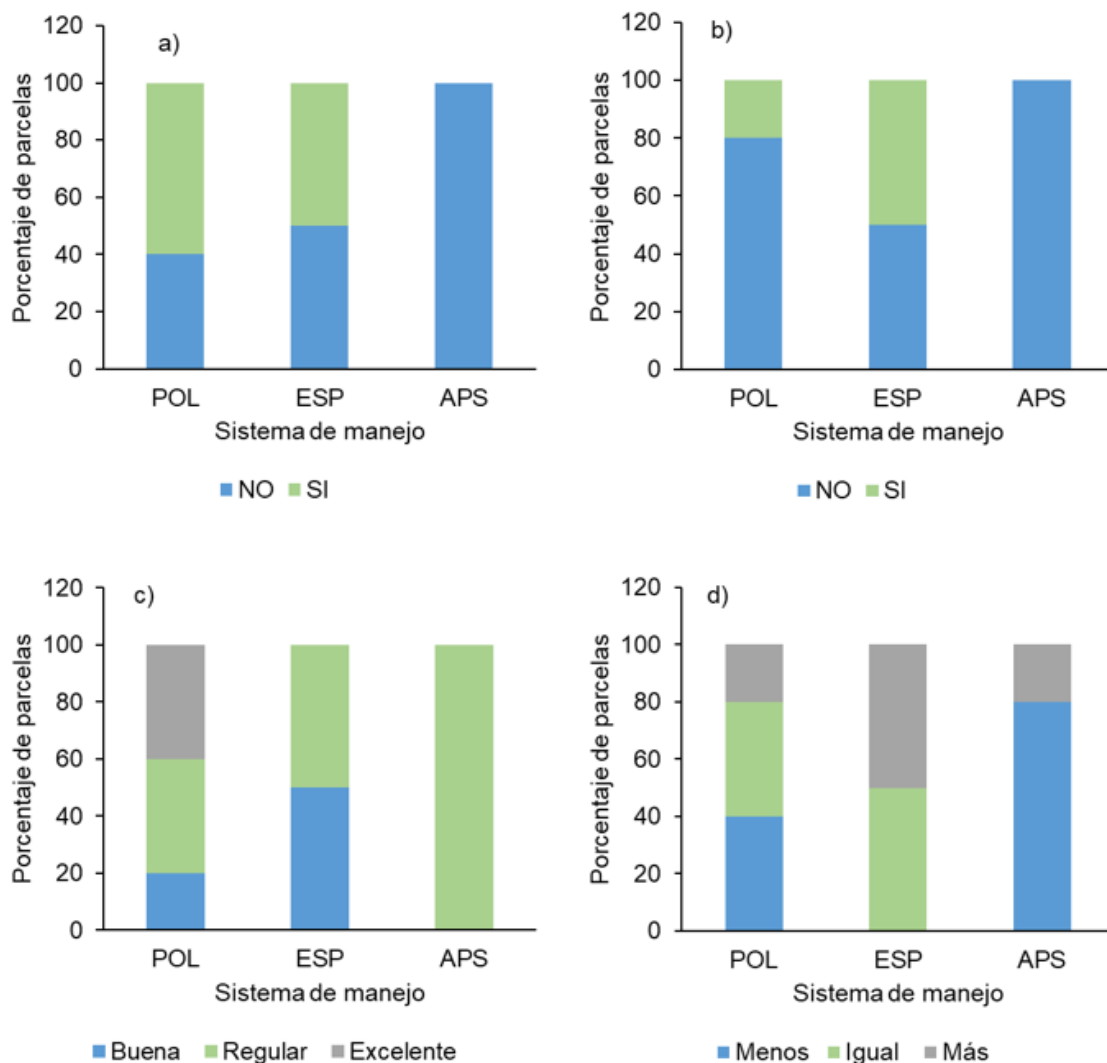


Figura 15. Variables evaluadas del eje natural por sistema de manejo a). Porcentaje de parcelas que cuentan con un sistema de almacenamiento de agua, b) Porcentaje de parcelas que hay presencia de bosque o selva natural dentro o cerca, c) Percepción de la productividad actual del suelo y d) Evolución de la productividad del suelo (Hace 10 años vs Actualidad).

En cuanto a la percepción de la productividad del suelo, los productores de los sistemas POL y ESP la calificaron principalmente como buena o regular, mientras que en el APS predominó la percepción de productividad regular y con tendencia a disminuir respecto a los últimos 10 años. Esta diferencia puede relacionarse con el manejo de la cobertura vegetal y el aporte continuo de materia orgánica en los SAF, factores que contribuyen al mantenimiento de la fertilidad y estabilidad del suelo (Ruiz-García et al., 2020).

Eje productivo

El sistema POL fue el único donde los ingresos derivados de la venta de café se complementan con productos adicionales provenientes de las especies asociadas al sistema, particularmente frutales y maderables. Esto evidencia una mayor diversificación productiva y económica respecto a los sistemas ESP y APS.

Entre las principales prácticas de manejo identificadas destacan el chapoleo, renovación de cafetos, podas de selección y mantenimiento, control de plagas y enfermedades, así como la aplicación de fertilizantes y abonos orgánicos. Las principales plagas y enfermedades fueron roya, broca, nematodos y tusas. En el sistema APS predominó el uso de fertilizantes comerciales de síntesis química, mientras que en el POL y ESP fue específicamente la fórmula 18-12-6. Por su parte, los abonos orgánicos fueron empleados principalmente en parcelas POL y parcialmente en ESP, dentro de los abonos mencionados fueron pulpa de café bagazo, composta y caldo sulfocálcico.

Las diferencias en el manejo también fueron evidentes en las labores de limpieza. En el POL predominó el uso de herramientas manuales como machete y azadón, mientras que en ESP y APS se empleó con mayor frecuencia podadora mecánica. Este tipo de manejo menos intensivo en el POL podría favorecer una mayor permanencia de cobertura herbácea y acumulación de residuos orgánicos, condiciones asociadas a mayor contenido de COS (Aravena et al., 2025; De la Cruz Osorio, 2015).

Cuadro 10. Prácticas de manejo identificadas en los sistemas de cultivo de café.

UM	Cha	Aplicación de insumos			Aplicación de podas		Ren Ca	CPE
		Fer	Abo	Rec	Man/ Sel	Ren PMP		
POL1	X	X	X	X		X	X	
POL2	X	X			X		X	X
POL3	X		X		X	X	X	X
POL4	X		X	X		X	X	X
POL5	X		X		X	X	X	X
ESP1	X	X	X	X	X	X	X	X
ESP2	X	X	X	X	X	X	X	X
ESP3	X	X		X	X	X	X	X
ESP4	X	X		X	X	X	X	X
APS1	X	X		X	X		X	X
APS2	X	X		X	X		X	X
APS3	X	X		X	X		X	X
APS4	X	X		X	X		X	X
APS5	X	X		X	X		X	X

UM = Unidad de manejo, Cha = Chapoleo, Fer = Fertilizante, Abo = Abono, Rec = Recepa del café, Man/Sel = Poda de mantenimiento o poda de selección, Ren MPM = Renovación de perennes multipropósito, Ren Ca = Renovación de cafetos, CPE = Control de plagas y/o enfermedades.

La mayoría de los productores realiza la renovación de cafetos y especies de sombra utilizando plantas provenientes de viveros propios, lo que refleja cierto grado de autosuficiencia y conservación local de material vegetal. Además, durante el periodo 2021-2024 el precio promedio de venta del café fue de 11.75 ± 3.7 pesos kg^{-1} . El café producido bajo el sistema POL se comercializa principalmente en cereza, mientras que en ESP y APS se vende como pergamino, tostado y molido, además estos dos sistemas, registraron mayores niveles de productividad, aunque el POL presentó mayores beneficios asociados a diversidad y servicios ecosistémicos.

Las prácticas de manejo identificadas tienen implicaciones directas sobre el almacenamiento de carbono. Sistemas con mayor cobertura arbórea, manejo orgánico y menor intensidad de disturbio favorecen la acumulación de biomasa y materia orgánica del suelo, mientras que sistemas simplificados o con menor cobertura vegetal tienden a reducir estos reservorios.

Eje humano

El total de las unidades evaluadas pertenece a alguna organización de productores (Figura 16), lo que evidencia una fuerte dependencia de redes colectivas para comercialización, capacitación y acceso a apoyos. Los productores presentaron una edad promedio de 69 ± 15 años, reflejando un marcado envejecimiento del sector cafetalero y dificultades en el relevo generacional. En varios casos, los productores mencionaron escasa participación de los hijos en las actividades cafetaleras, asociada al desinterés en este sector, procesos migratorios y búsqueda de oportunidades laborales o académicas fuera de la región.

El 79 % de los entrevistados cuenta con acceso a servicios de salud y medicamentos, mientras que el 86 % ha recibido capacitación técnica relacionada con manejo del cultivo, nutrición, comercialización y control de plagas y enfermedades. Este acceso a capacitación se encuentra estrechamente relacionado a la participación en organizaciones y a la cercanía con instituciones académicas y de extensión, como el Centro Académico Regional Sede Huatusco de la Universidad Autónoma Chapingo. Diversos estudios destacan que la organización social y la asistencia técnica son factores clave para la adopción de prácticas de manejo más sostenibles (García-Vázquez et al., 2026).

Eje social

En el eje social, se observa una alta dependencia de redes de confianza y organización comunitaria. Las relaciones comerciales y de apoyo se establecieron principalmente a través de vínculos personales e instituciones de largo plazo, especialmente a través de organizaciones de productores de café.

Este tipo de redes fortalecen los mecanismos de comercialización, acceso a insumos y permanencia de los sistemas productivos (García-Vázquez et al., 2026).

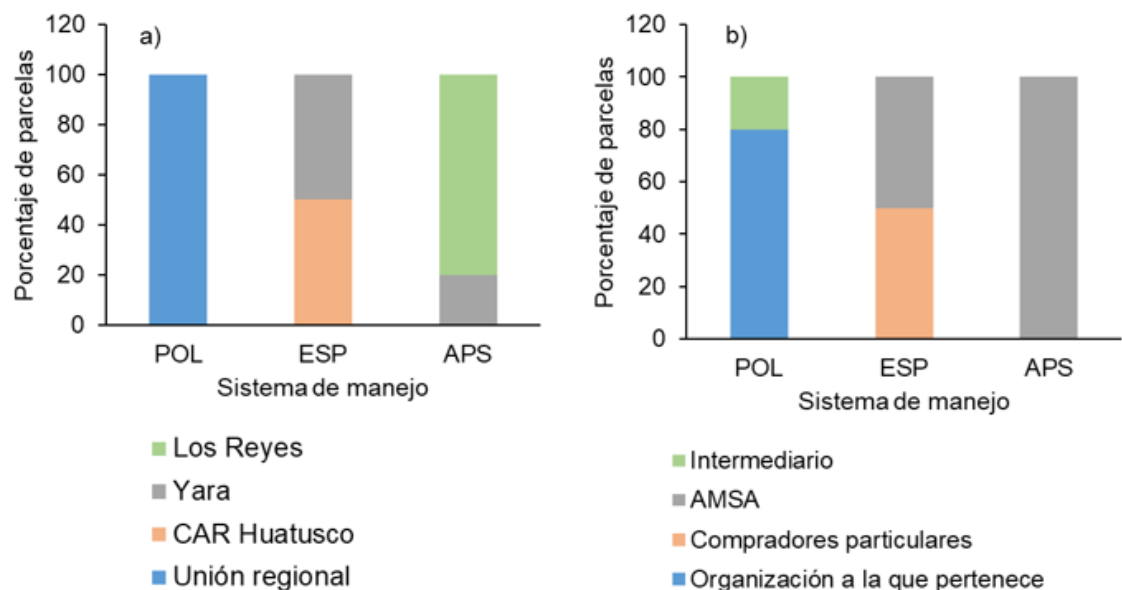


Figura 16. Redes de apoyo de los cafeticultores por sistema de manejo. a). Porcentaje de productores que pertenecen a una organización, b) Distribución porcentual de los destinos de comercialización del café. AMSA = Agroindustrias Unidas de México.

Un aspecto relevante es que la mayoría de los productores manifestó interés en continuar con la actividad cafetalera, a pesar de las limitaciones económicas, ambientales y productivas. Esto evidencia un fuerte arraigo cultural y económico al cultivo de café, el cual continúa siendo un componente central en las estrategias de subsistencia de las familias cafetaleras de Huatusco.

En conjunto, los resultados muestran que el manejo de los sistemas cafetaleros no depende únicamente de factores biofísicos, sino también de aspectos sociales, culturales y económicos que condicionan la permanencia, transformación y sostenibilidad de los sistemas cafetaleros.

3.6. Conclusiones

Los sistemas agroforestales de café en el municipio de Huatusco evidencian una clara asociación con lomeríos de zona baja, climas semicálidos húmedos, pendientes moderadas y altitudes intermedias, condiciones que favorecen tanto la producción de café como la acumulación de biomasa y carbono. Estos resultados evidencian que variables como la pendiente, altitud, clima y cobertura vegetal influyen directamente en el establecimiento y capacidad de almacenamiento de carbono de los sistemas cafetaleros.

La caracterización estructural y florística mostró que el sistema de policultivo tradicional presentó mayor complejidad estructural, diversidad vegetal y heterogeneidad florística respecto al sistema especializado. Estas características favorecen la acumulación de biomasa, la incorporación de materia orgánica al suelo y la provisión de servicios ecosistémicos, particularmente la regulación microclimática, conservación del suelo y almacenamiento de carbono. En este sentido, se evidenció que factores estructurales como la diversidad de especies, la estratificación vertical, la cobertura de sombra, la acumulación de hojarasca, así como prácticas de manejo menos intensivas, influyen directamente en las reservas de carbono, principalmente en la biomasa arbórea y carbono orgánico del suelo.

Desde el contexto socioeconómico, factores como la diversificación productiva, el acceso a capacitación técnica, la organización de productores y el conocimiento tradicional favorecen sistemas más diversificados y con mayor potencial de almacenamiento de carbono. En contraste, la intensificación del manejo, los altos costos de producción y el envejecimiento de los productores limitan la sostenibilidad y permanencia de los sistemas cafetaleros.

Finalmente, los sistemas agroforestales diversificados de café representan sistemas estratégicos para la sostenibilidad regional, ya que integran funciones productivas, ecológicas y sociales que favorecen la conservación ambiental, la provisión de servicios ecosistémicos y la mitigación del cambio climático mediante el almacenamiento de carbono.

3.7. Literatura citada

- Aravena, C., Valle, S. R., Vergara, R., González Chang, M., Martínez, O., Clunes, J., Caurapán, B., & Asenjo, J. (2025). Effect of Agricultural Management Intensity on the Organic Carbon Fractions and Biological Properties of a Volcanic-Ash-Derived Soil. *Sustainability*, 17(6), 2704. <https://doi.org/10.3390/su17062704>
- Arrazate Jiménez, S. D. C., Zamora Elizalde, M. C., Buendia Espinoza, J. C., García Núñez, R. M., & Sánchez Vélez, A. (2022). *Caracterización Socioeconómica y Biofísica de la Microcuenca Agua Escondida, Puebla* (VII). Universidad Autónoma Chapingo. <https://www.researchgate.net/publication/383457550>
- Ballesteros Possú, W., Navia Estrada, J. F., & Ferney Leonel, H. (2024). *Métodos para la identificación, caracterización y tipificación de sistemas agroforestales en el trópico* (Primera). Universidad de Nariño.
- Bautista Calderon, E. A., Ordaz Chaparro, V. M., Gutiérrez Castorena, Ma. del C., Gutiérrez Castorena, E. V., & Cajuste Bontemps, L. (2018). Sistemas agroforestales de café en Veracruz, México: identificación y cuantificación espacial usando SIG, percepción remota y conocimiento local. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 36(3). <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.350>
- Casanova-Lugo, F., Petit-Aldana, J., & Solorio-Sánchez, J. (2011). LOS SISTEMAS AGROFORESTALES COMO ALTERNATIVA A LA CAPTURA DE CARBONO EN EL TRÓPICO MEXICANO. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVII(1), 133–143. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.047>
- CONABIO. (2025). *Climas*. Comisión Nacional Para El Conocimiento y Uso de La Biodiversidad. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/clima/climas/clima1mgw
- CONABIO. (2026). *Jinicuil (Inga vera)*. Enciclovida. <https://enciclovida.mx/especies/198798-inga-vera>
- CONAFOR. (2025). *Manual Básico de Ordenamiento Territorial Comunitario (OTC)* (Segunda). Comisión Nacional Forestal. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/manual-basico-de-ordenamiento-territorial-comunitario-2024>
- CONAGUA. (2020). *Normales climatológicas 1991-2020: Estación 30342, Centro Regional*. Comisión Nacional del Agua. https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Normales9120/ver/nor9120_30342.txt
- Curtis, J. T., & McIntosh, R. P. (1951). An Upland Forest Continuum in the Prairie-Forest Border Region of Wisconsin. *Ecology*, 32(3), 476–496. <https://doi.org/10.2307/1931725>

