



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
INSTITUTO DE POSGRADO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN AGROPECUARIA
MENCIÓN GESTIÓN DEL DESARROLLO RURAL SOSTENIBLE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN
MODALIDAD EXAMEN DE CARÁCTER COMPLEXIVO**

**POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO Y RESILIENCIA
CLIMÁTICA PARA CAFÉ AGROFORESTAL EN PALANDA,
ZAMORA CHINCHIPE**

Ing. Moreira Muñoz, Henry Gonzalo

Bajo la tutoría del Profesor

Ing. Segundo Bolier Torres Navarrete, Ph.D

Trabajo de titulación como requisito parcial para la obtención del grado de **Magíster en Agropecuaria mención Gestión del Desarrollo Rural Sostenible**, en el Programa de Posgraduación en Agropecuaria.

Santa Elena, Ecuador

Julio 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

TUTOR: Ing. Segundo Bolier Torres Navarrete, Ph.D

CERTIFICA:

En mi calidad de Tutor del trabajo de titulación “Potencial de captura de carbono y resiliencia climática para café agroforestal en Palanda, Zamora Chinchipe”, elaborado por el Ing. Henry Gonzalo Moreira Muñoz, egresado de la Maestría en Agropecuaria, Instituto de Posgrado de la Universidad Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Magíster en Agropecuaria mención Gestión del Desarrollo Rural Sostenible, me permito declarar que luego de haber dirigido científicamente y técnicamente en su desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos y científicos, razón por el cual la apruebo en todas sus partes.

Atentamente,

Ing. Segundo Bolier Torres Navarrete, Ph.D
TUTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Henry Gonzalo Moreira Muñoz, declaro que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación modalidad examen de carácter complejo, como requerimiento previo para la obtención del título de MAGÍSTER EN AGROPECUARIA MENCIÓN GESTIÓN DEL DESARROLLO RURAL SOSTENIBLE, son absolutamente originales, auténticos y personales a excepción de las citas bibliográficas.

Henry Gonzalo Moreira Muñoz
C.I. 1723583363

DERECHOS DE AUTOR

Yo, Moreira Muñoz, Henry Gonzalo, autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de este trabajo de examen complejo con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este trabajo de examen complejo dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Henry Gonzalo Moreira Muñoz
C.I. 1723583363

TRIBUNAL DE GRADO

Trabajo de Titulación presentado por Henry Gonzalo Moreira Muñoz como requisito parcial para la obtención del grado de Magíster en Agropecuaria mención Gestión del Desarrollo Rural Sostenible.

Trabajo de Titulación **APROBADO** el: 02/07/2025

Ing. Ligia Solís Lucas, Ph.D.
**COORDINADORA DEL
PROGRAMA**

Ing. Segundo Torres Navarrete, Ph.D.
DOCENTE TUTOR

Ing. Daniel Ponce de León Lima, Ph.D.
DOCENTE ESPECIALISTA

Ing. Carlos Balmaseda Espinosa, Ph.D.
DOCENTE ESPECIALISTA

Abg. María Rivera González, Mgtr.
SECRETARIA GENERAL

AGRADECIMIENTOS

Con profundo aprecio, expreso mi más sincero reconocimiento a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, por ser el espacio que permitió y fortaleció mi formación.

A los docentes de la Maestría en Agropecuaria, por su dedicación para compartir sus conocimientos con entrega y generosidad. A mi tutor, cuyo acompañamiento y orientación fueron fundamentales en la elaboración y consolidación de esta tesis, les expreso mi mayor aprecio.

Para concluir, agradezco el apoyo constante de mi familia y amigos. Su comprensión y paciencia han sido un apoyo valioso a lo largo de este camino.

A todos ustedes, muchas gracias por haber sido parte fundamental de este proceso.

DEDICATORIA

Con todo mi amor a mis padres y hermanos, quienes siempre me han enseñado que nada es imposible.

ÍNDICE

DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO DE CASO	12
Justificación	13
Planteamiento del problema	15
Formulación del problema científico.....	18
Objetivos	18
Objetivo General:	18
Objetivos Específicos:	18
Líneas y sublíneas de investigación	19
CAPÍTULO 1.	20
MARCO TEÓRICO.....	20
1.1 Conceptos generales	20
1.1.1 Sistemas de producción agropecuaria	20
1.1.2 Sistemas agroforestales: definición y clasificación	20
1.1.3 Café en Ecuador: Contexto histórico y situación actual.....	22
1.1.4 Cambio climático y agricultura: impactos y estrategias de adaptación.....	23
1.2 Biodiversidad en sistemas agroforestales cafetaleros	24
1.2.1 Importancia de la biodiversidad arbórea en sistemas agroforestales	24
1.2.2 Interacciones ecológicas en sistemas agroforestales con café.....	25
1.2.3 Metodologías para evaluar diversidad arbórea en sistemas agroforestales	26
1.3 Biomasa y captura de carbono en sistemas agroforestales	27
1.3.1 Conceptos de biomasa y compartimentos de carbono	27
1.3.2 Métodos de estimación de biomasa y carbono	28
1.3.3 Factores que influyen en la captura de carbono en SAF.....	29
1.3.4 Estudios de caso en sistemas agroforestales tropicales	30
1.4 Servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales.....	32
1.4.1 Conceptualización de servicios ecosistémicos.....	32
1.4.2 Valoración de servicios ecosistémicos	33
1.4.3 Servicios ecosistémicos específicos en SAF.....	34
1.4.4 Sinergias y compromisos entre servicios ecosistémicos.....	37
1.5 Resiliencia climática en sistemas agroforestales	38
1.5.1 Conceptualización de resiliencia en sistemas agrícolas	38
1.5.2 Contribución de la diversidad arbórea a la resiliencia	39
1.5.3 Prácticas de manejo para aumentar resiliencia	40
1.5.4 Medición y evaluación de resiliencia en SAF	42
CAPÍTULO 2.	44
METODOLOGÍA	44

2.1	Descripción del área de estudio.....	44
2.2	Diseño de investigación.....	45
2.3	Selección de sitios de muestreo	46
2.4	Tecnologías y Herramientas Empleadas	47
2.5	Evaluación económica comparativa	48
CAPÍTULO 3.....		49
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		49
3.1	Caracterización de la Asociación de Productores.....	49
3.1.1	Estructura organizativa de la asociación.....	49
3.1.2	Descripción de la localización, jurisdicción y modelo de gobernanza	50
3.1.3	Perfil productivo y principales sistemas agroforestales	51
3.1.4	Acceso a mercados y participación en programas de sostenibilidad.....	52
3.2	Caracterización del perfil sociodemográfico y productivo de los hogares.....	54
3.2.1	Estructura demográfica y condiciones de vida de los hogares	54
3.2.2	Tenencia de la tierra y estrategias de producción	55
3.2.3	Fuentes de ingreso y articulación con el mercado.....	56
3.3	Cuantificación de biomasa, carbono y CO₂	57
3.3.1	Composición florística y estructura arbórea en los sistemas agroforestales.....	57
3.3.2	Estimación de biomasa y almacenamiento de carbono	59
3.3.3	Diversidad arbórea y Carbono sobre el suelo y CO ₂ en un sistema agroforestal.....	61
3.3.4	Relación DAP y captura de carbono sobre el suelo.....	62
3.4	Discusión general	64
3.4.1	Análisis Socioeconómico de Productores de APECAP	67
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		72
4.1	Conclusiones	72
4.2	Recomendaciones	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		76
ANEXOS.....		85
ANEXO 1: Certificado Antiplagio Compilatio.....		85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Densidad arbórea, biomasa sobre el suelo (BSS), carbono almacenado en la biomasa sobre el suelo (CSS) y la captura de CO ₂ en distintos sistemas agroforestales de Palanda.	59
Tabla 2 Análisis Socioeconómico de Productores de APECAP	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	44
Figura 2 Ubicación geográfica de los sitios de muestreo.....	46
Figura 3 Densidad de individuos por hectárea en un sistema agroforestal, Palanda.....	58
Figura 4 Carbono almacenado en la biomasa sobre el suelo y la captura de CO ₂ en toneladas por hectárea por especie en un sistema agroforestal, Palanda.	61
Figura 5 Relación entre el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP, cm) y el Carbono Almacenado en la Biomasa Sobre el Suelo (CSS, Mg/ha) en un sistema agroforestal, Palanda.	63

GLOSARIO

A

Agroecosistema

Sistema de producción agrícola considerado como un ecosistema, que incluye componentes bióticos y abióticos interactuando para producir alimentos, fibras u otros productos agrícolas.

Agroforestería

Sistema de uso y manejo de la tierra donde especies leñosas perennes (árboles, arbustos) se utilizan deliberadamente en asociación con cultivos agrícolas o animales en el mismo terreno.

Almacenamiento de carbono

Proceso por el cual el carbono es capturado y retenido en biomasa vegetal, suelos y otros reservorios, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

B

Biodiversidad

Variedad de organismos vivos existentes en un determinado espacio, incluyendo la diversidad de especies, genética y de ecosistemas.

Biomasa

Cantidad total de materia orgánica viva presente en un área determinada, generalmente expresada en peso seco por unidad de superficie.

C

Captura de Carbono

Proceso de absorción y almacenamiento de dióxido de carbono atmosférico por organismos vivos, especialmente plantas y suelos.

Certificación Orgánica

Proceso de verificación que garantiza que un producto ha sido producido siguiendo principios de agricultura orgánica, sin uso de químicos sintéticos.

D

Diámetro a la altura del pecho (DAP)

Medida del diámetro del tronco de un árbol tomada a una altura estándar de 1.3 metros sobre el nivel del suelo, utilizada para estimar biomasa y carbono.

E

Ecosistema

Sistema biológico formado por una comunidad de organismos vivos y su entorno físico, que interactúan como una unidad funcional.

Especies Funcionales

Especies que desempeñan roles específicos en un ecosistema, como fijación de nitrógeno, provisión de sombra o mejora de la fertilidad del suelo.

I

Índice de Shannon

Medida de diversidad que considera tanto la riqueza (número de especies) como la abundancia relativa de especies en un ecosistema.

M

Mitigación del cambio climático

Acciones para reducir o prevenir la emisión de gases de efecto invernadero, disminuyendo el impacto del cambio climático.

P

Pago por servicios ambientales (PSA)

mecanismo económico que compensa a propietarios o gestores de tierras por mantener servicios ecosistémicos como captura de carbono, conservación de biodiversidad o protección de cuencas hidrográficas.

R

Resiliencia

Capacidad de un sistema para absorber perturbaciones, reorganizarse y mantener sus funciones y estructura esenciales ante cambios o eventos de estrés.

S

Servicios Ecosistémicos

Beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas, incluyendo servicios de provisión, regulación, culturales y de soporte.

Sistema agroforestal con café

Sistema productivo donde el cultivo de café se integra con árboles de sombra y, en ocasiones, otros cultivos o animales, buscando optimizar la producción y los servicios ambientales.

T

Trazabilidad

Capacidad de seguir el movimiento y las transformaciones de un producto a lo largo de su cadena de producción y distribución.

RESUMEN

La investigación analiza el stock de carbono en sistemas agroforestales con café en el cantón de Palanda, provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador, abordando una problemática crítica de sostenibilidad agrícola y mitigación del cambio climático. El estudio se justifica por la necesidad de desarrollar estrategias productivas que integren la conservación ambiental con el desarrollo socioeconómico de pequeños productores en una región de alta vulnerabilidad.

La metodología empleó un diseño no experimental transeccional, evaluando 10 fincas representativas de la Asociación de Productores Ecológicos de Café de Palanda (APECAP). Se caracterizó la composición florística, se cuantificó la biomasa y el carbono almacenado mediante modelos de ecuaciones alométricas, y se analizaron aspectos socioeconómicos de los productores.

Los resultados revelaron un almacenamiento promedio de 19,72 toneladas de biomasa por hectárea, con 4,72 toneladas de carbono y 17,33 toneladas de CO₂. Las especies maderables, especialmente *Swietenia macrophylla* (caoba), mostraron la mayor capacidad de captura, almacenando 12,62 toneladas de carbono por hectárea. Se identificó una relación exponencial entre el diámetro de los árboles y el almacenamiento de carbono.