- De la Cruz Osorio, J. C. (2015). *Almacenes de carbono asociados a diferentes unidades del paisaje en el Centro Regional Universitario Oriente* [Maestría]. Universidad Autónoma Chapingo.
- Díaz Padilla, G., Guajardo Panes, R. A., & López Morgado, R. (2021). Potencial productivo del cultivo de café en México. In R. López Morgado, G. Díaz Padilla, & A. Zamarripa Colmenero (Eds.), *El sistema producto café en México: problemática y tecnología de producción* (Primera, pp. 35–54). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Encalada-Córdova, M., Benavidez-Silva, C., Urgiles-Gómez, N., & Chamba-Caillagua, K. (2025). Sistemas agroforestales cafetaleros: aproximaciones para la caracterización de sombra y microclima en Loja, Ecuador. *Agronomía Mesoamericana*, 4ssgm196. <https://doi.org/10.15517/4ssgm196>
- Escamilla Prado, E. (2007). *Influencia de los factores ambientales, genéticos, agronómicos y sociales en la calidad del café orgánico en México*. [Doctorado]. Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz.
- Escamilla Prado, E., & Díaz Cárdenas, S. (2016). *Sistemas de cultivo de café en México* (S. Córdova Santamaría, Ed.; Segunda). Centro Nacional de Investigación Innovación y Desarrollo Tecnológico del Café.
- Escamilla-Prado, E., Ayala-Montejo, D., & Quispe-Huisñay, G. C. (2026). *Los Sistemas Agroforestales para el Bienestar Social Comunitario en México. Volumen II: Tradición y experiencias agroforestales desde los territorios: II* (Primera). Comisión Nacional Forestal, Universidad Autónoma Chapingo, El Colegio de la Frontera Sur.
- FAO. (2026). *Agroforestería*. Organización de Las Naciones Unidas. <https://www.fao.org/agroforestry/es>
- Farfán Valencia, F. (2014). *Agroforestería y sistemas agroforestales con café* (S. M. Marín L., Ed.). FNC-Cenicafé. https://www.cenicafe.org/es/publications/Agroforester%C3%ADa_y_sistemas_agroforestales_con_caf%C3%A9.pdf
- García Mayoral, L. E., Bárcenas Pazos, G. M., & López Morgado, R. (2020). Valoración participativa de atributos de especies arbóreas nativas en el sombreado de cafetales. In R. López Morgado & G. Díaz Padilla (Eds.), *Diagnóstico, productividad y ambiente en cafetales: estudios regionales y de caso* (Primera, pp. 149–170). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- García-García, S. A., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre Calderón, O. A., Treviño Garza, E. J., Cuellar-Rodríguez, L. G., & Collantes-Chávez-Costa, A. (2024). Efecto del gradiente altitudinal y variables climáticas en el almacenamiento de carbono en un bosque templado de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 30(3), e3032574. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3032574>

- García-Vázquez, A., Hipólito-Romero, E., Romero-León, K., & Ramos-Prado, J. M. (2026). Caracterización de los medios de vida sostenibles: Caso de estudio en hogares campesinos de San Rafael, Veracruz. *UVserva*, (21), 289–308.
- Gerardo Valdez, C., Guzmán, M. A., Valdés G., A., Forougbakch P., R., Alvarado V., M. A., & Rocha E., A. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación en un matorral espinoso prístino de Tamaulipas, México. *Biología Tropical*, 66(4), 1674–1682.
- Herrera, O. B., Parra, M., Guerrero, C., & Soto-Pinto, L. (2024). Lifeways of families in coffee-growing territories: vulnerability and response capacity. *Community Development Journal*. <https://doi.org/10.1093/cdj/bsae027>
- INEGI. (2025, May). *Huatusco, Veracruz de Ignacio de la Llave (30071)*. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=070000300071#tabMCcollapse-Indicadores>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Huatusco, Veracruz de Ignacio de la Llave*. www.inafed.gob.mx/wb2/ELOCAL/ELOC_Enciclopedia
- Kiernan, D. (2024). *Natural resources biometrics*. <https://LibreTexts.org>
- López Morgado, R., Salazar García, J. G., Martínez Rodríguez, J. L., Díaz Padilla, G., & García Mayoral, L. E. (2021). Producción de café bajo sistemas agroforestales (SAF-café): caso de la zona centro del estado de Veracruz. . In R. López Morgado, G. Díaz Padilla, & A. Zamarripa Colmenero (Eds.), *El sistema producto café en México: problemática y tecnología de producción*. (Primera, pp. 313–346). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- López Morgado, R., Zamarripa Colmenero, A., & Castillo Guerrero, M. C. (2021). Establecimiento de cafetales . In R. López Morgado, G. Díaz Padilla, & A. Zamarripa Colmenero (Eds.), *El sistema producto café en México: problemática y tecnología de producción*. (Primera, pp. 129–162). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Marquina Pérez, A., Badia Perpinyà, A., Romagosa Casals, F., & Mejía Barazarte, J. F. (2024). Una metodología para la identificación y caracterización del paisaje en la cuenca alta del río Santo Domingo - Venezuela. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 33(2), 369–392. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n2.104052>
- Marroquin-Morales, P., Barrios-Calderón*, R. de J., Pimienta-de la-Torre, D. de J., Sánchez-Toruño, H., Montero-Flores, W., Guzmán-Santiago, J. C., & López-López, B. (2024). La perspectiva de los sistemas agroforestales como una alternativa a la degradación ambiental en México. *E-CUCBA*, 23(11), 01–10. <https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi23.365>

- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J. C., Salcedo, E., Juárez, M. de J., & Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica y Tecnología*, 4(1), 66–93.
- Parada Molina, P. C., Cerdán Cabrera, C. R., & Ortiz Ceballos, G. C. (2021). Condiciones microclimáticas en dos sistemas de producción de café. *UVserva*, (12), 24–29. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi12.2808>
- Parada Molina, P. C., Gómez Martínez, M. J., Ortiz Ceballos, G. C., Cerdán Cabrera, C. R., & Cervantes Pérez, J. (2020). Fenómenos meteorológicos y su efecto sobre la producción de café en la Zona Central de Veracruz. *UVSERVA Revista Electrónica de La Coordinación Universitaria de Observatorios de La Universidad Veracruzana*, (9), 47–58. <https://uvserva.uv.mx/index.php/Uvserva/issue/view/264/65>
- QGIS Development Team. (2024). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org/>
- Reyes Reyes, J., Rodríguez Morales, J. A., Pimienta de la Torre, D. de J., Fuentes Pérez, M. A., Marroquín Morales, P., Merino García, A., & Aguirre Medina, J. F. (2022). Diversidad y estructura de los árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1191>
- Ruiz García, P. (2022). *Contribución al análisis de sinergias entre mitigación y adaptación al cambio climático en cafetales de Veracruz*. [Doctorado]. Universidad Autónoma Chapingo.
- Ruiz García, P., Gómez Díaz, J. D., Valdes Velarde, E., & Monterroso Rivas, A. I. (2020). Sistemas agroforestales de café como alternativa de producción sustentable para pequeños productores de México. *Ra Ximhai*, 137–158. <https://doi.org/10.35197/rx.16.04.2020.07.pr>
- Ruiz-García, P., Gómez-Díaz, J. D., Valdes-Velarde, E., Tinoco-Rueda, J. A., Flores-Ordoñez, M., & Monterroso-Rivas, A. I. (2020). Caracterización biofísica y de composición estructural en sistemas agroforestales de café orgánico de Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(27), 1–17.
- Ruiz-García, P., Monterroso-Rivas, A. I., Valdés-Velarde, E., Escamilla-Prado, E., & Gómez-Díaz, J. D. (2022). Reservas de carbono en sistemas agroforestales con café (*C. arabica* L.) ante el cambio climático: caso México. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3). <https://doi.org/10.15517/am.v33i3.48671>
- SADER. (2020). *Sistemas Agroforestales, alternativa multifuncional de vida*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/sistemas-agroforestales-alternativa-multifuncional-de-vida?idiom=es>

- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication* (First paperbound). The Board of Trustees of the University of Illinois.
- SIAP. (2025). *Avance de siembras y cosechas por estado y cultivo*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://nube.agricultura.gob.mx/avance_agricola/
- SIMPSON, E. H. (1949). Measurement of Diversity. *Nature*, 163(4148), 688–688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
- Ulian, T., Way, M., Gianella, M., Bell, E., Flores Ortiz, C. M., Cabrera Santos, D., Sampayo Maldonado, S., Rodríguez Arévalo Norma Isela, Rojas Rojas Angela Viviana, Vázquez Corzas, F. G., Cobos Silva, J., Miranda García, L., & Hunter Manson, R. (2023). *Incrementando la captura de carbono en cafetales bajo sombra: 1ra. Edición* (J. Cobos Silva, D. Cabrera Santos, & M. Gianella, Eds.). Royal Botanic Gardens, Kew, FESI-UNAM, Pronatura Veracruz A.C.
- Valencia-Trejo, G. M., Álvarez-Sánchez, M. E., Gómez-Díaz, J. D., & Cetina-Alcalá, V. M. (2020). Caracterización biofísica para el ordenamiento territorial comunitario con enfoque agroforestal en Xaltepuxtla, Puebla, México. *Agro Productividad*, 13(7). <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1772>
- Walter, H., & Lieth, H. H. F. (1967). *Klimadiagramm-Weltatlas*. G. Fischer Verlag.
- Yépez, C., Muschler, R., Benjamín, T., & Musálem, M. (2003). Selección de especies para sombra en cafetales diversificados de Chiapas, México. *Agroforestería En Las Américas*, 9(35–36), 55–61. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6799>

4. CUANTIFICACIÓN DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CAFETALEROS EN RELACIÓN CON LAS PRÁCTICAS DE MANEJO.⁵

4.1. Resumen

Los sistemas agroforestales cafetaleros (SAFC) representan una alternativa clave para la conservación de servicios ecosistémicos y la mitigación del cambio climático debido a su capacidad para almacenar carbono (C). En este contexto, el objetivo del presente estudio fue cuantificar las reservas de C en diferentes sistemas cafetaleros de Huatusco, Veracruz, y evaluar su relación con las prácticas de manejo implementadas. El estudio se realizó en la región cafetalera de Huatusco, Veracruz, en 15 unidades de manejo distribuidas en tres sistemas: policultivo tradicional (POL), sistema especializado (ESP) y sistema a pleno sol (APS). Se evaluaron cinco reservorios de carbono: especies perennes de sombra, cafetos, herbáceas, hojarasca y suelo. El C almacenado en biomasa aérea se estimó mediante ecuaciones alométricas y el C orgánico del suelo mediante el método Walkley y Black. Las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante Kruskal-Wallis y comparaciones múltiples de Dunn. El aporte de las prácticas de manejo con el almacenamiento de C, se evaluó mediante correlaciones de Spearman y Análisis de Componentes Principales (ACP). Los resultados mostraron diferencias significativas para los reservorios de perennes de sombra, hojarasca y suelo. El sistema POL registró las mayores reservas de C total ($135.20 \pm 35.55 \text{ MgC ha}^{-1}$), seguido de ESP ($97.32 \pm 30.73 \text{ MgC ha}^{-1}$) y APS ($58.27 \pm 24.69 \text{ MgC ha}^{-1}$). El reservorio suelo concentró la mayor proporción del C almacenado, seguido por las especies perennes de sombra. Asimismo, el carbono edáfico disminuyó conforme aumentó la profundidad del suelo. Las correlaciones y ACP mostraron que la densidad de especies perennes y la acumulación de residuos orgánicos, favorecieron el almacenamiento de C, mientras que prácticas asociadas a sistemas más intensivos, como la fertilización y las podas frecuentes, tendieron a relacionarse con menores contenidos de C.

Palabras clave: reservorios de carbono, manejo agronómico, biomasa aérea, carbono orgánico del suelo, servicios ecosistémicos.

⁵ Tesis de Maestría en Ciencias, Programa de Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Lisset Reyes Hernández

Directora de Tesis: Dra. Rosa María García Núñez

CARBON QUANTIFICATION IN COFFEE AGROFORESTRY SYSTEMS IN RELATION TO MANAGEMENT PRACTICES.⁶

4.2. Abstract

Coffee agroforestry systems (SAFC) represent a key alternative for the conservation of ecosystem services and climate change mitigation due to their capacity to store carbon (C). In this context, the objective of this study was to quantify carbon stocks in different production systems in Huatusco, Veracruz, and to evaluate their relationship with implemented management practices. The study was conducted in the coffee-growing region of Huatusco, Veracruz, using 15 management units distributed among three systems: traditional polyculture (POL), specialized system (ESP), and full-sun system (APS). Five carbon pools were evaluated: perennial shade tree species, coffee plants, herbaceous vegetation, litter, and soil. Carbon stored in aboveground biomass was estimated using allometric equations, whereas soil organic carbon was determined using the Walkley and Black method. Differences among treatments were evaluated using the Kruskal-Wallis test and Dunn's multiple comparisons. The contribution of management practices to carbon storage was assessed through Spearman correlations and Principal Component Analysis (PCA). The results showed significant differences in the shade-tree perennial, litter, and soil carbon pools. The POL system recorded the highest total carbon stocks ($135.20 \pm 35.55 \text{ MgC ha}^{-1}$), followed by ESP ($97.32 \pm 30.73 \text{ MgC ha}^{-1}$) and APS ($58.27 \pm 24.69 \text{ MgC ha}^{-1}$). Soil represented the largest proportion of stored carbon, followed by perennial shade tree species. Likewise, soil carbon decreased with increasing soil depth. Correlation analyses and PCA showed that perennial species density and the accumulation of organic residues favored carbon storage, whereas practices associated with more intensive systems, such as fertilization and frequent pruning, tended to be associated with lower carbon contents.

Key Words: carbon sinks, agronomic management, aboveground biomass, soil organic carbon, ecosystem services.

⁶ Master's Thesis in Science, Graduate Program in Agroforestry for Sustainable Development, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Lisset Reyes Hernández

Advisor: Dra. Rosa María García Núñez

4.3. Introducción

El dióxido de carbono (CO₂) es considerado uno de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) que contribuye al calentamiento global, debido a su capacidad para retener calor en la atmósfera y al incremento sostenido de sus concentraciones atmosféricas derivadas de actividades antropogénicas (Ruíz Nápoles et al., 2023). Durante las últimas décadas, el aumento acelerado de CO₂ ha provocado modificaciones importantes en las condiciones climáticas, reflejadas en un incremento estimado de 1.1°C de la temperatura media global respecto a niveles preindustriales (IPCC, 2021). Estas alteraciones han propiciado la ocurrencia de eventos climáticos extremos más frecuentes, que amenazan directamente el bienestar humano y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (UNCCD, 2015).

Ante este escenario, los sistemas agroforestales (SAF) han adquirido relevancia como estrategias claves orientadas a la mitigación del cambio climático, debido a su capacidad para capturar y almacenar carbono (C) en la biomasa vegetal y el suelo (Lorenz & Lal, 2014). Entre ellos, los sistemas agroforestales cafetaleros (SAFC) destacan por integrar una gran diversidad de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas que conforman estructuras multiestratos con alta capacidad de almacenar biomasa y materia orgánica (Farfán Valencia, 2014). Debido a ello, estos sistemas son considerados importantes reservorios de C y componentes estratégicos en iniciativas relacionadas a la mitigación del cambio climático (Ulian et al., 2023). En este contexto, la Organización de las Naciones Unidas reconoce la protección y conservación de los sumideros de C como una acción prioritaria para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 relacionados con el cambio climático (ONU, 2023).

El cambio climático y los SAFC están estrechamente relacionados de manera bidireccional (Panwar et al., 2022). Por un lado, las modificaciones en las condiciones climáticas afectan la productividad y estabilidad de estos sistemas y por otro, los árboles presentes en los sistemas contribuyen a la captura de CO₂ atmosférico mediante el proceso de fotosíntesis (Sharma et al., 2021).

No obstante, la magnitud del almacenamiento está sujeta a múltiples factores ambientales y de manejo. Entre los principales factores ambientales destacan la temperatura, precipitación, altitud y condiciones del suelo, mientras que entre factores de manejo sobresalen la densidad de plantación, composición y diversidad de especies de sombra, edad de las plantaciones, incorporación de la materia orgánica y prácticas de renovación del cultivo (Espinoza-Domínguez et al., 2012; Ruíz-García et al., 2022). Por ello, comprender la influencia del manejo sobre los reservorios de carbono permite identificar estrategias orientadas a maximizar la captura y almacenamiento de C en los SAF (Ruíz García, 2015).

La región de Huatusco, Veracruz, representa una de las principales zonas cafetaleras de México y se caracteriza por la presencia de sistemas de producción bajo sombra diversificada (Díaz Padilla et al., 2021). Los cuales poseen un alto potencial para el almacenamiento de C. Sin embargo, a pesar de su importancia ambiental y social, la cafecultura regional enfrenta diversas problemáticas asociadas a bajos beneficios económicos, incremento de plagas y enfermedades y variaciones climáticas que afectan procesos fisiológicos del cultivo, tales como floración, fructificación, retención foliar y rendimiento productivo (Ayala-Montejo et al., 2021). A ello se suma la implementación de prácticas de manejo poco adecuadas, que contribuyen al deterioro de los sistemas productivos y disminuyen su sostenibilidad.

Frente a esta problemática, surge la necesidad de promover alternativas de manejo que permitan mejorar simultáneamente la productividad y la sostenibilidad de los cafetales. Entre estas alternativas destacan la incorporación de especies perennes multipropósito (EPM) con importancia en la región y con alto potencial de captura de C, el manejo adecuado de la sombra, la renovación estratégica de cafetales y la implementación de prácticas orientadas a incrementar las reservas de C del sistema. Asimismo, el potencial de los SAFC para participar en esquemas de pago por servicios ambientales o mercados de C representa una oportunidad complementaria para diversificar las fuentes de ingreso de los productores y agregar valor ambiental a la producción cafetalera.

Con base en lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo cuantificar las reservas de C en la biomasa aérea y en el suelo en diferentes SAFC y analizar su relación con las prácticas de manejo implementadas.

4.4. Materiales y métodos

4.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó dentro de la región cafetalera de Huatusco, ubicada en la zona centro del estado de Veracruz, México, en las estribaciones del Pico de Orizaba. Esta región está integrada por los municipios de Zentla, Comapa, Huatusco, Sochiapa, Tlacotepec de Mejía, Tenampa, Totutla, Tlaltetela e Ixhuatlán del café (Hernández Pérez, 2022).

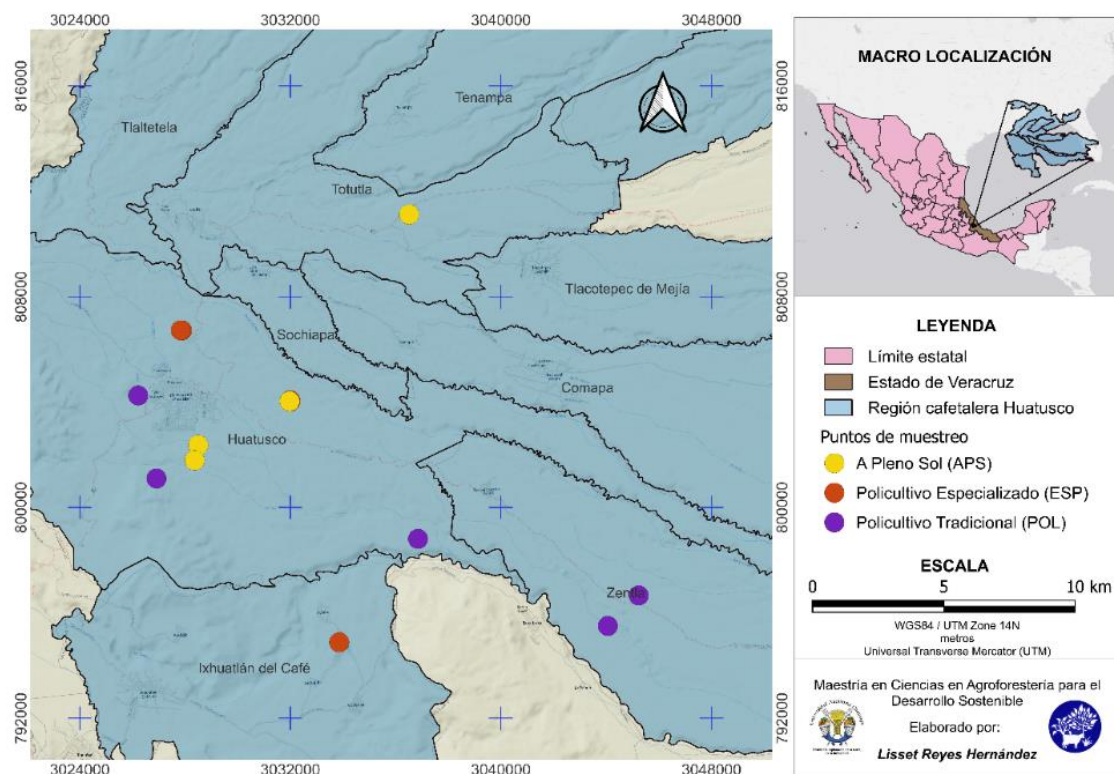


Figura 17. Ubicación del área de estudio y puntos de muestreo.

La región se caracteriza por presentar condiciones fisiográficas y climáticas favorables para la producción de café, con un gradiente altitudinal que influye en la composición y manejo de los SAFC (Díaz Padilla et al., 2021).

Los cafetales de esta región se establecen principalmente bajo un enfoque de sombra diversificada. Cuyos mayores representantes son el sistema especializado (ESP) y el policultivo tradicional (POL), abarcando aproximadamente el 50 % y 45 % de los predios, respectivamente (Escamilla Prado & Díaz Cárdenas, 2016). Con base en esta distribución, se seleccionaron dichos sistemas como unidades de análisis del estudio, además del sistema de café a pleno sol (APS).

4.4.2. Diseño de muestreo

Para la cuantificación del C almacenado en los SAFC se estableció un diseño de muestreo dirigido o por conveniencia, considerando la accesibilidad y disponibilidad de los productores para permitir el ingreso a sus parcelas. Se evaluaron tres tratamientos correspondientes a los diferentes sistemas de manejo: POL, ESP y APS. Para cada tratamiento se seleccionaron cinco parcelas, totalizando 15 unidades de manejo (UM). La cuantificación de los reservorios de C se realizó con base en la metodología propuesta por Tinoco Rueda (2024), la cual considera cinco reservorios principales en SAFC: especies perennes de sombra, cafetos, hojarasca, herbáceas y suelo.

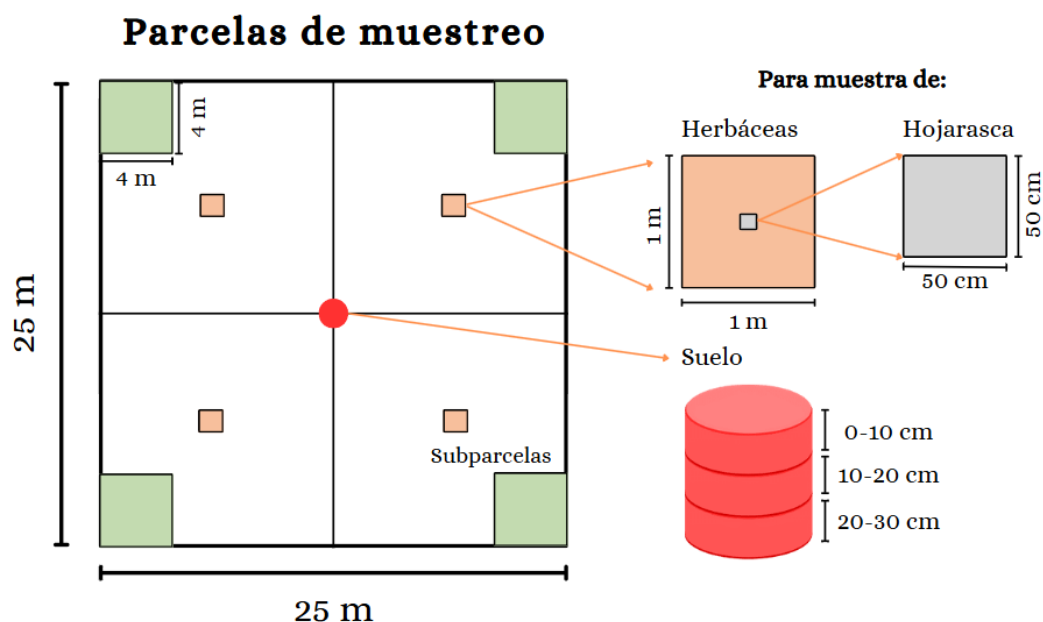


Figura 18. Diseño de las parcelas de muestreo.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con la metodología de (Tinoco Rueda, 2024).

Descripción de los Tratamientos

Sistema POL: caracterizado por integrar especies perennes multipropósito utilizadas para diversificar la sombra y la producción. Asimismo, exhibe una estructura vertical más compleja, mayor cobertura arbórea y una composición vegetal heterogénea, favorecida por un manejo menos intensivo y una mayor incorporación de materia orgánica. Entre sus principales prácticas de manejo destacan el mantenimiento de sombra diversificada, incorporación de residuos orgánicos, podas selectivas de baja intensidad y una menor dependencia de insumos externos.

Sistema ESP: se distingue por una menor diversidad de especies de sombra y una estructura simplificada, dominada principalmente por especies del género *Inga*. Presenta un manejo técnico más intensivo, con mayores densidades de cafetos y prácticas orientadas a maximizar la productividad, se destacan actividades como podas periódicas de mantenimiento, renovación de cafetales, control de arvenses y mayor aplicación de fertilizantes e insumos agrícolas.

Sistema APS: de manera contrastante, este sistema se caracteriza por la ausencia o mínima presencia de cobertura arbórea, con una mayor exposición del cultivo a las condiciones ambientales. El manejo está asociado a sistemas convencionales, como eliminación de sombra, control frecuente de vegetación herbácea y mayor dependencia de insumos agrícolas externos.

Cuadro 11. Prácticas de manejo implementadas en cada punto de muestreo SAF.

UM	Cha	Aplicación de insumos		Aplicación de podas			Ren Ca	CPE
		Fer	Abo	Rec	Man/ Sel	Ren PMP		
POL1	X	X	X	X		X	X	
POL2	X	X			X		X	X
POL3	X		X		X	X	X	X
POL4	X		X	X		X	X	X

UM	Cha	Aplicación de insumos		Aplicación de podas			Ren Ca	CPE
		Fer	Abo	Rec	Man/ Sel	Ren PMP		
POL5	X		X		X	X	X	X
ESP1	X	X	X	X	X	X	X	X
ESP2	X	X	X	X	X	X	X	X
ESP3	X	X		X	X	X	X	X
ESP4	X	X		X	X	X	X	X
ESP5	X	X		X	X	X	X	X
APS1	X	X		X	X		X	X
APS2	X	X		X	X		X	X
APS3	X	X		X	X		X	X
APS4	X	X		X	X		X	X
APS5	X	X		X	X		X	X

UM = Unidad de manejo, Cha = Chapoleo, Fer = Fertilizante, Abo = Abono, Rec = Recepa del café, Man/Sel = Poda de mantenimiento o poda de selección, Ren MPM = Renovación de perennes multipropósito, Ren Ca = Renovación de cafetos, CPE = Control de plagas y/o enfermedades.

4.4.3. Estimación de los reservorios de carbono

Reservorio del componente arbóreo: especies perennes de sombra

Para la obtención de datos de este reservorio se consideró la UM cuadrada de 25 x 25 m (Tinoco Rueda, 2024). Dentro de cada UM se registraron todos los individuos arbóreos presentes, identificando su nombre común y científico. Asimismo, se midió el diámetro normal (DN) a 1.30 m sobre el nivel del suelo, utilizando una cinta diamétrica y conforme a lo establecido por (Schlegel et al., 2001). Posteriormente, el contenido de biomasa seca de cada individuo se estimó mediante ecuaciones alométricas seleccionadas de acuerdo con las características y especies registradas en campo (Cuadro 12). El contenido de C se obtuvo multiplicando la biomasa seca estimada por el factor de conversión 0.5 recomendado por el IPCC.

Cuadro 12. Ecuaciones alométricas utilizados en la estimación de la biomasa seca de especies perennes de sombra y cafetos.

Especie	Modelo Alométrico	Referencias
<i>Coffea arabica</i>	$(\text{Exp}(-0.66) * (D15^{1.37}))$	Rojas-García et al. (2015)
<i>Chamaedorea spp.</i>	$[[\text{Exp}[3.6272]] * [[DN^{2*TH}]^{0.5768}]] * [1.02] / 1000000$	Hughes et al. (1999)
<i>Inga spp</i>	$(\text{Exp}(-1.76) * (DN^{2.26}))$	Rojas-García et al. (2015)
<i>Musa paradisiaca</i>	$0.03 * (DN^{2.13})$	Van Noordwijk et al. (2002)
<i>Grevillea robusta</i>	$-2.0082 + 2.3293 * (\ln(DN))$	Begazo Curie & Jave Nakayo (2018)
<i>Trema micranthum</i>	$\ln(Y) = -2.305 + 2.351 * \ln(DN)$	van Breugel et al. (2011)
<i>Quercus spp.</i>	$[\text{Exp}[-2.27] * [DN^{2.26}]]$	Rojas-García et al. (2015)
<i>Quercus xalapensis</i>	$[0.766406] * [DN^{1.93843}]$	Rojas-García et al. (2015)
<i>Citrus spp</i>	$-6.64 + 0.279(AB) + 0.000514(AB^2)$	Schroth et al. (2002)
<i>Persea americana</i>	$(0.0638 * ((DN)^{2.5435}))$	Kuyah et al. (2012)
<i>Persea schiedeana</i>	$(0.0638 * ((DN)^{2.5435}))$	Kuyah et al. (2012)
<i>Cedrela odorata</i>	$(0.00341 * ((DN)^{3.38248}))$	Benavides Solrio et al. (2021)
<i>Mangifera indica</i>	$\text{EXP}(-2.6554 + 2.2630 * \ln(DN))$	(Dao et al., 2021)

Especie	Modelo Alométrico	Referencias
Leñosas para sombra	$POTENCIA(10, -0.834 + (2.223 * (\log_{10}(DN))))$	Segura et al. (2006)

DN=Diámetro normal (cm), D15=Diámetro a 15 cm de altura (cm), AB=Área basal (cm²).

Reservorio del componente arbustivo: cafetos

Para la cuantificación del C almacenado en los cafetos, cada UM se dividió en cuatro cuadrantes de 12.5 x 12.5 m. En cada cuadrante, se establecieron subunidades de muestra de 4 x 4 m en cada esquina (Figura 18). Dentro de cada subunidad se midieron los diámetros de los tallos productivos de los cafetos utilizando un vernier, a una altura de entre 15 y 20 cm sobre el nivel del suelo, dependiendo de las condiciones de crecimiento de cada individuo, conforme a la metodología descrita por (Tinoco Rueda, 2024).

Posteriormente, la biomasa seca fue estimada mediante ecuaciones alométricas específicas para café. El contenido de C reservado se obtuvo multiplicando la biomasa seca estimada por el factor de conversión de 0.5.

Reservorio del componente herbáceo

En este componente se estableció una subunidad de muestreo de 1 m², prefabricada con PVC, en el centro de cada cuadrante de 12.5 x 12.5 m dentro de la UM. En cada subunidad se recolectó la biomasa aérea de las herbáceas presentes, la cual fue depositada en bolsas de papel previamente rotuladas. Las muestras recolectadas fueron secadas a temperatura ambiente hasta alcanzar peso seco constante.

Posteriormente, se determinó el peso seco de cada muestra descontando el peso de la bolsa. El contenido de C almacenado se estimó multiplicando la biomasa seca por el factor de conversión de 0.4155, reportado por Hernández Cruz (2013) para la región de estudio.

Reservorio de hojarasca

En este reservorio se consideró la misma subunidad de muestreo de 1 m², establecida previamente para el componente herbáceo. En el centro de esta subunidad se colocó un marco más pequeño de 0.5 x 0.5 m (0.25 m²) conforme a la metodología propuesta por (Valdés-Velarde et al., 2022). Dentro de esta área se recolectó toda la hojarasca presente y se depositó en bolsas de papel previamente rotuladas, de manera similar al reservorio del componente herbáceo. Por lo tanto, también fueron secadas a temperatura ambiente hasta alcanzar peso constante. Posteriormente, se determinó la biomasa seca de cada muestra desconectando el peso de la bolsa. La cantidad de carbono almacenado se estimó multiplicando la biomasa seca por el factor de conversión de 0.446, reportado por Hernández Cruz (2013) para este componente.

Reservorio del componente suelo

Para el componente suelo se realizó una colecta de una muestra de suelo ubicada al centro de la parcela a una profundidad de 0-30 cm seccionada en tres submuestras (0 a 10 cm, 10 a 20 cm y 20 a 30 cm). Para la obtención de esa muestra se utilizó una barrena en forma de cilindro de volumen inalterado, con la medida ya establecida de la profundidad (De la Cruz Osorio, 2015).

Cada sub-muestra colectada se colocó en bolsas de plástico ziploc previamente rotuladas, para después ser llevadas a laboratorio en donde se determinará el porcentaje de carbono orgánico mediante el método AS-07, de Walkley y Black descrito en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Francisco et al., 2025). Asimismo se determinó la densidad aparente y la textura del suelo. Una vez obtenido el porcentaje de carbono orgánico del suelo (COS) se multiplicó por la densidad aparente, la profundidad de la capa de suelo (10 cm) y por el área cubierta por una ha (10,000 m²).

Estimación del carbono total

Una vez obtenido el C de los cinco reservorios, se obtuvo la suma por cada parcela, se extrapola a las dimensiones de 1 ha y posteriormente se realizaron las conversiones para obtener el carbono expresado en megagramos por ha

(MgC ha⁻¹). El C total de cada parcela de muestreo se obtuvo utilizando las siguiente formula:

$$CTot (MgC ha^{-1}) = CPer + Ccaf + Choj + Cherb + COS$$

Donde:

CTot = Carbono total

CPer = Carbono en especies perennes de sombra

Ccaf =Carbono en cafetos

Choj = Carbono en hojarasca

Cherb = Carbono en herbáceas

COS = Carbono orgánico del suelo

Análisis estadístico

Los datos obtenidos para los diferentes almacenes de C fueron sometidos a pruebas de normalidad mediante Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Debido a que no todas las variables cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad, las diferencias entre tratamientos fueron evaluadas mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y comparaciones múltiples de medias mediante la prueba de Dunn.

De manera particular para el COS se realizó un análisis de varianza factorial considerando como factores el tratamiento y la profundidad del suelo, así como su interacción. Cuando se detectaron diferencias significativas ($\alpha=0.05$), se aplicó la prueba HSD de Tukey para la comparación de medias.