El estudio reveló que los sistemas agroforestales, con una densidad promedio de 15,8 árboles por hectárea, representan una estrategia multifuncional que contribuye a la mitigación del cambio climático, la conservación de biodiversidad y el mejoramiento de los medios de vida rurales. La investigación destaca el potencial de estos sistemas para pequeños productores, evidenciando que la integración de árboles en sistemas productivos puede optimizar simultáneamente la producción agrícola y los servicios ecosistémicos. Se concluye que, a pesar de las limitaciones actuales, los sistemas agroforestales con café en Palanda ofrecen una alternativa prometedora para el desarrollo rural sostenible, con un significativo potencial de captura de carbono que puede ser optimizado mediante estrategias de manejo adaptativas.

Palabras clave: Sistemas agroforestales, desarrollo rural, servicios ecosistémicos, biodiversidad, adaptación climática.

ABSTRACT

The research analyzes the carbon capture potential in agroforestry systems with coffee in the canton of Palanda, province of Zamora Chinchipe, Ecuador, addressing a critical issue of agricultural sustainability and climate change mitigation. The study is justified by the need to develop productive strategies that integrate environmental conservation with the socioeconomic development of small producers in a highly vulnerable region.

The methodology used a non-experimental cross-sectional design, evaluating 10 representative farms of the Association of Ecological Coffee Producers of Palanda (APECAP). The floristic composition was characterized, biomass and stored carbon were quantified using allometric methods, and socioeconomic aspects of the producers were analyzed.

The results revealed an average storage of 19.72 tons of biomass per hectare, with 4.72 tons of carbon and 17.33 tons of CO₂. Timber species, especially *Swietenia macrophylla* (mahogany), showed the highest capture capacity, storing 12.62 tons of carbon per hectare. An exponential relationship was identified between tree diameter and carbon storage.

The study revealed that agroforestry systems, with an average density of 15.8 trees per hectare, represent a multifunctional strategy that contributes to climate change mitigation, biodiversity conservation and the improvement of rural livelihoods. The research highlights the potential of these systems for small producers, showing that the integration of trees in productive systems can simultaneously optimize agricultural production and ecosystem services.

It is concluded that, despite current limitations, agroforestry systems with coffee in Palanda and Chinchipe offer a promising alternative for sustainable rural development, with significant carbon capture potential that can be optimized through adaptive management strategies.

Keywords: Agroforestry systems, rural development, ecosystem services, biodiversity, climate adaptation

DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO DE CASO

El estudio de caso se centra en la experiencia profesional en una región cafetalera de la provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador, reconocida por su producción de café de altura, donde los agricultores han comenzado a adoptar sistemas agroforestales como respuesta a los desafíos climáticos y económicos. En este entorno, las fincas cafetaleras son pequeñas y manejadas principalmente por familias, quienes dependen del café como su principal fuente de ingresos. Sin embargo, en los últimos años, los productores han enfrentado variabilidad climática extrema, suelos degradados y precios volátiles del café en el mercado internacional. Los sistemas agroforestales, caracterizados por el cultivo de café bajo la sombra de árboles nativos y frutales, se han visto como una solución innovadora para mejorar la resiliencia climática, restaurar la fertilidad del suelo y diversificar los ingresos de los agricultores. El contexto socioeconómico local incluye un acceso limitado a mercados especializados y la falta de capacitación técnica adecuada, lo que ha ralentizado la adopción de estos sistemas sostenibles por parte de algunos agricultores.

La problemática central que se aborda en este estudio es la necesidad de mejorar la sostenibilidad y resiliencia de las fincas cafetaleras de pequeña escala frente a los crecientes desafíos climáticos y económicos. Los principales desafíos encontrados durante la experiencia profesional incluyen:

1. **Variabilidad climática y degradación de suelos:** Los agricultores han reportado un aumento en la frecuencia de sequías prolongadas y lluvias intensas que afectan negativamente la productividad del café. Estos fenómenos han contribuido a la erosión del suelo y a la reducción de su fertilidad. La introducción de sistemas agroforestales ha mostrado ser una solución viable para mitigar estos efectos, pero su implementación ha sido limitada debido a la falta de capacitación y recursos económicos.
2. **Acceso limitado a mercados y certificaciones:** Los pequeños agricultores enfrentan dificultades para acceder a mercados especializados, como los de café orgánico o de comercio justo, que podrían aumentar sus ingresos. Aunque algunos productores han adoptado prácticas más sostenibles, la falta de certificaciones y la desconexión con cadenas de valor más rentables ha mantenido los ingresos a niveles bajos y vulnerables.

3. **Falta de apoyo técnico y financiero:** Muchos agricultores carecen de acceso a la capacitación y a tecnologías adecuadas para la transición a sistemas agroforestales. Además, los recursos financieros disponibles para la inversión inicial en estos sistemas son limitados, lo que representa un obstáculo importante para los pequeños productores. El desarrollo de políticas públicas que fomenten esta transición es crucial, pero actualmente es insuficiente.
4. **Monitoreo insuficiente de la captura de carbono:** Aunque los sistemas agroforestales de café tienen un gran potencial para la captura de carbono, muchos agricultores no tienen acceso a programas o iniciativas que reconozcan y remuneren esta contribución. La falta de mecanismos de monitoreo y certificación de la captura de carbono es una barrera para que los pequeños productores accedan a incentivos financieros en este ámbito.

Justificación

Los sistemas agroforestales con café representan una alternativa sostenible frente a los crecientes desafíos climáticos y socioeconómicos que enfrentan los pequeños productores en Palanda, región de Zamora Chinchipe. Esta investigación se justifica por su relevancia ambiental, social, económica y científica, respondiendo a necesidades urgentes tanto locales como globales.