Adicionalmente, se efectuaron análisis de correlación de Spearman para evaluar la relación entre las prácticas de manejo y las reservas de C en los sistemas evaluados. Asimismo, se realizó un análisis de componentes principales con el fin de visualizar gráficamente la asociación entre el C total almacenado y las prácticas de manejo, el cual se realizó utilizando únicamente variables

cuantitativas, por lo que las variables binarias no fueron incluidas debido a su baja variabilidad y al posible efecto de distorsión en la estructura de correlación.

Los análisis estadísticos mencionados se analizaron en JMP ver.19.11 (JMP Statistical Discovery LLC, 2025). Para todos los análisis se consideró un $\alpha = 0.05$.

4.5. Resultados y discusión

4.5.1. Reservorio del componente arbóreo: especies perennes de sombra

El C almacenado en especies perennes multipropósito, presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.0472$), además de una alta variabilidad tanto entre unidades de manejo como entre sistemas evaluados (Figura 19). El sistema de ESP registró un contenido promedio DE $21.76 \pm 15.75 \text{ MgC ha}^{-1}$, destacando la UM ESP1 por presentar el mayor valor dentro de este tratamiento.

Los valores obtenidos para el sistema ESP difieren de los reportados por Valdés-Velarde et al. (2022), probablemente debido a diferencias en la composición y estructura del dosel de sombra entre ambos estudios. En el trabajo realizado por dichos autores, la sombra en el sistema ESP estuvo dominado principalmente por encinos; mientras que en el presente estudio las especies que conformaron este tratamiento fueron *Inga vera* Willd., *Grevillea robusta* A.Cunn. ex R.Br., *Nectandra mollis* (Kunth) Nees, *Trema micranthum* (L.) Blume y *Chamaedorea elegans* Mart., especies con diferencias importantes en porte, arquitectura y capacidad de acumulación de biomasa. Asimismo, también es importante considerar que no solo influye las especies integradas en el sistema sino también el cómo responden ante las interacciones con otras especies. Clemente-Arenas (2022), identificó que el cedro (*Cedrela odorata* L.) obtuvo diferentes cantidades de C almacenado en su biomasa aérea cuando está acompañado de diferentes especies frutales.

Por otra parte, el sistema de POL presentó un contenido promedio de $54.87 \pm 30.05 \text{ MgC ha}^{-1}$, valor superior al reportado por Hernández Cruz (2013), aun cuando este sistema presentó una menor densidad promedio de árboles ($352 \pm 185 \text{ árboles ha}^{-1}$). Esto nuevamente sugiere que el almacenamiento de C no

dependió exclusivamente de la cantidad de individuos, sino también de la estructura y composición florística del dosel de sombra. En este sentido, los sistemas de POL presentaron una mayor complejidad estructural, reflejada en valores superiores de diversidad, con un índice de Shannon-Wiener (H') de 2.67, una abundancia de 110 individuos y una riqueza de 28 especies.

La UM POL4 destacó por presentar los mayores contenidos de biomasa y C almacenado dentro de los sistemas evaluados. Esta unidad estuvo conformada principalmente por *Persea schiedeana* Nees, *I. vera*, *Persea americana* Mill., *Citrus × sinensis* (L.) Osbeck, *Juglans pyriformis* Liebm., *Virola guatemalensis* (Hemsl.) Warb. y *Quercus xalapensis* Bonpl. El elevado contenido de biomasa observado en esta unidad podría atribuirse tanto a la composición de especies presentes como a una mayor altura promedio del arbolado (20.67 ± 12.49 m) respecto al resto de las UM evaluadas.

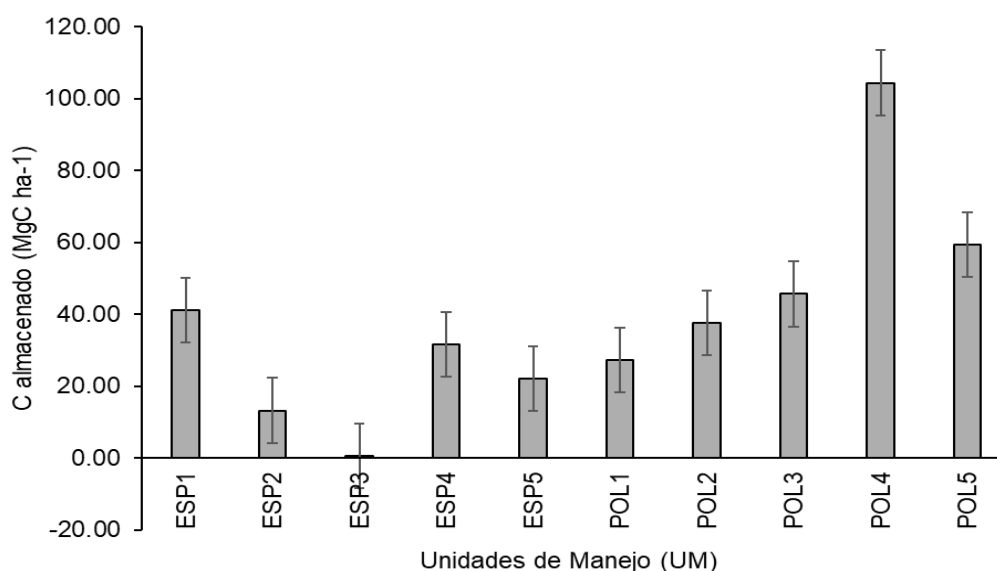


Figura 19. Carbono almacenado en especies perennes de sombra, por UM.

4.5.2. Reservorio del componente arbustivo: cafetos

El C en los cafetos no mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.0708$); sin embargo, el sistema ESP presentó el mayor contenido promedio de C almacenado, con 2.41 ± 0.49 MgC ha⁻¹, seguido por los sistemas APS con 1.68 ± 0.48 MgC ha⁻¹. y POL con 1.57 ± 0.53 MgC ha⁻¹.

Los valores obtenidos concuerdan con los reportados por Masuhara et al. (2015), sin embargo en el presente estudio el mayor almacenamiento de C en ESP no estuvo asociado a una mayor densidad de cafetos, sino posiblemente a diferencias en la estructura del cafetal, edad de las plantaciones y prácticas de manejo implementadas.

4.5.3. Reservorio del componente herbáceo

El almacenamiento de C en las herbáceas no evidencio diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p=0.2519$). Los resultados obtenidos fueron bajos y muy variados entre parcelas y tratamientos. De manera similar al reservorio de cafetos, el sistema ESP, presentó el mayor contenido promedio de C almacenado, con $0.31 \pm 0.32 \text{ MgC ha}^{-1}$, seguido por el sistema APS con $0.08 \pm 0.18 \text{ MgC ha}^{-1}$ y el POL con $0.06 \pm 0.18 \text{ MgC ha}^{-1}$. Los resultados en el sistema ESP fueron similares a lo obtenido por Masuhara et al. (2015) y los del sistema POL y APS a lo reportado por (Hernández Cruz, 2013).

Estos resultados pueden estar relacionados con el manejo frecuente de la cobertura del suelo, como el chapoleo o deshierbe. Este tipo de manejo aunque sea más frecuente es menos intensivo, por lo que puede favorecer una mayor permanencia de cobertura herbácea y acumulación de residuos orgánicos, condiciones que han sido asociadas a un mayor contenido de COS (Aravena et al., 2025; De la Cruz Osorio, 2015).

4.5.4. Reservorio de hojarasca

En cuanto a la hojarasca, esta presentó diferencias significativas entre los sistemas evaluados ($p=0.0209$), pues mostró una alta variabilidad entre parcelas y sistemas de manejo, reflejando dichas diferencias en la estructura de la vegetación, cobertura de sombra y acumulación de residuos orgánicos. El POL registró el mayor contenido promedio con $3.28 \pm 1.35 \text{ MgC ha}^{-1}$, superando ampliamente al sistema ESP y APS, cuyos valores fueron de $0.79 \pm 0.69 \text{ MgC ha}^{-1}$ y $0.70 \pm 1.57 \text{ MgC ha}^{-1}$, respectivamente. Los mayores contenidos observados en POL podrían estar asociados a una mayor densidad y diversidad de especies perennes de sombra, favoreciendo una mayor acumulación de

necromasa y residuos orgánicos sobre el suelo. Estos resultados resaltan la importancia del manejo de la sombra y de los sistemas tradicionales en la conservación de este reservorio y en el mantenimiento de procesos relacionados con el ciclo del C.

4.5.5. Reservorio del componente suelo

En el reservorio suelo, se obtuvieron diferencias significativas entre las profundidades ($p=0.0006$). Las mayores reservas de C se registraron en la profundidad de 0–10 cm, con una media de $30.50 \pm 2.68 \text{ MgC ha}^{-1}$, disminuyendo progresivamente en los estratos de 10–20 cm ($20.32 \pm 3.57 \text{ MgC ha}^{-1}$) y 20–30 cm ($16.94 \pm 4.27 \text{ MgC ha}^{-1}$). La prueba de Tukey indicó diferencias significativas entre la capa superficial (0–10 cm) y las profundidades inferiores, mientras que entre 10–20 cm y 20–30 cm no se detectaron diferencias estadísticas.

De manera general los valores de COS en MgC ha^{-1} fueron mayores a lo reportado por (Valdés-Velarde et al., 2022). Lo que indica un potencial relevante de almacenamiento de carbono en los SAFC evaluados.

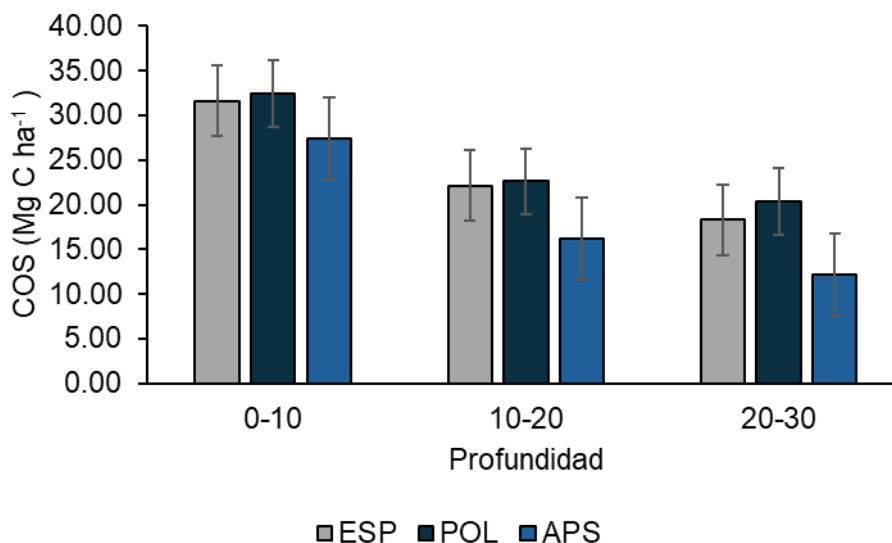


Figura 20. Carbono orgánico del suelo de tres sistemas cafetaleros a tres profundidades.

En cuanto a la comparación entre sistemas cafetaleros, no se detectaron diferencias estadísticas significativas ($p>0.05$) en el almacenamiento total de COS, resultado similar al reportado por Ramírez-Armas et al. (2025), no obstante,

se observaron tendencias diferenciales en los valores promedio. El POL presentó los mayores valores de COS. Esto sugiere una mayor incorporación de hojarasca y residuos orgánicos, asociada a sistemas con mayor cobertura arbórea y menor disturbio del suelo.

Para el caso del ESP, los valores de COS son más variables y, en general, inferiores a los observados en el sistema tradicional. Mientras que el APS muestra valores intermedios de COS, con una mayor concentración en la capa superficial y una disminución con la profundidad, reflejando una menor aportación de residuos orgánicos y una mayor exposición del suelo en comparación con los sistemas bajo sombra.

4.5.6. Carbono total almacenado

El C total presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.0148$). El sistema de POL registró los mayores contenidos de C total, seguido del sistema ESP y del sistema APS.

La prueba de Dunn evidenció diferencias significativas entre POL y APS, mientras que ESP presentó valores intermedios sin diferencias estadísticas respecto a los otros tratamientos. Estos resultados sugieren que los sistemas con mayor complejidad estructural y diversidad de sombra favorecen una mayor acumulación total de C.

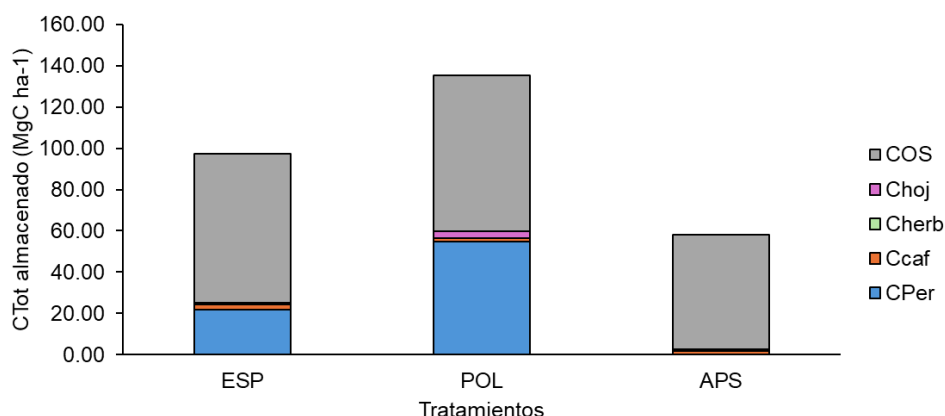


Figura 21. Carbono almacenado en tres sistemas cafetaleros

C_{Tot} = Carbono total, C_{Per} = Carbono en especies perennes de sombra, C_{caf} = Carbono en cafetos, C_{herb} = Carbono en herbáceas, C_{hoj} = Carbono en hojarasca, C_{OS} = Carbono orgánico del suelo.

El sistema POL registró el mayor contenido promedio de reservas de carbono, con $135.20 \pm 35.55 \text{ MgC ha}^{-1}$, seguido del ESP con $97.32 \pm 30.73 \text{ MgC ha}^{-1}$ y APS con $58.27 \pm 24.69 \text{ MgC ha}^{-1}$, respectivamente.

En términos generales, el componente suelo concentró la mayor cantidad de C de los sistemas evaluados, representando en promedio el $75.20 \pm 20.02 \%$ del C total, seguido del componente de especies perennes de sombra, con $31.47 \pm 12.89 \%$.

Estos resultados resaltan la importancia del componente edáfico y de la cobertura arbórea en la dinámica de almacenamiento de C de los SAFC, especialmente en aquellos con mayor complejidad estructural y diversidad vegetal. Gomes et al. (2025) menciona que los SAFC diversificados representan una estrategia inteligente en la mitigación del cambio climático debido a la alta capacidad de almacenamiento de C en el suelo.

4.5.7. Relación de prácticas de manejo con el almacenamiento de carbono

Correlación de Spearman (ρ)

Este análisis evidenció que las prácticas de manejo y las características estructurales de los SAF influyeron de manera diferencial sobre los distintos reservorios de C evaluados.

En el reservorio del componente arbóreo, se observó una correlación negativa significativa con la aplicación de fertilizante ($\rho = -0.8253$, $p = 0.0033$) y con el número de especies de sombra ($\rho = -0.7470$, $p = 0.0130$), mientras que la densidad de las perennes mostró una tendencia positiva.

La correlación negativa con el fertilizante no necesariamente implica que el fertilizante reduzca directamente el carbono arbóreo. Más bien este resultado parece reflejar diferencias en el tipo e intensidad de manejo entre SAF. Puesto que las parcelas con mayor uso de fertilizantes estuvieron asociadas principalmente a sistemas más intensivos y simplificados estructuralmente. En contraste con los sistemas tradicionales, que registraron mayores reservas de C en biomasa arbórea, tendieron a depender menos de fertilización química y a

mantener una mayor complejidad estructural. Además, es posible que en sistemas más tecnificados el manejo priorice la productividad del cafeto sobre el mantenimiento de árboles de sombra de gran porte, reduciendo así el potencial de almacenamiento de C de las especies perennes.

Por su parte, la correlación negativa del número de especies y la tendencia positiva de la densidad de las perennes sugieren que la estructura y composición del dosel influyen directamente en la acumulación de biomasa leñosa. Häger (2012), encontró que la composición de especies en combinación con la riqueza y otros factores como la pendiente e intensidad del sistema, explicaban el 83 % de la variación en el almacenamiento de C.

De manera particular, en el almacén de los cafetos, no se detectaron correlaciones significativas con las prácticas de manejo evaluadas, indicando que el C almacenado en este componente presentó una menor sensibilidad al manejo agronómico y una menor contribución a la variabilidad del C entre sistemas.

Esto sugiere que este reservorio presentó una respuesta relativamente homogénea entre sistemas y que el almacenamiento de C dependió más de características propias del cultivo, como edad de las plantaciones, diámetro de tallos productivos, arquitectura de las plantas o de manejo histórico del cafetal. Defrenet et al. (2016) observó que el sistema radical del café constituyó el 49 % de la biomasa total de la planta y que la distribución de raíces y su productividad estuvieron vinculadas a la edad y arquitectura, más que a la presencia de árboles de sombra, que no redujeron significativamente la biomasa radical fina del café. Además, modelos funcional-estructurales en *Coffea canephora* muestran que la asimilación de C y la biomasa se relacionan íntimamente con la arquitectura de la planta (ángulo y tamaño de hojas, alometría) y con patrones de asignación de biomasa entre raíces y copa (Rakocevic et al., 2023).

Para el componente herbáceo, se registró una correlación positiva con la aplicación de abono ($p=0.5627$, $p=0.0290$) y una correlación negativa con la densidad de cafetos ($p=-0.5225$, $p=0.0457$).

Lo que sugiere que el incremento en la materia orgánica y una menor cobertura del cultivo favorecen el desarrollo de biomasa herbácea.

En el caso de la hojarasca, se identificaron correlaciones negativas significativas con la aplicación de fertilizantes ($\rho=-0.7258$, $p=0.0022$) y con la poda del café ($\rho=-0.7006$, $p=0.0036$), mientras que la densidad de las perennes presentó una correlación positiva ($\rho=0.5542$, $p=0.0321$). Por lo que podemos decir que los sistemas con mayor cobertura arbórea y menor intensidad de manejo favorecen una mayor acumulación de residuos orgánicos superficiales.

El reservorio de COS presentó una correlación negativa significativa entre profundidad y C ($\rho=-0.5309$, $p=0.0047$) lo que reafirma que el contenido de C disminuyó conforme aumentó la profundidad del suelo. Este comportamiento es consistente con la dinámica natural de acumulación de materia orgánica en SAF, donde los mayores aportes de residuos vegetales, hojarasca y raíces finas se concentran en los horizontes superficiales. Asimismo, las prácticas de chapoleo ($\rho=0.5663$, $p<0.0001$) y podas ($\rho=0.5663$, $p<0.0001$) presentaron correlaciones positivas moderadas. Esto podría indicar que dichas prácticas favorecieron indirectamente la incorporación de residuos vegetales y materia orgánica superficial, particularmente cuando los residuos derivados del manejo permanecieron dentro de la parcela. En contraste, la fertilización mostró una correlación positiva baja y no significativa ($\rho=0.2668$, $p=0.0765$), mientras que el abono no presentó relación significativa con el carbono orgánico ($\rho=0.1626$, $p=0.2858$).

En general, los resultados muestran que las prácticas de manejo asociadas a sistemas más intensificados, como el uso de fertilizantes y podas frecuentes, tendieron a relacionarse con menores contenidos de C almacenado. Mientras que variables asociadas a una mayor complejidad estructural, especialmente la densidad de las especies perennes de sombra, favorecieron el almacenamiento de C en los SAFC evaluados.

Análisis de componentes principales (ACP)

El ACP explicó el 65.1 % de la variación total en los dos primeros componentes principales. El CP1 (40.9 %) representó principalmente un gradiente entre sistemas con mayor complejidad agroforestal, asociados con mayores contenidos de carbono total, densidad de especies perennes y aplicación de abonos, y sistemas con manejo más intensivo, relacionados con fertilización y chapoleo.

Por su parte, el CP2 (24.2 %) estuvo asociado principalmente a variables estructurales, como número de especies de sombra y densidad de perennes, en contraste con la densidad de cafetos.

El agrupamiento de tratamientos mostró que los sistemas de POL se asociaron con mayores reservas de C y complejidad estructural, mientras que los sistemas APS se relacionaron con prácticas de manejo más intensivas.

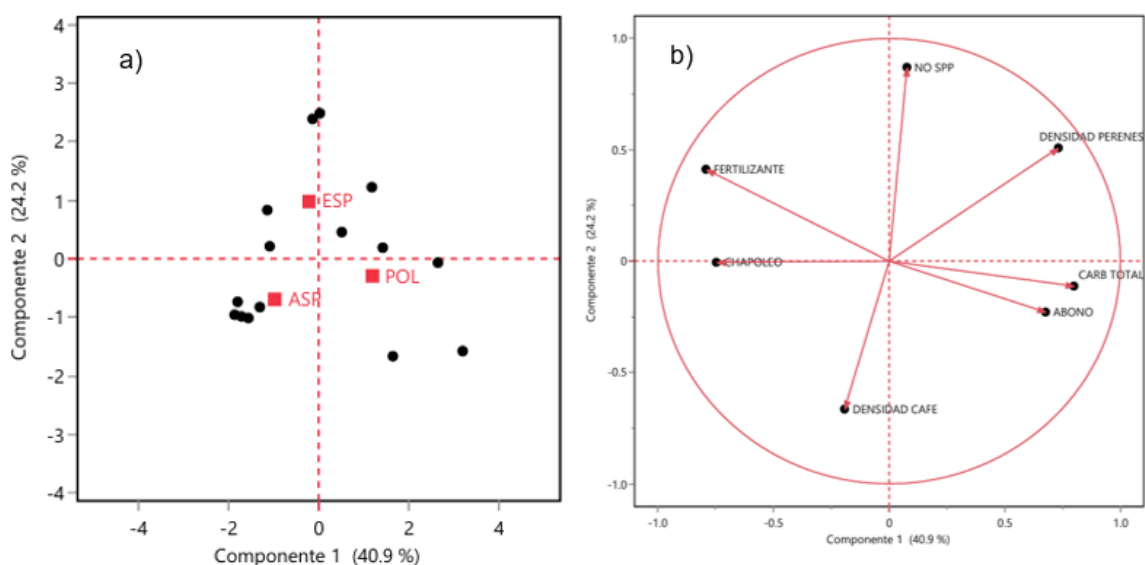


Figura 22. ACP de prácticas de manejo, variables estructurales y C total almacenado en SAFC.

a) Agrupamiento (bilplot) de tratamientos, b) Círculo de correlaciones de variables

Estos resultados fueron consistentes con los patrones observados en las correlaciones de Spearman, mostrando una asociación positiva entre el C almacenado en los sistemas y las variables relacionadas con la complejidad estructural del sistema.

4.6. Conclusiones

Los sistemas agroforestales de café evaluados en la región cafetalera de Huatusco, Veracruz, presentaron diferencias en su capacidad de almacenamiento de carbono asociadas principalmente a la complejidad estructural, composición arbórea y labores agrícolas implementadas. El sistema de policultivo tradicional registró las mayores reservas de carbono total, seguido del sistema especializado y del sistema a pleno sol, evidenciando la importancia del componente arbóreo y la diversificación de la sombra, en los contenidos de los almacenes de carbono de estos sistemas.

El almacén del componente suelo concentró la mayor proporción del carbono almacenado, seguido de las especies perennes de sombra, lo que confirma la relevancia del componente edáfico y arbóreo como principales almacenes de carbono en los sistemas agroforestales cafetaleros. Asimismo, el carbono orgánico del suelo disminuyó conforme aumentó la profundidad, indicando una mayor acumulación de materia orgánica en los horizontes superficiales.

Los almacenes asociados a las especies perennes de sombra y la hojarasca fueron los componentes más susceptibles a las características estructurales del sistema y al manejo implementado. La densidad de especies perennes multipropósito mostró una relación positiva con el almacenamiento de carbono, mientras que prácticas asociadas a sistemas más intensivos, como la aplicación de fertilizantes y frecuencia de podas, tendieron a relacionarse con menores contenidos de carbono, particularmente en los reservorios arbóreo y de hojarasca.

En contraste, el carbono almacenado en las plantas de café y herbáceas presentó menor variación entre los tratamientos y una menor contribución al carbono total del sistema, lo que sugiere que las diferencias en el proceso de almacenamiento de carbono entre sistemas dependen principalmente de la estructura y manejo del dosel de sombra más que del cultivo de café.

En términos generales, los resultados indican que los sistemas cafetaleros con mayor diversidad y cobertura arbórea favorecen una mayor acumulación de carbono y podrían representar una alternativa estratégica para la conservación de servicios ecosistémicos y la mitigación del cambio climático. En este sentido, se recomienda buscar e implementar prácticas orientadas al mantenimiento de la cobertura de sombra, diversificación de especies perennes y manejo menos intensivo para contribuir a incrementar las reservas de carbono en sistemas agroforestales de café y con ello fortalecer su potencial de incorporación a esquemas de pago por servicios ambientales o mercados de carbono.

4.7. Literatura citada

- Aravena, C., Valle, S. R., Vergara, R., González Chang, M., Martínez, O., Clunes, J., Caurapán, B., & Asenjo, J. (2025). Effect of Agricultural Management Intensity on the Organic Carbon Fractions and Biological Properties of a Volcanic-Ash-Derived Soil. *Sustainability*, 17(6), 2704. <https://doi.org/10.3390/su17062704>
- Ayala-Montejo, D., Valdés-Velarde, E., & Romo-Lozano, J. L. (2021). Análisis y priorización de sistemas de producción asociadas al café y aguacate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(3), 525–539. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i3.2377>
- Begazo Curie, K., & Jave Nakayo, J. (2018). Estimación de la biomasa aérea total y por componente estructural en especies arbóreas de Lima, Perú. *Revista Forestal Del Perú*, 33(1), 76. <https://doi.org/10.21704/rfp.v33i1.1167>
- Benavides Solrio, J. de D., Torres García, O., Flores Garnica, J. G., Acosta Mireles, M., & Rueda Sánchez, A. (2021). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono aéreos de Cedrela odorata L. en plantaciones forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(65). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.791>
- Clemente-Arenas, E. R. (2022). Carbono almacenado en la biomasa aérea y su valoración económica en los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo, Madre de Dios - Perú. *Revista Forestal Del Perú*, 37(1), 54–68. <https://doi.org/10.21704/rfp.v37i1.1593>
- Dao, A., Bationo, B. A., Traoré, S., Bognounou, F., & Thiombiano, A. (2021). Using allometric models to estimate aboveground biomass and predict carbon stocks of mango (*Mangifera indica* L.) parklands in the Sudanian zone of Burkina Faso. *Environmental Challenges*, 3, 100051. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100051>
- De la Cruz Osorio, J. C. (2015). *Almacenes de carbono asociados a diferentes unidades del paisaje en el Centro Regional Universitario Oriente* [Maestría]. Universidad Autónoma Chapingo.
- De la Cruz-Osorio, J. C. (2015). *Almacenes de carbono asociados a diferentes unidades del paisaje en el Centro Regional Universitario Oriente*. [Maestría]. Universidad Autónoma Chapingo .
- Defrenet, E., Rouspard, O., Van den Meersche, K., Charbonnier, F., Pastor Pérez-Molina, J., Khac, E., Prieto, I., Stokes, A., Roumet, C., Rapidel, B., de Melo Virginio Filho, E., Vargas, V. J., Robelo, D., Barquero, A., & Jourdan, C. (2016). Root biomass, turnover and net primary productivity of a coffee agroforestry system in Costa Rica: effects of soil depth, shade trees, distance to row and coffee age. *Annals of Botany*, 118(4), 833–851. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw153>

- Díaz Padilla, G., Guajardo Panes, R. A., & López Morgado, R. (2021). Potencial productivo del cultivo de café en México. In R. López Morgado, G. Díaz Padilla, & A. Zamarripa Colmenero (Eds.), *El sistema producto café en México: problemática y tecnología de producción* (Primera, pp. 35–54). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Escamilla Prado, E., & Díaz Cárdenas, S. (2016). *Sistemas de cultivo de café en México* (S. Córdova Santamaría, Ed.; Segunda). Centro Nacional de Investigación Innovación y Desarrollo Tecnológico del Café.
- Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., & Torres-Rivera, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revistas Chapingo Seria Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVIII(1), 57–70. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.04.030>
- Farfán Valencia, F. (2014). *Agroforestería y sistemas agroforestales con café* (S. M. Marín L, Ed.). FNC-Cenicafé. https://www.cenicafe.org/es/publications/Agroforester%C3%ADa_y_sistemas_agroforestales_con_caf%C3%A9.pdf
- Francisco, J., Guzmán, P., Vazquez, A., & Robledo-Santoyo, E. (2025). *Procedimientos de análisis para diagnosticar la fertilidad del suelo* (Primera). Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. <https://www.researchgate.net/publication/391773424>
- Gomes, V. M., Miranda Júnior, M. S., Silva, L. J., Teixeira, M. V., Teixeira, G., Schossler, K., Freitas, D. A. F. de, & Oliveira, D. M. da S. (2025). A Global Meta-Analysis of Soil Carbon Stock in Agroforestry Coffee Cultivation. *Agronomy*, 15(2), 480. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020480>
- Häger, A. (2012). The effects of management and plant diversity on carbon storage in coffee agroforestry systems in Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 86(2), 159–174. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9545-1>
- Hernández Cruz, E. (2013). *Carbono acumulado en dos sistemas agroforestales y en un sistema de bosque de niebla* [Maestría]. Universidad Autónoma Chapingo.
- Hernández Pérez, M. (2022). *El café en la región de Huatusco, Veracruz: historia y formas de vida* (Primera). Universidad Veracruzana. <https://doi.org/10.25009/uv.2772.1649>
- Hughes, R. F., Kauffman, J. B., & Jaramillo, V. J. (1999). Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of Mexico. *Ecological Applications*, 9(2), 389–402. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1999\)009\[0389:BCANDO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1999)009[0389:BCANDO]2.0.CO;2)
- IPCC. (2021). *Cambio Climático 2021: Un resumen para todo el mundo* (Cambridge University Press., Tran.). <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

- JMP Statistical Discovery LLC. (2025). *JMP*. JMP Statistical Discovery LLC. <https://www.jmp.com/>
- Kuyah, S., Dietz, J., Muthuri, C., Jamnadass, R., Mwangi, P., Coe, R., & Neufeldt, H. (2012). Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: I. Aboveground biomass. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 158, 216–224. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.05.011>
- Lorenz, K., & Lal, R. (2014). Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 443–454. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0212-y>
- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J. C., Salcedo, E., Juárez, M. de J., & Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica y Tecnología*, 4(1), 66–93.
- ONU. (2023). *Aumentar la eliminación de dióxido de carbono en aras de los objetivos climáticos*. <https://unsdg.un.org/es/latest/blog/aumentar-la-eliminacion-de-dioxido-de-carbono-en-aras-de-los-objetivos-climaticos>
- Panwar, P., Mahalingappa, D. G., Kaushal, R., Bhardwaj, D. R., Chakravarty, S., Shukla, G., Thakur, N. S., Chavan, S. B., Pal, S., Nayak, B. G., Srinivasaiah, H. T., Dharmaraj, R., Veerabhadraswamy, N., Apshahana, K., Suresh, C. P., Kumar, D., Sharma, P., Kakade, V., Nagaraja, M. S., ... Gurung, T. (2022). Biomass Production and Carbon Sequestration Potential of Different Agroforestry Systems in India: A Critical Review. *Forests*, 13(8), 1274. <https://doi.org/10.3390/f13081274>
- Rakocevic, M., Baroni, D. F., de Souza, G. A. R., Bernado, W. de P., de Almeida, C. M., Matsunaga, F. T., Rodrigues, W. P., Ramalho, J. C., & Campostrini, E. (2023). Correlating *Coffea canephora* 3D architecture to plant photosynthesis at a daily scale and vegetative biomass allocation. *Tree Physiology*, 43(4), 556–574. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpac138>
- Ramírez-Armas, L. M., Bolaños-González, M. A., López-Pérez, A., Macedo-Cruz, A., & Pazos-Espejel, M. M. (2025). Almacenes de carbono en sistemas agroforestales de *Coffea arabica* y *Coffea canephora* en Veracruz, México. *Estado Actual Del Conocimiento Del Ciclo Del Carbono y Sus Interacciones En México: Síntesis a 2025*, 7(7), 392–400.
- Rojas-García, F., De Jong, B. H. J., Martínez-Zurimendí, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72(6), 835–864. <https://doi.org/10.1007/S13595-015-0456-Y/TABLES/7>
- Ruíz García, P. (2015). *Diseño de tecnologías agroforestales con mayor potencial de fijación de carbono en Ajuchitlán, Morelos* [Maestría]. Universidad Autónoma Chapingo.