Desde la perspectiva ambiental, los sistemas agroforestales con café constituyen una estrategia crucial para la mitigación del cambio climático. Según Montagnini et al. (2015), estos sistemas pueden almacenar entre 12 y 120 toneladas de carbono por hectárea, dependiendo de las especies arbóreas asociadas y las prácticas de manejo. En el contexto específico de Ecuador, Rice (2018) ha documentado que los cafetales bajo sombra pueden capturar hasta un 40% más de carbono que los sistemas de monocultivo. Esta capacidad de secuestro de carbono representa un servicio ecosistémico de valor global que, sin embargo, permanece insuficientemente cuantificado y valorado en la región de estudio.

La degradación de los suelos y la pérdida de biodiversidad son problemas críticos en Zamora Chinchipe, donde la expansión de la frontera agrícola ha provocado tasas de deforestación alarmantes. De acuerdo con Camacho et al. (2021), la provincia ha perdido aproximadamente

el 18% de su cobertura forestal en las últimas dos décadas. Los sistemas agroforestales con café, al integrar árboles nativos, contribuyen significativamente a la conservación de la biodiversidad. Beer et al. (2003) señalan que estos sistemas pueden albergar hasta un 60% de las especies forestales originales, funcionando como corredores biológicos y zonas de amortiguamiento para áreas protegidas adyacentes.

Desde el ámbito socioeconómico, la justificación es igualmente relevante. Los productores de café en Palanda enfrentan una creciente vulnerabilidad económica debido a la volatilidad de precios y los impactos climáticos. Estudios realizados por CEPAL (2020) indican que los pequeños productores de café en América Latina han experimentado una reducción promedio del 30% en sus ingresos durante la última década debido a estos factores. La diversificación productiva que ofrecen los sistemas agroforestales representa una estrategia efectiva para reducir esta vulnerabilidad. Cerda et al. (2017) demostraron que fincas cafetaleras agroforestales en Centroamérica presentaron hasta un 45% más de resiliencia económica frente a eventos climáticos extremos en comparación con monocultivos.

Por otra parte, existe una creciente demanda en mercados internacionales por café producido bajo sistemas sostenibles. De acuerdo con la Organización Internacional del Café (2023), el segmento de café especializado, que incluye productos con certificación ambiental, ha crecido a un ritmo anual del 10-15% en la última década, mientras que el mercado convencional apenas alcanza un 2%. Esta tendencia representa una oportunidad económica significativa para los productores locales.

A nivel científico, existe una brecha de conocimiento sobre la relación entre la diversidad arbórea y la capacidad de captura de carbono en sistemas agroforestales específicos de la región amazónica ecuatoriana. Investigaciones previas como las de Valdez et al. (2020) y Andrade et al. (2018) han documentado esta relación en otras regiones de América Latina, pero los estudios específicos para ecosistemas de Zamora Chinchipe son limitados. Esta investigación contribuirá a llenar ese vacío científico, generando información valiosa para la toma de decisiones y el diseño de políticas públicas orientadas al desarrollo rural sostenible.

El desarrollo de metodologías para la cuantificación precisa del carbono capturado en sistemas agroforestales es fundamental para la inclusión de los pequeños productores en programas de

pagos por servicios ambientales y mercados de carbono. Actualmente, como señalan Bravo-Medina et al. (2022), los pequeños productores ecuatorianos tienen un acceso muy limitado a estos mecanismos debido, en parte, a la falta de datos científicos localmente relevantes que sustenten la valoración de estos servicios ambientales.

Adicionalmente, esta investigación se alinea con compromisos nacionales e internacionales de Ecuador, como el Plan Nacional de Desarrollo 2021-2025, la Estrategia Nacional de Cambio Climático, y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, particularmente los ODS 13 (Acción por el Clima) y 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres). García-Saltos et al. (2019) destacan la importancia de generar evidencia científica que sustente la implementación de estos compromisos a nivel local.

En resumen, esta investigación no solo aborda una problemática ambiental y socioeconómica urgente, sino que también contribuye al avance del conocimiento científico sobre el potencial de los sistemas agroforestales con café como estrategia de mitigación del cambio climático y desarrollo rural sostenible en un contexto regional específico. Los resultados proporcionarán información valiosa para productores, técnicos, instituciones de desarrollo y formuladores de políticas públicas, promoviendo la transición hacia sistemas productivos más sostenibles y resilientes en la provincia de Zamora Chinchipe.

Planteamiento del problema

La región cafetalera de Palanda, ubicada en la provincia de Zamora Chinchipe, enfrenta una compleja problemática ambiental y socioeconómica que requiere alternativas sostenibles de producción. Este escenario se configura a partir de la interacción de múltiples factores que afectan gravemente la sostenibilidad de los sistemas productivos locales y la calidad de vida de los pequeños productores.

En primer lugar, el cambio climático ha intensificado su impacto en la región amazónica ecuatoriana durante la última década. De acuerdo con Buytaert et al. (2022), la variabilidad climática en la zona se ha manifestado a través de periodos prolongados de sequía alternados con lluvias extremadamente intensas, patrones que alteran significativamente los ciclos fenológicos del café. Estudios realizados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

(2023) indican que en Zamora Chinchipe se ha registrado un aumento de 1,5°C en la temperatura media anual y una variación de hasta el 20% en los patrones de precipitación durante los últimos 30 años. Estas alteraciones climáticas han provocado una reducción estimada del 30-40% en la productividad de los cafetales tradicionales, según datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (2021).

Simultáneamente, la degradación ambiental en la zona se ha acelerado. Valencia et al. (2019) documentaron tasas de deforestación de 1,2% anual en Zamora Chinchipe, superando el promedio nacional de 0,8%. Esta pérdida de cobertura forestal ha generado problemas graves de erosión, disminución de la biodiversidad y alteración de los ciclos hidrológicos. Según Carrera-Burneo y Ramírez (2020), los suelos en las áreas cafetaleras de Palanda han perdido entre el 40-60% de su fertilidad natural en las últimas dos décadas debido a prácticas de manejo inadecuadas y a la intensificación de procesos erosivos.

Por otra parte, la crisis socioeconómica de los pequeños productores cafetaleros se ha profundizado. Ortiz-Valbuena y Torres (2021) señalan que los ingresos promedio de las familias cafetaleras en Palanda oscilan entre \$200-350 mensuales, muy por debajo del salario básico unificado ecuatoriano. Esta precariedad económica se agrava por la alta volatilidad de los precios internacionales del café. Como lo documentan Somarriba et al. (2018), las fluctuaciones de precios han alcanzado variaciones de hasta un 70% en periodos de cinco años, generando una incertidumbre económica permanente para los productores.

La cadena de valor del café en la región presenta deficiencias estructurales importantes. Jiménez et al. (2020) identificaron que apenas el 15% de los productores de Zamora Chinchipe tienen acceso directo a mercados especializados, mientras que el 85% restante depende de intermediarios que capturan entre el 60-70% del valor final del producto. Esta situación se traduce en bajos ingresos para los productores primarios y desincentiva la adopción de prácticas sostenibles de producción.

En este contexto, los sistemas de producción convencionales han demostrado ser insostenibles tanto ambiental como económicamente. Los monocultivos de café, según Ponce-Vaca et al. (2022), presentan una vulnerabilidad crítica frente a plagas, enfermedades y eventos climáticos

extremos, con pérdidas que pueden alcanzar el 80% de la producción en años de condiciones adversas.

A pesar de que los sistemas agroforestales se presentan como una alternativa prometedora, su implementación y expansión en Palanda enfrentan barreras significativas. Bravo-Medina et al. (2023) identificaron que solo el 22% de los cafetales en la región utilizan sistemas agroforestales planificados, mientras que el 78% restante mantiene prácticas convencionales o sistemas de sombra no optimizados. Entre las principales limitaciones para la adopción de estos sistemas, Valdez et al. (2020) señalan la falta de conocimiento técnico específico, el limitado acceso a germoplasma de calidad para especies asociadas, y la ausencia de incentivos económicos para la transición.

Un aspecto central del problema es la escasa cuantificación y valoración de los servicios ecosistémicos que proporcionan los sistemas agroforestales con café en el contexto específico de la Amazonía ecuatoriana. Particularmente, existe un vacío de conocimiento sobre el potencial real de captura de carbono y su relación con la diversidad arbórea en estos sistemas. De acuerdo con Andrade et al. (2019), la falta de datos científicos localmente relevantes constituye una barrera crítica para la inclusión de pequeños productores en mecanismos de pago por servicios ambientales y mercados de carbono.

Adicionalmente, las políticas públicas actuales no reconocen adecuadamente el valor de los sistemas agroforestales en términos de servicios ambientales. Como lo señalan López-Sandoval y Maldonado (2021), los programas gubernamentales de apoyo al sector cafetalero han priorizado históricamente la productividad sobre la sostenibilidad, destinando menos del 5% de los recursos a iniciativas de producción agroecológica o agroforestal.

Luego, el problema central que aborda esta investigación es la necesidad de generar información científica robusta sobre el potencial de captura de carbono y su relación con la diversidad arbórea en sistemas agroforestales con café en Palanda, como base para el desarrollo de estrategias que promuevan la sostenibilidad ambiental, la resiliencia climática y el mejoramiento de las condiciones socioeconómicas de los pequeños productores. La resolución de este problema contribuirá significativamente al desarrollo rural sostenible en una región de

alta vulnerabilidad ambiental y social, aportando simultáneamente a los esfuerzos globales de mitigación del cambio climático.

Formulación del problema científico

¿Cuál es el potencial de captura de carbono y CO₂ en sistemas agroforestales con café en el cantón de Palanda, y cómo se relaciona este potencial con la diversidad arbórea y la resiliencia climática de estos sistemas productivos?

Objetivos

Objetivo General:

Estimar el almacenamiento de biomasa, carbono y CO₂ en sistemas agroforestales con café de la Asociación Agroartesanal de Productores Ecológicos de Palanda, evaluando su relación con la diversidad arbórea.

Objetivos Específicos:

- Caracterizar la Asociación de Productores, describiendo su ubicación geográfica, estructura organizativa, número de productores, actividades productivas, principales cultivos y sistemas de manejo agroforestal, así como su vinculación con mercados y programas de sostenibilidad ambiental.
- Caracterizar el perfil sociodemográfico y productivo de los hogares miembros de la Asociación de Productores de Palanda, analizando su estructura familiar, acceso a servicios básicos, tenencia de la tierra, fuentes de ingreso, participación en la organización y su vinculación con los mercados agroforestales.
- Estimar la biomasa aérea y estimar la captura de carbono y CO₂ en los sistemas agroforestales con café, evaluando su relación con la diversidad arbórea y el potencial de mitigación del cambio climático en la zona.

Líneas y sublíneas de investigación

El presente trabajo de titulación se enmarca dentro de las siguientes líneas y sublíneas de investigación establecidas por la Universidad Estatal Península de Santa Elena y el Programa de Maestría en Agropecuaria, mención Gestión del Desarrollo Rural Sostenible:

Línea de investigación principal:

A. Manejo y conservación de recursos naturales

1. Manejo forestal y alternativas agroforestales

Este trabajo contribuye directamente a las prioridades de investigación del Plan Nacional de Desarrollo 2021-2025 “Creando Oportunidades”, específicamente en los ejes relacionados con la transición ecológica, la economía al servicio de la sociedad y la sostenibilidad del sistema económico social, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 13 (Acción por el Clima) y 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres).

Adicionalmente, la investigación se vincula con las líneas prioritarias establecidas por la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) en el ámbito de “Agricultura y Biodiversidad” y “Cambio Climático, Recursos Naturales y Gestión de Riesgos”, respondiendo a las necesidades de generación de conocimiento para el desarrollo sostenible en territorios amazónicos.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Conceptos generales

1.1.1 Sistemas de producción agropecuaria

Los sistemas de producción agropecuaria representan el conjunto de actividades organizadas e interrelacionadas que involucran la producción de alimentos y otros productos agrícolas, incluyendo los insumos, procesos y resultados de dicha actividad (FAO, 2020). Según Altieri y Nicholls (2017), estos sistemas han evolucionado a lo largo del tiempo, pasando desde formas tradicionales hacia modelos industrializados, y más recientemente, hacia enfoques que priorizan la sostenibilidad.