- Ruíz Nápoles, P., Castañeda León, J., & Moreno Reyes, E. (2023). Greenhouse gas emissions in the Mexican economy and mitigation policies, 2020-2030. *Trimestre Económico*, 90(358), 531–551. <https://doi.org/10.20430/ete.v90i358.1662>
- Ruíz-García, P., Monterroso-Rivas, A. I., Valdés-Velarde, E., Escamilla-Prado, E., & Gómez-Díaz, J. D. (2022). Reservas de carbono en sistemas agroforestales con café (*C. arabica* L.) ante el cambio climático: caso México. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3). <https://doi.org/10.15517/am.v33i3.48671>
- Schlegel, B., Gayoso, J., & Guerra, J. (2001). *Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales*.
- Schroth, G., D'Angelo, S. A., Teixeira, W. G., Haag, D., & Lieberei, R. (2002). Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management*, 163(1–3), 131–150. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00537-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00537-0)
- Segura, M., Kanninen, M., & Suárez, D. (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*, 68(2), 143–150. <https://doi.org/10.1007/S10457-006-9005-X/METRICS>
- Sharma, M., Kaushal, R., Kaushik, P., & Ramakrishna, S. (2021). *Carbon Farming: Prospects and Challenges*. <https://doi.org/10.20944/preprints202108.0496.v1>
- Tinoco Rueda, J. Á. (2024). *Guía para la Determinación del Almacenamiento de Carbono en Territorios Cafetaleros de Veracruz*.
- Ulian, T., Way, M., Gianella, M., Bell, E., Flores Ortiz, C. M., Cabrera Santos, D., Sampayo Maldonado, S., Rodríguez Arévalo Norma Isela, Rojas Rojas Angela Viviana, Vázquez Corzas, F. G., Cobos Silva, J., Miranda García, L., & Hunter Manson, R. (2023). *Incrementando la captura de carbono en cafetales bajo sombra: 1ra. Edición* (J. Cobos Silva, D. Cabrera Santos, & M. Gianella, Eds.). Royal Botanic Gardens, Kew, FESI-UNAM, Pronatura Veracruz A.C.
- UNCCD. (2015). *Cambio climático y degradación de la tierras: Acercar los conocimientos a las partes interesadas*. https://www.unccd.int/sites/default/files/documents/2015_Climate_LD_Outcomes_CST_conf_SPA_0.pdf
- Valdés-Velarde, E., Vázquez-Domínguez, L. P., Tinoco-Rueda, J. Á., Sánchez-Hernández, R., Salcedo-Pérez, E., & Lagunes-Fortiz, E. (2022). Servicio ecosistémico de carbono almacenado en cafetales bajo sombra en sistema agroforestal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(28), 287–297. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3283>

- Van Breugel, M., Ransijn, J., Craven, D., Bongers, F., & Hall, J. S. (2011). Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. *Forest Ecology and Management*, 262(8), 1648–1657. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.018>
- Van Noordwijk, M., Rahayu, S., Hairiah, K., Wulan, Y. C., Farida, A., & Verbist, B. (2002). Carbon stock assessment for a forest-to-coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Science in China Series C-Life Sciences*, 45, 75–86.

5. CONCLUSIONES GENERALES

Se logró evaluar el aporte de las prácticas de manejo al almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café bajo sombra diversificada en Huatusco, Veracruz, mediante su caracterización y la estimación de los reservorios de carbono. Los resultados obtenidos demostraron que las prácticas de manejo, la complejidad estructural y la diversificación de especies influyen directa e indirectamente en la capacidad de almacenamiento de carbono y en la sostenibilidad de los sistemas productivos. Se confirmó de forma parcial la hipótesis planteada, ya que los sistemas bajo sombra diversificada, especialmente el policultivo tradicional, presentaron mayores reservas de carbono respecto al sistema de café a pleno sol, asociadas principalmente a una mayor cobertura arbórea, diversidad florística, acumulación de hojarasca y menor intensidad de manejo.

La caracterización biofísica mostró una distribución de los sistemas cafetaleros concentrada en ambientes con condiciones idóneas para la producción de café y el almacenamiento de carbono. Asimismo, los sistemas con una mayor heterogeneidad florística y estratificación vertical se asociaron con un mayor potencial para el almacenamiento de carbono en biomasa aérea y suelo. Se confirmó que el carbono orgánico del suelo presentó una distribución vertical decreciente, lo que infiere una mayor acumulación de materia orgánica en los horizontes superficiales, lo que se atribuye a la cobertura vegetal y al porte de constante de residuos orgánicos.

El componente suelo destacó como el principal reservorio de carbono seguido por las especies perennes multipropósito de sombra, lo que reafirma la importancia del componente edáfico y arbóreo en la dinámica de almacenamiento de carbono de los sistemas agroforestales de café.

Se detectó efectos diferenciados de las prácticas de manejo sobre los reservorios de carbono. Los sistemas con mayor heterogeneidad estructural y florística presentaron una mayor reserva de carbono. En contraste, sistemas con un manejo más intensivo y simplificación estructural presentaron una tendencia a

menores reservas de carbono, particularmente en el componente arbóreo y la hojarasca.

En el aspecto socioeconómico, se identificaron factores indispensables para la permanencia y sostenibilidad de los sistemas agroforestales de café, entre estos destacan: la organización de productores, el conocimiento tradicional, diversificación productiva y acceso a capacitación técnica actualizada. No obstante, el envejecimiento de los productores, la poca rentabilidad del producto, y la dependencia de sistemas intensivos son algunas de las limitantes para la adopción de estrategias orientadas al incremento del almacenamiento de carbono y fortalecimiento de la sostenibilidad en los sistemas agroforestales de café de la región.

En este sentido, los resultados obtenidos posicionan a los sistemas agroforestales de café bajo sombra diversificada como una alternativa estratégica para compaginar producción agrícola, conservación ambiental y mitigación del cambio climático. Además de presentar información básica e inédita al considerar las prácticas de manejo de los sistemas agroforestales como factores clave en el almacenamiento de carbono, lo que puede contribuir a la integración de pequeños productores en esquemas de pago por servicios ambientales o mercados de carbono, contribuyendo simultáneamente a la sostenibilidad productiva y al bienestar de los cafeticultores de la región.

APÉNDICES

CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA y SOCIOECONÓMICA DE SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ EN HUATUSCO, VERACRUZ

Apéndice 1. Pendientes presentes en Huatusco, Veracruz.

Categoría de pendiente	Rangos de pendiente (%)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Plano	0-2	777.11	3.83
Moderadamente inclinado	2-8	4,157.65	20.49
Inclinado	8-15	3,439.50	16.95
Moderadamente escarpado	15-40	6,801.68	33.52
Escarpado	>40	5,114.97	25.21
Total		20,290.91	100.00

Fuente: Elaboración propia con información de (INEGI, 2013) y de acuerdo con (Arrazate Jiménez et al., 2022).

Apéndice 2. Topoformas presentes en Huatusco, Veracruz.

Topoforma	Clave	Descripción		Superficie (ha)	Porcentaje (%)
		Pendiente (%)	Altitud (msnm)		
Sierra	SA	15 a >40	1580	3,346.38	16.49
Lomerío de zona baja	LZB	2 a 40	1000	5,640.76	27.80
Lomerío de zona alta	LZA	2 a 40	1410	5,964.40	29.39
Cono volcánico	CV	15 a >40	1550	140.35	0.70
Valle	VA	15 a >40	850	2,390.10	11.78
Planicie de zona baja	PZB	0 a 15	670	1,479.73	7.29
Planicie de zona alta	PZA	0 a 15	1270	1,329.19	6.55
Total				20,290.91	100.00

Fuente: Elaboración propia con información de (INEGI, 2001)

Apéndice 3. Climas presentes en Huatusco, Veracruz.

Tipo de clima	Clave climática	Descripción de la temperatura	Descripción de la precipitación	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Templado húmedo	C(f)	La temperatura media anual oscila entre 12°C y 18°C. La temperatura del mes más frío se encuentra entre -3°C y 18°C, mientras que la temperatura del mes más caliente es debajo de 22°C.	Con lluvias todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18 % del total anual. La precipitación en el mes más seco es mayor de 40 mm.	2,049.85	10.10
Cálido subhúmedo	Aw1	Con temperatura media anual mayor de 22°C. La temperatura del mes más frío es mayor de 18°C.	Con lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual. La precipitación del mes más seco es menor de 60 mm.	1,195.31	5.89
Semicálido subhúmedo del grupo C	(A)C(w2)	Con temperatura media anual mayor de 18°C. La temperatura del mes más frío es menor de 18°C, mientras que la temperatura del mes más caliente es mayor de 22°C.	Con lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual. La precipitación del mes más seco es menor a 40 mm.	1,308.53	6.45
Semicálido húmedo del grupo C	(A)C(m)(f)	Con temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C y temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	La precipitación anual mayor de 500 mm y precipitación del mes más seco mayor de 40 mm. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2 % del total anual.	10,280.34	50.66

Tipo de clima		Clave climática	Descripción de la temperatura	Descripción de la precipitación	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Semicálido húmedo	del grupo C	(A)C(fm)	Con temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C y temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Precipitación del mes más seco mayor a 40 mm; lluvias entre verano e invierno y porcentaje de lluvia invernal menor al 18 % del total anual.	1,122.44	5.53
Templado, húmedo		C(m)(f)	La temperatura media anual oscila entre 12°C y 18°C. La temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y la temperatura del mes más caliente es menor de 22°C.	Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2 % del total anual.	3,464.16	17.07
Cálido subhúmedo		Aw2	Con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.	Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual.	220.51	1.09
Semicálido húmedo	del grupo C	(A)C(m)	Con temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C y temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Lluvias de verano, precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual.	649.76	3.20
Total					20,290.91	100.00

Fuente: Elaboración propia con información de (CONABIO, 2025).

Apéndice 4. Uso del suelo y vegetación presentes en Huatusco, Veracruz.

Uso del suelo y vegetación	Clave	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Agricultura de temporal permanente	ATP	480.51	2.37
Agricultura de temporal semipermanente	ATS	38.52	0.19
Agricultura de temporal semipermanente y permanente	ATSP	817.43	4.03
Agricultura de temporal anual y permanente	ATAP	2,284.56	11.26
Agricultura de temporal anual y semipermanente	ATAS	424.64	2.09
Subtotal		4,045.66	19.94
Cultivo de café a pleno sol	APS	42.14	0.21
Sistema agroforestal de café	SAFC	7,847.38	38.67
Sistema agroforestal de café especializado	ESP	238.08	1.17
Subtotal		8,127.6	40.05
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia-densidad baja	VSASBCDB	14.82	0.07
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia- densidad media	VSASBCDM	358.5	1.77
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia-densidad alta	VSASBCDA	22.55	0.11
Subtotal		395.87	1.95
Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña-densidad baja	VSABMMDB	75.86	0.37
Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña-densidad media	VSABMMDM	912.09	4.50
Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña-densidad alta	VSABMMDA	1,850.73	9.12
Subtotal		2,838.68	13.99

Uso del suelo y vegetación	Clave	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña-densidad media	VSArBMMDM	93.93	0.46
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia-densidad alta	VSArBMMDA	405.99	2.00
Subtotal		499.92	2.46
Bosque mesófilo de montaña-densidad media	BMMDM	465.00	2.29
Bosque mesófilo de montaña-densidad alta	BMMDA	862.34	4.25
Subtotal		1,327.34	6.54
Bosque de encino-densidad media	BEDM	159.34	0.79
Bosque de encino-densidad alta	BEDA	5.45	0.03
Subtotal		164.79	0.82
Pastizal cultivado	PC	1,797.39	8.86
Asentamientos humanos	AH	1,053.38	5.19
Cuerpo de agua artificial (jagüey)	CAJ	12.43	0.06
Área minera	AM	27.85	0.14
Total		20,290.90	100.00

Fuente: Elaboración propia con información de (CONABIO, 2025).

Apéndice 5. Unidades del paisaje presentes en Huatusco, Veracruz.

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
1	CV_C(f)_ATAP	Cono volcánico	C(f)	Agricultura de temporal anual y permanente Vegetación secundaria	15 a >40	1550	24.36	0.12
2	CV_C(f)_VSABMMDM	Cono volcánico	C(f)	arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad media Vegetación secundaria	15 a >40	1550	4.92	0.02
3	SA_C(m)(f)_VSABMMDA	Sierra	C(m)(f)	arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad alta	15 a >40	1580	730.88	3.60
4	VA_(A)C(m)(f)_BEDM	Valle	(A)C(m)(f)	Bosque de encino- Densidad media	15 a >40	850	122.44	0.60
5	CV_C(f)_PC	Cono volcánico	C(f)	Pastizal cultivado	15 a >40	1550	2.01	0.01
6	VA_Aw2_ATSP	Valle	Aw2	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	15 a >40	850	0.77	0.00
7	LZA_(A)C(m)(f)_PC	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Pastizal cultivado	2 a 40	1410	469.04	2.31
8	VA_(A)C(w2)_SAFC	Valle	(A)C(w2)	Sistema agroforestal de café	15 a >40	850	453.85	2.24

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
9	PZB_Aw1_PC	Planicie de zona baja	Aw1	Pastizal cultivado	0 a 15	670	72.92	0.36
10	SA_(A)C(m)(f)_ESP	Sierra	(A)C(m)(f)	Sistema agroforestal de café especializado Vegetación secundaria	15 a >40	1580	0.00	0.00
11	LZA_C(m)(f)_VSABMMDA	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad alta	2 a 40	1410	38.30	0.19
12	LZB_(A)C(m)(f)_ESP	Lomerío de zona baja	(A)C(m)(f)	Sistema agroforestal de café especializado	2 a 40	1000	111.23	0.55
13	LZA_(A)C(m)(f)_BMMDM	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Bosque mesófilo de montaña-Densidad media	2 a 40	1410	143.72	0.71
14	LZB_(A)C(m)_AH	Lomerío de zona baja	(A)C(m)	Asentamientos humanos	2 a 40	1000	10.83	0.05
15	SA_(A)C(m)(f)_ATP	Sierra	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal permanente Agricultura de temporal	15 a >40	1580	4.80	0.02
16	VA_(A)C(m)(f)_ATSP	Valle	(A)C(m)(f)	semipermanente y permanente	15 a >40	850	35.59	0.18
17	LZA_(A)C(m)(f)_VSABMMDM	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque	2 a 40	1410	46.39	0.23

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
18	SA_C(m)(f)_VSABMMDM	Sierra	C(m)(f)	mesófilo de montaña- Densidad media Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad media	15 a >40	1580	110.37	0.54
19	LZA_(A)C(m)(f)_ATAP	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal anual y permanente	2 a 40	1410	305.13	1.50
20	PZB_Aw1_SAFC	Planicie de zona baja	Aw1	Sistema agroforestal de café	0 a 15	670	22.51	0.11
21	PZB_Aw1_VSASBCDA	Planicie de zona baja	Aw1	Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia-Densidad alta	0 a 15	670	7.92	0.04
22	CV_C(f)_VSABMMDA	Cono volcánico	C(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad alta	15 a >40	1550	21.40	0.11
23	LZA_(A)C(fm)_BMMDA	Lomerío de zona alta	(A)C(fm)	Bosque mesófilo de montaña-Densidad alta	2 a 40	1410	61.85	0.30
24	SA_C(m)(f)_BMMDM	Sierra	C(m)(f)	Bosque mesófilo de montaña-Densidad media	15 a >40	1580	46.92	0.23

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
25	LZA_(A)C(fm)_SAFC	Lomerío de zona alta	(A)C(fm)	Sistema agroforestal de café	2 a 40	1410	8.85	0.04
26	LZA_C(m)(f)_VSABMMDB	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad baja	2 a 40	1410	50.36	0.25
27	LZA_C(m)(f)_VSABMMDM	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad media	2 a 40	1410	198.75	0.98
28	SA_C(f)_VSABMMDA	Sierra	C(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad alta	15 a >40	1580	409.13	2.02
29	SA_(A)C(m)(f)_BMMDA	Sierra	(A)C(m)(f)	Bosque mesófilo de montaña-Densidad alta	15 a >40	1580	191.82	0.95
30	LZA_(A)C(m)(f)_AM	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Área minera	2 a 40	1410	12.45	0.06
31	PZA_(A)C(m)(f)_PC	Planicie de zona alta	(A)C(m)(f)	Pastizal cultivado	0 a 15	1270	262.71	1.29
32	SA_C(m)(f)_BEDA	Sierra	C(m)(f)	Bosque de encino- Densidad alta	15 a >40	1580	4.35	0.02

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
33	LZB_(A)C(m)_BEDM	Lomerío de zona baja	(A)C(m)	Bosque de encino- Densidad media	2 a 40	1000	3.38	0.02
34	SA_C(m)(f)_BMMDA	Sierra	C(m)(f)	Bosque mesófilo de montaña-Densidad alta	15 a >40	1580	592.03	2.92
35	PZB_Aw2_APS	Planicie de zona baja	Aw2	Cultivo de café a pleno sol	0 a 15	670	8.07	0.04
36	SA_(A)C(m)(f)_AH	Sierra	(A)C(m)(f)	Asentamientos humanos	15 a >40	1580	0.79	0.00
37	VA_Aw1_SAFC	Valle	Aw1	Sistema agroforestal de café	15 a >40	850	9.02	0.04
38	PZA_C(m)(f)_ATAP	Planicie de zona alta	C(m)(f)	Agricultura de temporal anual y permanente	0 a 15	1270	0.26	0.00
39	LZA_(A)C(fm)_ATAP	Lomerío de zona alta	(A)C(fm)	Agricultura de temporal anual y permanente	2 a 40	1410	460.35	2.27
40	PZA_(A)C(m)(f)_VSABMMDM	Planicie de zona alta	(A)C(m)(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad media	0 a 15	1270	22.82	0.11
41	CV_(A)C(m)(f)_VSABMMDA	Cono volcánico	(A)C(m)(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad alta	15 a >40	1550	50.39	0.25