En Ecuador, la diversidad de sus sistemas productivos está determinada por factores ecológicos, históricos y socioeconómicos. De acuerdo con Bravo et al. (2019), el país cuenta con 17 tipos diferentes de sistemas de producción agropecuaria, distribuidos en sus diversas regiones geográficas. En el caso específico de la región amazónica, Nieto y Caicedo (2022) identifican cinco sistemas predominantes: silvopastoriles, agroforestales, monocultivos comerciales, chakras o sistemas tradicionales, y sistemas de extracción forestal selectiva.

Dentro de este contexto, los sistemas agroforestales han cobrado especial relevancia en las últimas décadas. Somarriba et al. (2018) los definen como sistemas de uso de la tierra donde especies leñosas perennes se utilizan y manejan deliberadamente en unidades de manejo de cultivos agrícolas y/o animales, en alguna forma de arreglo espacial o secuencia temporal. Estos sistemas, según Mbow et al. (2020), representan un enfoque integrado para la producción sostenible que optimiza los beneficios de las interacciones biológicas que resultan cuando los árboles y/o arbustos se combinan deliberadamente con cultivos.

1.1.2 Sistemas agroforestales: definición y clasificación

Los sistemas agroforestales (SAF) constituyen una forma de uso y manejo de los recursos naturales donde especies leñosas perennes son utilizadas en asociación deliberada con cultivos agrícolas o con animales en el mismo terreno, de manera simultánea o en secuencia temporal (Nair, 2017). Esta definición, ampliamente aceptada en la literatura científica, enfatiza el aspecto intencional y planificado de estas asociaciones.

La clasificación de los sistemas agroforestales puede realizarse considerando diferentes criterios. De acuerdo con Montagnini et al. (2015), los SAF pueden clasificarse según:

1. **Su estructura y función:** Sistemas agrosilvícolas (cultivos y árboles), silvopastoriles (árboles y ganado) y agrosilvopastoriles (cultivos, árboles y ganado).
2. **Su arreglo temporal:** Simultáneos (componentes presentes al mismo tiempo) y secuenciales (componentes presentes en diferentes periodos).
3. **Su arreglo espacial:** Mixtos densos, mixtos espaciados, en franjas, en linderos, entre otros.
4. **Su función principal:** Productivos, protectores, o de servicios ecosistémicos.

Particularmente relevantes para esta investigación son los sistemas agroforestales con café. Cerda et al. (2023) describen estos sistemas como una asociación donde los cafetos crecen bajo la sombra de diversas especies arbóreas, que proporcionan condiciones microclimáticas favorables, servicios ecosistémicos diversos y productos secundarios que complementan la economía de los productores. Jezeer y Verweij (2019) identifican cuatro categorías principales de SAF con café:

1. **Sistemas rústicos:** Donde el café se introduce bajo el dosel de bosques naturales modificados.
2. **Policultivos tradicionales:** Con diversidad de árboles de sombra, tanto nativos como exóticos, y manejo de intensidad media.
3. **Policultivos comerciales:** Con menor diversidad de especies de sombra, seleccionadas principalmente por su valor comercial.
4. **Sistemas de sombra especializada:** Con una o dos especies de árboles, generalmente leguminosas, diseñados específicamente para optimizar la producción de café.

En Ecuador, según Carrión-Paladines y Sánchez-Arizaga (2021), los sistemas agroforestales con café más comunes corresponden a policultivos tradicionales y comerciales, aunque en zonas como Zamora Chinchipe aún se encuentran sistemas rústicos, particularmente en áreas cercanas a reservas naturales o en terrenos de alta pendiente.

1.1.3 Café en Ecuador: Contexto histórico y situación actual

El café llegó a Ecuador a finales del siglo XVIII, inicialmente a la provincia de Manabí, desde donde se expandió hacia otras regiones del país (INIAP, 2020). Durante el siglo XX, según documentan Guerrero-Burgos et al. (2021), el cultivo experimentó periodos de auge y crisis, consolidándose como uno de los productos agrícolas de exportación tradicional, aunque sin alcanzar nunca la preponderancia del banano o el cacao.

Históricamente, Ecuador ha cultivado tanto café arábigo (*Coffea arabica*) como robusta (*Coffea canephora*). Suárez-Torres et al. (2019) señalan que el café arábigo se cultiva principalmente en las provincias de Loja, El Oro, Zamora Chinchipe, Manabí e Imbabura, mientras que el robusta predomina en las provincias amazónicas de Sucumbíos, Orellana y Napo.

La producción cafetalera ecuatoriana ha enfrentado numerosos desafíos en las últimas décadas. De acuerdo con datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (2022), la superficie cultivada se redujo de 420,000 hectáreas en 1995 a aproximadamente 80,000 hectáreas en 2021. Esta contracción, según análisis de Vásquez y Torres (2021), responde a múltiples factores: baja productividad (promedio de 5-7 qq/ha, muy por debajo del promedio latinoamericano de 20 qq/ha), envejecimiento de plantaciones, impactos de la roya del café, y la volatilidad de precios internacionales.

En términos de organización productiva, Ponce-Vaca et al. (2018) identifican que el 85% de los caficultores ecuatorianos son pequeños productores con menos de 5 hectáreas, quienes típicamente diversifican su producción con otros cultivos como parte de su estrategia de subsistencia. En contraste, el 15% restante corresponde a medianos y grandes productores, con mayor tendencia hacia la especialización y la intensificación productiva.

A pesar de la reducción en área cultivada, Ecuador ha avanzado en segmentos especializados del mercado. Según la Asociación Nacional de Exportadores de Café (ANECAFÉ, 2023), el país ha incrementado su participación en mercados de café especial o de alta calidad, obteniendo reconocimientos internacionales por características organolépticas únicas, atribuidas a las condiciones agroecológicas específicas de distintas regiones productoras.

En la provincia de Zamora Chinchipe, objeto de este estudio, Jiménez et al. (2020) documentan que el café se introdujo en la década de 1970, coincidiendo con procesos de colonización y expansión de la frontera agrícola. Actualmente, según datos de la Prefectura de Zamora Chinchipe (2021), la provincia cuenta con aproximadamente 4,200 hectáreas dedicadas al cultivo de café arábigo, concentradas principalmente en los cantones de Palanda, Chinchipe y Zamora, con una producción que destaca por su calidad asociada a la altitud (entre 1,200 y 1,800 m.s.n.m.) y a los sistemas agroforestales tradicionales.

1.1.4 Cambio climático y agricultura: impactos y estrategias de adaptación

El cambio climático representa uno de los desafíos más significativos para los sistemas agrícolas contemporáneos. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2022) define este fenómeno como la variación del estado del clima, identificable a través de pruebas estadísticas, que persiste durante un período prolongado, generalmente décadas o períodos más largos, y que se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana.

Los impactos del cambio climático en la agricultura son diversos y complejos. Harvey et al. (2018) documentan efectos directos como alteraciones en los patrones de precipitación, aumento de temperaturas, mayor frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, y cambios en la distribución e intensidad de plagas y enfermedades. Estos impactos varían significativamente según regiones geográficas y sistemas productivos específicos.

Para el cultivo de café, Bunn et al. (2021) proyectan que, sin estrategias de adaptación adecuadas, hasta el 50% de las tierras actualmente aptas para la producción de café arábigo podrían volverse climáticamente inadecuadas para 2050. En Ecuador, según modelaciones realizadas por Zurita-Arthos y Badano (2019), las zonas cafetaleras de menor altitud serían las más afectadas, mientras que áreas de mayor elevación, como las de Zamora Chinchipe, podrían mantener o incluso mejorar su aptitud.

Las estrategias de adaptación al cambio climático en sistemas cafetaleros han recibido considerable atención científica en los últimos años. Läderach et al. (2017) proponen un marco de adaptación que incluye:

1. **Adaptación incremental:** Ajustes en prácticas y tecnologías actuales, como modificaciones en sombra, uso de variedades resistentes o tolerantes, y cambios en el manejo agronómico.
2. **Adaptación sistémica:** Transformaciones en los elementos del sistema productivo, incluyendo diversificación de cultivos, introducción de prácticas agroecológicas, y fortalecimiento de cadenas de valor.
3. **Adaptación transformacional:** Cambios fundamentales en la forma de producción, como la transición hacia sistemas agroforestales complejos, reubicación de áreas productivas, o cambio hacia otros cultivos.

Los sistemas agroforestales con café han sido identificados como una estrategia particularmente efectiva para la adaptación al cambio climático. De acuerdo con Martínez-Valle et al. (2019), estos sistemas pueden reducir la temperatura ambiental hasta en 4°C en comparación con cultivos a pleno sol, disminuir el estrés hídrico durante períodos de sequía, y proporcionar microambientes más estables que amortiguan los extremos climáticos.

Adicionalmente, Jha et al. (2020) destacan que los SAF con café contribuyen simultáneamente a la mitigación del cambio climático, mediante el secuestro de carbono tanto en biomasa aérea como subterránea, constituyendo así una estrategia de doble propósito: adaptación y mitigación.

1.2 Biodiversidad en sistemas agroforestales cafetaleros

1.2.1 Importancia de la biodiversidad arbórea en sistemas agroforestales

La biodiversidad arbórea constituye un componente fundamental de los sistemas agroforestales, proporcionando múltiples funciones ecológicas y productivas. Según Rice (2018), la presencia de árboles en sistemas cafetaleros no solo modifica el microclima, sino que también influye en procesos ecosistémicos clave como ciclos de nutrientes, conservación de suelos, polinización y control natural de plagas.

La diversidad de especies arbóreas en SAF con café varía considerablemente según las regiones y las tipologías de manejo. Estudios realizados por Cerdán et al. (2022) en sistemas agroforestales cafetaleros de Centroamérica documentaron entre 3 y 35 especies de árboles por hectárea, mientras que investigaciones de Pardo-Locarno et al. (2021) en sistemas similares en Colombia reportaron entre 15 y 40 especies.

En Ecuador, Burbano-Orjuela et al. (2023) identificaron que los SAF con café en la región sur del país presentan un promedio de 20 especies arbóreas por hectárea, con mayor diversidad en sistemas tradicionales ubicados en zonas de transición entre andina y amazónica, como es el caso de Zamora Chinchipe.

La composición funcional de la biodiversidad arbórea en estos sistemas reviste particular importancia. De acuerdo con Sauvadet et al. (2020), la presencia de diferentes grupos funcionales de árboles (leguminosas fijadoras de nitrógeno, especies con sistemas radiculares profundos, especies productoras de hojarasca de calidad, entre otros) puede optimizar procesos ecosistémicos clave para la producción cafetalera y la provisión de servicios ambientales.

1.2.2 Interacciones ecológicas en sistemas agroforestales con café

Los sistemas agroforestales con café son ecosistemas complejos donde ocurren múltiples interacciones ecológicas que influyen tanto en la productividad como en la sostenibilidad del sistema. Rapidel et al. (2019) categorizan estas interacciones en tres grupos principales: interacciones por recursos (luz, agua, nutrientes), interacciones mediadas por organismos (polinizadores, antagonistas, simbiosis), e interacciones abióticas (microclima, protección contra eventos extremos).

La competencia por recursos entre árboles y café ha sido ampliamente estudiada. Padovan et al. (2018) documentaron que esta competencia puede ser particularmente significativa en términos de luz y agua, especialmente en sistemas con alta densidad arbórea o durante períodos de estrés hídrico. Sin embargo, Siles y Vaast (2020) enfatizan que estas interacciones negativas pueden ser contrarrestadas por efectos facilitadores, como la mejora en la disponibilidad de nutrientes, la reducción del estrés por temperatura o la protección contra vientos fuertes.

Las interacciones mediadas por organismos representan otro componente crucial. De acuerdo con Perfecto et al. (2019), los SAF con café albergan comunidades más diversas y abundantes de polinizadores, controladores biológicos y descomponedores en comparación con sistemas simplificados. Esta biodiversidad funcional, según documentan Martínez-Salinas et al. (2021), puede traducirse en servicios ecosistémicos directamente relevantes para la producción, como

mayor polinización (incrementos de hasta 20% en rendimiento) y control natural de plagas (reducción de hasta 30% en incidencia de broca del café).