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
42	PZB_(A)C(w2)_APS	Planicie de zona baja	(A)C(w2)	Cultivo de café a pleno sol	0 a 15	670	21.02	0.10
43	VA_(A)C(m)(f)_AH	Valle	(A)C(m)(f)	Asentamientos humanos	15 a >40	850	0.00	0.00
44	LZA_C(f)_PC	Lomerío de zona alta	C(f)	Pastizal cultivado	2 a 40	1410	373.52	1.84
45	VA_(A)C(m)_ATP	Valle	(A)C(m)	Agricultura de temporal permanente	15 a >40	850	139.71	0.69
46	SA_C(m)(f)_ATSP	Sierra	C(m)(f)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	15 a >40	1580	2.34	0.01
47	LZA_(A)C(m)(f)_ATP	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal permanente	2 a 40	1410	130.31	0.64
48	SA_C(m)(f)_AH	Sierra	C(m)(f)	Asentamientos humanos	15 a >40	1580	11.80	0.06
49	SA_C(m)(f)_PC	Sierra	C(m)(f)	Pastizal cultivado	15 a >40	1580	146.54	0.72
50	LZA_C(m)(f)_SAFC	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	Sistema agroforestal de café	2 a 40	1410	30.83	0.15
51	SA_(A)C(m)(f)_BEDA	Sierra	(A)C(m)(f)	Bosque de encino- Densidad alta	15 a >40	1580	1.10	0.01
52	PZB_(A)C(w2)_VSArSBCDA	Planicie de zona baja	(A)C(w2)	Vegetación secundaria arborescente de selva baja caducifolia-Densidad alta	0 a 15	670	8.08	0.04
53	VA_(A)C(m)(f)_APS	Valle	(A)C(m)(f)	Cultivo de café a pleno sol	15 a >40	850	1.51	0.01

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
54	LZB_(A)C(m)(f)_ATSP	Lomerío de zona baja	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	2 a 40	1000	374.87	1.85
55	SA_(A)C(m)(f)_VSABMMDA	Sierra	(A)C(m)(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad alta	15 a >40	1580	39.25	0.19
56	LZA_(A)C(m)(f)_ATSP	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	2 a 40	1410	9.22	0.05
57	LZA_C(f)_ATSP	Lomerío de zona alta	C(f)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	2 a 40	1410	28.86	0.14
58	PZA_(A)C(m)(f)_AH	Planicie de zona alta	(A)C(m)(f)	Asentamientos humanos	0 a 15	1270	546.54	2.69
59	VA_(A)C(m)_ATSP	Valle	(A)C(m)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	15 a >40	850	2.56	0.01
60	LZB_(A)C(m)(f)_APS	Lomerío de zona baja	(A)C(m)(f)	Cultivo de café a pleno sol	2 a 40	1000	10.74	0.05

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
61	VA_Aw1_VSArSBCDA	Valle	Aw1	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia-Densidad alta	15 a >40	850	211.52	1.04
62	SA_C(f)_VSABMMDB	Sierra	C(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad baja	15 a >40	1580	11.95	0.06
63	LZA_(A)C(m)(f)_AH	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Asentamientos humanos	2 a 40	1410	157.47	0.78
64	LZA_C(m)(f)_CAJ	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	Cuerpo de agua artificial (Jagüey)	2 a 40	1410	0.24	0.00
65	LZA_(A)C(fm)_AH	Lomerío de zona alta	(A)C(fm)	Asentamientos humanos	2 a 40	1410	5.42	0.03
66	SA_C(m)(f)_AM	Sierra	C(m)(f)	Área minera	15 a >40	1580	6.53	0.03
67	LZA_(A)C(fm)_VSArBMMDM	Lomerío de zona alta	(A)C(fm)	Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña- Densidad media	2 a 40	1410	3.75	0.02
68	SA_C(m)(f)_SAFC	Sierra	C(m)(f)	Sistema agroforestal de café	15 a >40	1580	30.06	0.15
69	PZB_Aw1_VSASBCDM	Planicie de zona baja	Aw1	Vegetación secundaria arbórea de selva baja	0 a 15	670	171.60	0.85

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
				caducifolia-Densidad media				
70	SA_(A)C(m)(f)_SAFC	Sierra	(A)C(m)(f)	Sistema agroforestal de café	15 a >40	1580	266.22	1.31
71	VA_Aw1_PC	Valle	Aw1	Pastizal cultivado	15 a >40	850	0.30	0.00
72	PZA_C(m)(f)_VSABMMDA	Planicie de zona alta	C(m)(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad alta	0 a 15	1270	37.96	0.19
73	LZA_(A)C(m)(f)_VSABMMDA	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad alta	2 a 40	1410	72.17	0.36
74	LZA_(A)C(fm)_PC	Lomerío de zona alta	(A)C(fm)	Pastizal cultivado	2 a 40	1410	95.66	0.47
75	VA_Aw2_SAFC	Valle	Aw2	Sistema agroforestal de café	15 a >40	850	27.24	0.13
76	VA_(A)C(m)(f)_PC	Valle	(A)C(m)(f)	Pastizal cultivado	15 a >40	850	4.77	0.02
77	SA_(A)C(m)(f)_ATSP	Sierra	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	15 a >40	1580	1.15	0.01

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
78	LZB_(A)C(m)(f)_AH	Lomerío de zona baja	(A)C(m)(f)	Asentamientos humanos	2 a 40	1000	188.84	0.93
79	LZA_C(m)(f)_AH	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	Asentamientos humanos	2 a 40	1410	5.14	0.03
80	CV_(A)C(m)(f)_SAFC	Cono volcánico	(A)C(m)(f)	Sistema agroforestal de café	15 a >40	1550	19.91	0.10
81	VA_Aw1_CAJ	Valle	Aw1	Cuerpo de agua artificial (Jagüey)	15 a >40	850	0.19	0.00
82	PZB_(A)C(w2)_SAFC	Planicie de zona baja	(A)C(w2)	Sistema agroforestal de café	0 a 15	670	423.82	2.09
83	SA_(A)C(m)(f)_AM	Sierra	(A)C(m)(f)	Área minera	15 a >40	1580	7.63	0.04
84	SA_(A)C(m)(f)_ATAP	Sierra	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal anual y permanente	15 a >40	1580	1.13	0.01
85	PZB_Aw1_VSASBCDB	Planicie de zona baja	Aw1	Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia-Densidad baja	0 a 15	670	8.37	0.04
86	VA_Aw1_VSASBCDB	Valle	Aw1	Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia-Densidad baja	15 a >40	850	6.45	0.03
87	CV_(A)C(m)(f)_PC	Cono volcánico	(A)C(m)(f)	Pastizal cultivado	15 a >40	1550	8.03	0.04

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
88	LZB_(A)C(w2)_SAFC	Lomerío de zona baja	(A)C(w2)	Sistema agroforestal de café	2 a 40	1000	163.48	0.81
89	PZB_(A)C(w2)_AH	Planicie de zona baja	(A)C(w2)	Asentamientos humanos	0 a 15	670	41.90	0.21
90	LZB_(A)C(m)(f)_ATP	Lomerío de zona baja	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal permanente	2 a 40	1000	127.92	0.63
91	LZB_(A)C(m)(f)_PC	Lomerío de zona baja	(A)C(m)(f)	Pastizal cultivado	2 a 40	1000	27.11	0.13
92	LZA_C(f)_VSABMMDA	Lomerío de zona alta	C(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad alta	2 a 40	1410	166.38	0.82
93	SA_C(f)_ATAP	Sierra	C(f)	Agricultura de temporal anual y permanente	15 a >40	1580	4.48	0.02
94	VA_Aw2_VSArSBCDA	Valle	Aw2	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia-Densidad alta	15 a >40	850	76.89	0.38
95	VA_Aw1_ATAS	Valle	Aw1	Agricultura de temporal anual y semipermanente	15 a >40	850	34.12	0.17
96	PZB_Aw2_CAJ	Planicie de zona baja	Aw2	Cuerpo de agua artificial (Jagüey)	0 a 15	670	1.85	0.01

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
97	SA_C(m)(f)_ATP	Sierra	C(m)(f)	Agricultura de temporal permanente	15 a >40	1580	13.67	0.07
98	LZA_(A)C(fm)_VSABMMDA	Lomerío de zona alta	(A)C(fm)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad alta	2 a 40	1410	188.46	0.93
99	LZB_(A)C(w2)_PC	Lomerío de zona baja	(A)C(w2)	Pastizal cultivado	2 a 40	1000	0.63	0.00
100	LZB_(A)C(m)_SAFC	Lomerío de zona baja	(A)C(m)	Sistema agroforestal de café	2 a 40	1000	259.45	1.28
101	SA_C(m)(f)_ATAP	Sierra	C(m)(f)	Agricultura de temporal anual y permanente	15 a >40	1580	527.42	2.60
102	PZA_(A)C(m)(f)_ATSP	Planicie de zona alta	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	0 a 15	1270	0.22	0.00
103	LZA_(A)C(m)(f)_SAFC	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Sistema agroforestal de café	2 a 40	1410	694.92	3.42
104	LZB_(A)C(m)(f)_BEDM	Lomerío de zona baja	(A)C(m)(f)	Bosque de encino- Densidad media	2 a 40	1000	6.27	0.03
105	LZA_(A)C(m)(f)_ATAS	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal anual y semipermanente	2 a 40	1410	3.69	0.02

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
106	PZA_(A)C(m)(f)_ESP	Planicie de zona alta	(A)C(m)(f)	Sistema agroforestal de café especializado	0 a 15	1270	7.77	0.04
107	LZB_(A)C(m)_ATSP	Lomerío de zona baja	(A)C(m)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	2 a 40	1000	21.55	0.11
108	LZA_(A)C(fm)_ATSP	Lomerío de zona alta	(A)C(fm)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	2 a 40	1410	110.01	0.54
109	PZA_(A)C(m)(f)_BMMDM	Planicie de zona alta	(A)C(m)(f)	Bosque mesófilo de montaña-Densidad media	0 a 15	1270	23.18	0.11
110	PZA_(A)C(m)(f)_ATS	Planicie de zona alta	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal semipermanente	0 a 15	1270	2.75	0.01
111	LZA_(A)C(fm)_VSABMMDM	Lomerío de zona alta	(A)C(fm)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad media	2 a 40	1410	174.22	0.86
112	PZB_Aw2_ATAS	Planicie de zona baja	Aw2	Agricultura de temporal anual y semipermanente	0 a 15	670	0.26	0.00
113	VA_Aw1_VSASBCDM	Valle	Aw1	Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia-Densidad media	15 a >40	850	186.90	0.92

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
114	LZB_(A)C(w2)_APS	Lomerío de zona baja	(A)C(w2)	Cultivo de café a pleno sol	2 a 40	1000	0.60	0.00
115	LZA_C(f)_VSABMMDM	Lomerío de zona alta	C(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad media	2 a 40	1410	286.47	1.41
116	SA_C(f)_VSABMMDM	Sierra	C(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad media	15 a >40	1580	18.90	0.09
117	LZA_C(m)(f)_BMMDA	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	Bosque mesófilo de montaña-Densidad alta	2 a 40	1410	9.45	0.05
118	LZA_C(f)_AH	Lomerío de zona alta	C(f)	Asentamientos humanos	2 a 40	1410	79.57	0.39
119	LZA_C(f)_SAFC	Lomerío de zona alta	C(f)	Sistema agroforestal de café	2 a 40	1410	10.11	0.05
120	LZA_C(m)(f)_BMMDM	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	Bosque mesófilo de montaña-Densidad media	2 a 40	1410	123.48	0.61
121	VA_(A)C(m)_SAFC	Valle	(A)C(m)	Sistema agroforestal de café	15 a >40	850	162.80	0.80

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
122	PZB_Aw2_VSArSBCDA	Planicie de zona baja	Aw2	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia-Densidad alta	0 a 15	670	33.61	0.17
123	PZA_C(m)(f)_VSABMMDM	Planicie de zona alta	C(m)(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad media	0 a 15	1270	49.25	0.24
124	LZA_C(m)(f)_ATSP	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	2 a 40	1410	1.72	0.01
125	PZA_C(m)(f)_SAFC	Planicie de zona alta	C(m)(f)	Sistema agroforestal de café	0 a 15	1270	0.43	0.00
126	SA_(A)C(m)(f)_BMMDM	Sierra	(A)C(m)(f)	Bosque mesófilo de montaña-Densidad media	15 a >40	1580	127.71	0.63
127	LZB_(A)C(m)(f)_SAFC	Lomerío de zona baja	(A)C(m)(f)	Sistema agroforestal de café	2 a 40	1000	4275.48	21.07
128	LZA_(A)C(m)(f)_BMMDA	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Bosque mesófilo de montaña-Densidad alta	2 a 40	1410	7.20	0.04
129	PZB_Aw1_ATS	Planicie de zona baja	Aw1	Agricultura de temporal semipermanente	0 a 15	670	10.08	0.05
130	VA_(A)C(m)_BEDM	Valle	(A)C(m)	Bosque de encino- Densidad media	15 a >40	850	27.25	0.13

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
131	VA_(A)C(m)(f)_ESP	Valle	(A)C(m)(f)	Sistema agroforestal de café especializado	15 a >40	850	10.06	0.05
132	SA_C(f)_PC	Sierra	C(f)	Pastizal cultivado	15 a >40	1580	10.94	0.05
133	LZA_(A)C(m)(f)_ESP	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Sistema agroforestal de café especializado	2 a 40	1410	96.87	0.48
134	LZA_C(f)_VSABMMDB	Lomerío de zona alta	C(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad baja	2 a 40	1410	3.02	0.01
135	PZB_Aw2_ATSP	Planicie de zona baja	Aw2	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	0 a 15	670	60.18	0.30
136	VA_(A)C(w2)_ATSP	Valle	(A)C(w2)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	15 a >40	850	3.00	0.01
137	LZA_(A)C(m)(f)_VSABMMDB	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad baja	2 a 40	1410	10.53	0.05
138	LZA_(A)C(fm)_ATP	Lomerío de zona alta	(A)C(fm)	Agricultura de temporal permanente	2 a 40	1410	1.76	0.01

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
139	PZA_(A)C(m)(f)_ATP	Planicie de zona alta	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal permanente	0 a 15	1270	36.31	0.18
140	VA_(A)C(m)(f)_ATP	Valle	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal permanente	15 a >40	850	3.81	0.02
141	PZA_(A)C(m)(f)_SAFC	Planicie de zona alta	(A)C(m)(f)	Sistema agroforestal de café	0 a 15	1270	140.93	0.69
142	SA_C(m)(f)_ATAS	Sierra	C(m)(f)	Agricultura de temporal anual y semipermanente	15 a >40	1580	0.42	0.00
143	LZA_C(m)(f)_PC	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	Pastizal cultivado	2 a 40	1410	265.48	1.31
144	PZB_Aw1_CAJ	Planicie de zona baja	Aw1	Cuerpo de agua artificial (Jagüey)	0 a 15	670	2.28	0.01
145	PZA_(A)C(m)(f)_VSABMMDA	Planicie de zona alta	(A)C(m)(f)	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña- Densidad alta	0 a 15	1270	96.41	0.48
146	PZB_Aw2_SAFC	Planicie de zona baja	Aw2	Sistema agroforestal de café	0 a 15	670	11.65	0.06
147	CV_(A)C(m)(f)_ATAP	Cono volcánico	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal anual y permanente	15 a >40	1550	4.26	0.02
148	SA_(A)C(m)(f)_PC	Sierra	(A)C(m)(f)	Pastizal cultivado	15 a >40	1580	25.22	0.12

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
149	LZA_C(f)_ATAP	Lomerío de zona alta	C(f)	Agricultura de temporal anual y permanente	2 a 40	1410	499.90	2.46
150	SA_(A)C(m)(f)_ATS	Sierra	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal semipermanente	15 a >40	1580	0.83	0.00
151	LZA_(A)C(fm)_ESP	Lomerío de zona alta	(A)C(fm)	Sistema agroforestal de café especializado	2 a 40	1410	12.14	0.06
152	VA_(A)C(m)(f)_SAFC	Valle	(A)C(m)(f)	Sistema agroforestal de café	15 a >40	850	835.82	4.12
153	VA_(A)C(w2)_CAJ	Valle	(A)C(w2)	Cuerpo de agua artificial (Jagüey)	15 a >40	850	0.01	0.00
154	PZB_Aw1_ATA	Planicie de zona baja	Aw1	Agricultura de temporal anual y semipermanente	0 a 15	670	379.31	1.87
155	PZA_C(m)(f)_PC	Planicie de zona alta	C(m)(f)	Pastizal cultivado	0 a 15	1270	32.51	0.16
156	CV_C(f)_AH	Cono volcánico	C(f)	Asentamientos humanos	15 a >40	1550	4.16	0.02
157	LZA_C(m)(f)_ATAP	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	Agricultura de temporal anual y permanente	2 a 40	1410	388.16	1.91
158	PZB_(A)C(w2)_ATSP	Planicie de zona baja	(A)C(w2)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	0 a 15	670	129.24	0.64

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
159	PZB_(A)C(w2)_CAJ	Planicie de zona baja	(A)C(w2)	Cuerpo de agua artificial (Jagüey)	0 a 15	670	7.87	0.04
160	PZA_C(m)(f)_AH	Planicie de zona alta	C(m)(f)	Asentamientos humanos	0 a 15	1270	0.02	0.00
161	VA_Aw1_VSASBCDA	Valle	Aw1	Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia-Densidad alta	15 a >40	850	14.63	0.07
162	LZA_(A)C(m)(f)_ATS	Lomerío de zona alta	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal semipermanente	2 a 40	1410	24.87	0.12
163	VA_(A)C(w2)_APS	Valle	(A)C(w2)	Cultivo de café a pleno sol	15 a >40	850	0.20	0.00
164	PZB_Aw1_VSArSBCDA	Planicie de zona baja	Aw1	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia-Densidad alta	0 a 15	670	57.20	0.28
165	LZB_(A)C(w2)_ATSP	Lomerío de zona baja	(A)C(w2)	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	2 a 40	1000	36.15	0.18
166	LZA_C(m)(f)_ATAS	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	Agricultura de temporal anual y semipermanente	2 a 40	1410	6.84	0.03
167	VA_(A)C(w2)_VSArSBCDA	Valle	(A)C(w2)	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia-Densidad alta	15 a >40	850	18.69	0.09

No.	Clave	Topoforma	Clima	Uso del suelo o vegetación	Pendiente (%)	Altitud (msnm)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
168	PZA_(A)C(m)(f)_ATAP	Planicie de zona alta	(A)C(m)(f)	Agricultura de temporal anual y permanente Vegetación secundaria	0 a 15	1270	69.12	0.34
169	LZA_C(f)_VSArBMMDM	Lomerío de zona alta	C(f)	arbustiva de bosque mesófilo de montaña- Densidad media	2 a 40	1410	89.77	0.44
170	LZB_(A)C(m)_ATP	Lomerío de zona baja	(A)C(m)	Agricultura de temporal permanente	2 a 40	1000	22.23	0.11
171	CV_(A)C(m)(f)_AH	Cono volcánico	(A)C(m)(f)	Asentamientos humanos Vegetación secundaria	15 a >40	1550	0.91	0.00
172	LZA_C(m)(f)_VSArBMMDM	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	arbustiva de bosque mesófilo de montaña- Densidad media	2 a 40	1410	0.41	0.00
173	LZA_C(m)(f)_AM	Lomerío de zona alta	C(m)(f)	Área minera	2 a 40	1410	1.24	0.01
Total							20,290.90	100.00

Fuente: Elaboración propia con información

Apéndice 6. Especies perennes multipropósito presentes en los sistemas agroforestales de café evaluados.

Nombre Común	Nombre científico	Familia	F.C.	Usos potenciales										E.C.	OR
				ASOM y M.O.	MD	CM	CO	FO	ME	OR	AMB	OT			
Grevilea	<i>Grevillea robusta</i> A. Cunn. ex R.Br.	<i>Proteaceae</i>	árbol	X	X	X					X			-	IN
Chalahuite, vainillo, jinicuil	<i>Inga vera</i> Willd.	<i>Fabaceae</i>	árbol	X		X	X		X			X		LC	NA
Laurel	<i>Nectandra mollis</i> (Kunth) Nees	<i>Lauraceae</i>	árbol	X		X			X					LC	NA
Higuerilla	<i>Ricinus communis</i> L.	<i>Euphorbiaceae</i>	arbusto	X					X				X	-	IN
Ixpepe	<i>Trema micranthum</i> (L.) Blume	<i>Cannabaceae</i>	árbol	X			X	X						LC	NA
Palma camedor	<i>Chamaedorea elegans</i> Mart.	<i>Arecaceae</i>	palma	X			X			X			X	-	NA
Tepejilote	<i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm.	<i>Arecaceae</i>	palma	X					X	X				LC	NA
Cedro rojo, cedro	<i>Cedrela odorata</i> L.	<i>Meliaceae</i>	árbol	X	X	X			X	X	X			VU, Pr y Apéndice II	NA
Plátano	<i>Musa × paradisiaca</i> L.	<i>Musaceae</i>	herbácea	X			X							-	IN
Guarumbo	<i>Cecropia peltata</i> L.	<i>Urticaceae</i>	árbol	X	X	X	X		X					LC	NA

Nombre Común	Nombre científico	Familia	F.C.	Usos potenciales										E.C.	OR
				ASOM y M.O.	MD	CM	CO	FO	ME	OR	AMB	OT			
Axiotillo	<i>Vismia baccifera</i> (L.) Triana & Planch.	<i>Hypericaceae</i>	arbusto	X	X	X				X				LC	NA
Pistache	<i>Pistacia mexicana</i> Kunth	<i>Anacardiaceae</i>	árbol	X	X	X	X							NT	NA
Roble	<i>Quercus spp.</i>	<i>Fagaceae</i>	árbol	X	X	X						X		-	NA
Peinecillo	<i>Aphananthe monoica</i> (Hemsl.) J.-F.Leroy	<i>Cannabaceae</i>	árbol	X	X	X								LC	NA
Tesmole-Encino	<i>Quercus oleoides</i> Schltdl. & Cham.	<i>Fagaceae</i>	árbol	X	X	X			X			X		NT	NA
Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i> King	<i>Meliaceae</i>	árbol	X	X								X	EN, Apéndice II	NA
Algodoncillo	<i>Robinsonella mirandae</i> Gómez Pompa	<i>Malvaceae</i>	árbol	X	X							X		EN	EN
Mango durazno	<i>Mangifera indica</i> L.	<i>Anacardiaceae</i>	árbol	X	X		X	X	X					-	IN
Naranja	<i>Citrus x sinensis</i> (L.) Osbeck	<i>Rutaceae</i>	árbol	X	X	X	X		X	X		X		-	IN
Naranja malta	<i>Citrus x aurantio</i> F. aurantium	<i>Rutaceae</i>	árbol	X	X	X	X		X	X				-	IN
Chalahuite	<i>Inga spp.</i>	<i>Fabaceae</i>	árbol	X		X	X		X			X		LC	NA
Chinine	<i>Persea schiedeana</i> Nees	<i>Lauraceae</i>	árbol	X	X	X	X			X				EN	NA

Nombre Común	Nombre científico	Familia	F.C.	Usos potenciales										E.C.	OR
				ASOM y M.O.	MD	CM	CO	FO	ME	OR	AMB	OT			
Franboyán	<i>Delonix regia</i> (Bojer ex Hook.) Raf.	<i>Fabaceae</i>	árbol	X				X		X		X	LC	IN	
Cedro nogal	<i>Juglans pyriformis</i> Liebm.	<i>Juglandáceas</i>	árbol	X	X	X						X	NT	NA	
Aguacate	<i>Persea americana</i> Mill.	<i>Lauraceae</i>	árbol	X		X	X						LC	NA	
Cacao silvestre	<i>Virola guatemalensis</i> (Hemsl.) Warb.	<i>Myristicaceae</i>	árbol	X	X							X	LC	NA	
Encino	<i>Quercus xalapensis</i> Bonpl.	<i>Fagaceae</i>	árbol	X	X	X						X	LC	EN	
Macadamia	<i>Macadamia integrifolia</i> Maiden & Betcher	<i>Proteaceae</i>	árbol	X	X		X			X		X	-	IN	

F.C. = Forma de crecimiento. Usos potenciales: SOM y M.O = Aporte de sombra y materia orgánica, MD = Maderable, CM = Combustible, CO = Comestible, FO = Forraje, ME = Medicinal, OR = Ornamental, AMB = Ambiental (reforestación, restauración), OT = Otros. E.C. = Estado de conservación, de acuerdo con UICN LC = Preocupación menor, VU = Vulnerable, NT = Casi amenazado, EN = En peligro, de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010 Pr = Sujeta a protección especial (Pr) y de acuerdo con CITES Apéndice II. OR = Origen, IN = Introducida, NA = Nativa, EN = Endémica.

Apéndice 7. Encuesta semiestructurada basada en los modos de vida sostenibles de las familias cafetaleras.



DIAGNÓSTICO DE REDES SOCIOECOLÓGICAS

Nombre del encuestador: _____

Fecha: _____

I. Datos generales del entrevistado:

Nombre (s)	Apellido paterno	Apellido materno	Edad	Género
Localidad	Municipio	Estado	Organización perteneciente	

EJE NATURAL

1. ¿Tiene algún sistema de almacenamiento de agua para su uso en la parcela?

a) Si

b) No

especifique de que tipo: _____

2. ¿Cómo considera la productividad del suelo de su parcela es?

1. Mala

3. Buena

2. Regular

4. Excelente

3. ¿Cómo es el suelo en cuestiones de productividad en la actualidad a comparación de hace 10 años?

a) Más productivo

b) Menos productivo

4. ¿Dentro o cerca de su parcela hay bosque o selva natural?

a) Si

b) No

5. ¿Cuáles son los animales más comunes que habitan en su parcela?

EJE PRODUCTIVO

1. Superficie total cultivada con café: _____ ha

2. Densidad de plantas de café por hectárea: _____ plantas/ha

3. Tipo de mano de obra que utiliza:

a) familiar

b) jornales

4. Tipo de tenencia: a) Ejidal b) Pequeña c) Propiedad d) Comunal e) Rentada

5. ¿Complementa los ingresos de la venta de café con otras actividades económicas? Ej. Ganadería, otros cultivos, remesas, comercio, trabajo asalariado, apoyos del gobierno, otros.

6. ¿Con qué hace las limpiezas en su parcela?: a) Azadón b) Machete c) Podadora d) Herbicida

7. ¿Cuántas veces limpia por año?: a) 1 vez b) 2 veces c) más de 3

8. ¿Quién realiza la limpia? a) jornalero b) productor, ¿Cuántos jornales ocupa para la limpia por hectárea? _____ jornales/ha, ¿Costo del jornal? _____, meses en que realiza la limpia _____

9. ¿Aplica fertilizante sintético?: Sí No, tipo de fertilizante: _____
cantidad: _____ kg/ha/año, costo anual: _____

10. ¿Utiliza abono orgánico?: Si No, tipo de abono: _____
cantidad: _____ kg/ha/año, costo anual: _____

11. ¿Quién realiza la fertilización y/o el abonado? a) jornalero b) productor, costo del jornal _____ meses en que fertiliza y/o abona: _____

12. ¿Cuáles plagas y enfermedades se presentan? (Mencionar de mayor a menor importancia)

Plaga o enfermedad	Tipo de control	Meses de incidencia	Costo/jornal	Frecuencia (veces/año)	Costo total/Ha

13. ¿Qué tipo de podas realiza? _____

¿Quién realiza la poda? a) jornalero b) productor, costo del jornal: _____
meses en que fertiliza y/o abona: _____

14. ¿Realiza renovación de su cafetal? Sí No, ¿Quién la realiza? a) jornalero b) productor, costo del jornal: _____ meses en que realiza la renovación: _____

15. ¿De dónde adquiere la planta de café para la renovación?

a) Vivero propio b) Compra la planta c) Vivero de la organización d) Programa de gobierno

16. ¿Realiza podas o renovación de las especies de sombra en su cafetal? a) Sí b) No

17. ¿De dónde adquiere la planta de las especies de sombra para la renovación?

a) Vivero propio b) Compra la planta c) Vivero de la organización d) Programa de gobierno

18. Costos de otros insumos, actividades o herramientas al año

Concepto o actividad	Cantidad	Frecuencia	Costo/ha

19. ¿Cuáles son los meses de cosecha? _____

20. ¿Realiza chapeo antes de cosechar? Sí No, ¿cuántos jornales ocupa? _____

21. ¿Cuál es la producción y el precio del café en los últimos 3 ciclos?

Ciclo	Rendimiento (toneladas / ha)	Precio de Venta
2021 – 2022		\$
2022 – 2023		\$
2023 – 2024		\$

22. ¿Cuál es el costo por transportar su café al centro de acopio? _____
23. ¿Cuántos cortes de café realiza por ciclo? _____
24. ¿Cuenta con vehículo propio para transportar el café? _____
25. ¿Transporta a sus trabajadores al cafetal? Sí No, ¿Cuál es el costo? _____
26. ¿Cómo vende su café? a) Cereza b) Pergamino c) Verde/Oro d) Tostado
27. Si llega a beneficiar su café, ¿dónde realiza el beneficiado?
a) Casa b) Parcela c) Organización d) Otro: _____
28. ¿Ha realizado la evaluación de calidad de su café? a) Sí, puntaje: _____ b) No
29. ¿Cuál es el precio de venta de otros productos obtenidos en la parcela?

Productos (madera, frutas, ornato, etc.)	Precio de venta

EJE HUMANO

1. Rellenar el siguiente cuadro según los datos familiares que se indican:

Integrantes de la familia que apoyan en la producción cafetalera (Señalar parentesco)	Edad	Escolaridad (grado de estudios máximo)	Actividad que desempeña sobre el cafetal

2. ¿Usted tiene acceso a servicios de salud dentro de la comunidad? a) Si b) No, ¿De qué tipo? (IMSS, ISSSTE, Seguro popular, etc.) _____

3. Mencione las enfermedades más recurrentes en su familia:

4. ¿Los medicamentos son de fácil acceso en la comunidad?

a) Si b) No

5. ¿Ha llevado capacitaciones sobre técnicas de producción de café?

a) Si b) No

6. ¿Sobre qué temas fueron las capacitaciones?

EJE SOCIAL

1. ¿Con cuáles organizaciones o cooperativas de producción usted ha colaborado?

2. ¿Considera que existen conflictos entre los integrantes de su comunidad? Sí No

3. ¿Quiénes le compran su café?

a) El coyote

b) La
organización a la
que pertenece

c) Nestlé, AMSA

d) Otro

Si su respuesta es “otro” especificar cuál es esta: _____

4. ¿Cómo conoció a las personas que le compran su café?

5. ¿Le gustaría seguir manteniendo la producción de café en su parcela?

CUANTIFICACIÓN DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CAFETALEROS EN RELACIÓN CON LAS PRÁCTICAS DE MANEJO

Apéndice 8. Correlaciones del carbono con las prácticas de manejo.

Variable 1	Variable 2	ρ de Spearman	Prob > ρ	Gráfico
Correlación: carbono total con prácticas de manejo				
CTot	Abono	0.5385	0.0384*	-1 -0.5 0 0.5 1
CTot	Chapoleo	-0.5735	0.0254*	
CTot	Control de plagas	-0.1856	0.5079	
CTot	Densidad de café	-0.1544	0.5827	
CTot	Densidad de EPM	0.6110	0.0155*	
CTot	Fertilizante	-0.6547	0.0081*	
CTot	No. Spp	0.2249	0.4203	
CTot	Poda de café	-0.4243	0.1149	
CTot	Poda mantenimiento	-0.4539	0.0892	
CTot	Poda de renovación	-0.5984	0.0184*	
CTot	Renovación café	.	.	
Correlación: carbono de especies de sombra con prácticas de manejo				
CPer	Chapoleo	-0.1645	0.6498	-1 -0.5 0 0.5
CPer	Fertilizante	-0.8253	0.0033*	
CPer	Abono	0.4329	0.2115	
CPer	Poda de café	-0.4938	0.1469	
CPer	Poda mantenimiento	-0.2611	0.4662	
CPer	Poda de renovación	-0.0580	0.8735	
CPer	Renovación café	.	.	
CPer	Control de plagas	0.1741	0.6305	
CPer	Densidad de café	0.1277	0.7253	
CPer	Densidad de EPM	0.3333	0.3466	
CPer	No. Spp	-0.7470	0.013*	
Correlación: carbono de cafetos con prácticas de manejo				
Ccaf	Chapoleo	0.1842	0.5111	-0.5 0.0 0.5
Ccaf	Fertilizante	0.3415	0.2129	
Ccaf	Abono	0.1272	0.6515	
Ccaf	Poda de café	0.1931	0.4906	
Ccaf	Poda mantenimiento	0.3180	0.2480	
Ccaf	Poda de renovación	0.4256	0.1137	
Ccaf	Renovación café	.	.	
Ccaf	Control de plagas	0.0619	0.8265	
Ccaf	Densidad de café	-0.4079	0.1312	
Ccaf	Densidad de EPM	-0.0437	0.8772	
Ccaf	No. Spp	0.3130	0.2560	

Correlación: carbono de herbáceas con prácticas de manejo				
Cherb	Chapoleo	0.0086	0.9758	-1.0 -0.5 0.0 0.5 1.0
Cherb	Fertilizante	-0.1203	0.6693	
Cherb	Abono	0.5627	0.0290*	
Cherb	Poda de café	-0.0968	0.7315	
Cherb	Poda mantenimiento	-0.1139	0.6861	
Cherb	Poda de renovación	0.3161	0.2511	
Cherb	Renovación café	.	.	
Cherb	Control de plagas	-0.1242	0.6593	
Cherb	Densidad de café	-0.5225	0.0457*	
Cherb	Densidad de EPM	0.3668	0.1787	
Cherb	No. Spp	0.4148	0.1242	
Correlación: carbono de hojarasca con prácticas de manejo				
Choj	Chapoleo	-0.4685	0.0781	-1.0 -0.5 0.0 0.5 1.0
Choj	Fertilizante	-0.7258	0.0022*	
Choj	Abono	0.3643	0.1819	
Choj	Poda de café	-0.7006	0.0036*	
Choj	Poda mantenimiento	-0.1374	0.6253	
Choj	Poda de renovación	0.3337	0.2242	
Choj	Renovación café	.	.	
Choj	Control de plagas	0.0000	1.0000	
Choj	Densidad de café	0.0389	0.8904	
Choj	Densidad de EPM	0.5542	0.0321*	
Choj	No. Spp	0.3340	0.2237	
Correlación: carbono orgánico del suelo con prácticas de manejo				
COS	Abono	0.1626	0.2858	0.0 0.5 1.0
COS	Chapoleo	0.5663	<0.0001*	
COS	Fertilizante	0.2668	0.0765	
COS	Podas	0.5663	<0.0001*	

Ctot = Carbono total, CPer = Carbono en especies perennes de sombra, Ccaf = Carbono en cafetos, Cherb = Carbono en herbáceas, Choj = Carbono en hojarasca, COS = Carbono orgánico del suelo, EPM = Especies perennes multipropósito. No. Spp = Número de especies (referente a la riqueza de especies). Valores con (*) representan valores significativos.