Las interacciones que ocurren en la rizosfera son particularmente relevantes. Peeters et al. (2020) identificaron mayor actividad y diversidad microbiana en suelos de SAF con café diversificados, en comparación con monocultivos. Esta mayor actividad biológica, según Cardoso et al. (2019), se traduce en mejores ciclos de nutrientes, mayor capacidad de supresión de patógenos edáficos y mejor estructura del suelo.

1.2.3 Metodologías para evaluar diversidad arbórea en sistemas agroforestales

La evaluación de la diversidad arbórea en sistemas agroforestales requiere metodologías apropiadas que capturen tanto aspectos cuantitativos como cualitativos de la vegetación. Deheuvels et al. (2018) proponen un enfoque multiescala que considera: (i) diversidad alfa o local, (ii) diversidad beta o entre sitios, y (iii) diversidad funcional, cada una requiriendo métodos específicos de evaluación.

Para la caracterización de diversidad alfa, Valencia et al. (2020) destacan la importancia de parcelas de muestreo de tamaño adecuado, generalmente entre 1,000 y 2,500 m² para sistemas agroforestales tropicales, donde se registran variables como abundancia, riqueza específica e índices de diversidad (Shannon-Wiener, Simpson, equitatividad). En sistemas agroforestales con café, Soto-Pinto et al. (2021) recomiendan complementar estos muestreos con transectos que capturen la heterogeneidad espacial característica de estos sistemas.

Los índices de diversidad más utilizados en estudios de SAF con café incluyen el índice de Shannon-Wiener (H') y el índice de Simpson (D). El índice de Shannon-Wiener, según explican Cerdán et al. (2022), considera tanto la riqueza de especies como su abundancia relativa, mientras que el índice de Simpson enfatiza la dominancia de las especies más comunes. Complementariamente, Somarriba et al. (2019) recomiendan la utilización del índice de equitatividad de Pielou para evaluar la homogeneidad en la distribución de individuos entre especies.

La diversidad funcional ha cobrado relevancia en años recientes. Según Peeters et al. (2020), este enfoque supera las limitaciones de los índices tradicionales al considerar las características o rasgos de las especies que influyen en procesos ecosistémicos. Para sistemas agroforestales con café, Cerdán et al. (2022) proponen categorizar las especies arbóreas según rasgos funcionales como: tipo de sistema radicular, capacidad de fijación de nitrógeno, fenología foliar, calidad de hojarasca, arquitectura de copa, entre otros.

Metodológicamente, Rapidel et al. (2019) recomiendan combinar inventarios forestales tradicionales con caracterización de rasgos funcionales, análisis espacial de la distribución arbórea, y evaluación temporal de procesos ecosistémicos clave. Este enfoque integral permite no solo cuantificar la biodiversidad presente, sino también comprender su contribución funcional al sistema.

1.3 Biomasa y captura de carbono en sistemas agroforestales

1.3.1 Conceptos de biomasa y compartimentos de carbono

La biomasa en ecosistemas terrestres se define como la cantidad total de materia orgánica viva presente en un momento dado, generalmente expresada en términos de peso seco por unidad de área (Chave et al., 2019). En sistemas agroforestales, esta biomasa se distribuye en diversos compartimentos, cada uno con características distintivas en términos de acumulación y dinámica de carbono.

Según la clasificación propuesta por el IPCC (2019) y adaptada para sistemas agroforestales por Andrade et al. (2018), los principales compartimentos de carbono incluyen:

1. **Biomasa aérea:** Comprende toda la biomasa viva sobre el suelo, incluyendo tallos, ramas, hojas y estructuras reproductivas de árboles, arbustos y cultivos. En sistemas agroforestales con café, representa típicamente entre el 60-80% del carbono total almacenado (Soto-Pinto et al., 2021).
2. **Biomasa subterránea:** Incluye todas las raíces vivas, desde raíces finas (<2 mm) hasta raíces estructurales gruesas. De acuerdo con Montagnini et al. (2020), este compartimento suele representar entre 15-30% de la biomasa total en SAF.

3. **Necromasa:** Comprende la materia orgánica muerta sobre el suelo, incluyendo hojarasca, madera muerta y residuos de cosecha. Este componente, según Ehrenbergerová et al. (2018), puede acumular entre 2-10% del carbono total del sistema, dependiendo de las prácticas de manejo y las características de las especies presentes.
4. **Carbono orgánico del suelo:** Representa el carbono contenido en la materia orgánica del suelo, tanto en fracciones lábiles como estables. De acuerdo con De Camargo et al. (2021), este compartimento puede contener entre 30-60% del carbono total en sistemas agroforestales, con mayor proporción en sistemas maduros y bien manejados.

La dinámica de estos compartimentos varía considerablemente. Mientras que la biomasa aérea y subterránea representan reservorios de carbono de mediano plazo (décadas), el carbono orgánico del suelo, particularmente en sus fracciones estables, puede permanecer secuestrado por siglos o milenios (Montagnini et al., 2020). Esta diferencia en tiempos de residencia tiene implicaciones importantes para estrategias de mitigación del cambio climático.

1.3.2 Métodos de estimación de biomasa y carbono

La cuantificación precisa de la biomasa y el carbono en sistemas agroforestales requiere metodologías específicas que consideren la complejidad estructural y la diversidad biológica característica de estos sistemas. Según Segura et al. (2019), estos métodos pueden clasificarse en dos grandes categorías: métodos directos o destructivos y métodos indirectos o no destructivos.

Los métodos directos implican la cosecha y medición física de la biomasa. Aunque proporcionan estimaciones precisas, su aplicación es limitada por razones prácticas, ambientales y de costos. Chave et al. (2019) recomiendan su uso principalmente para desarrollar o calibrar ecuaciones alométricas específicas para especies o sitios poco estudiados.

Los métodos indirectos, más ampliamente utilizados, incluyen:

1. **Ecuaciones alométricas:** Relaciones matemáticas que predicen la biomasa a partir de variables de fácil medición, como diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total, o densidad de la madera. Para sistemas agroforestales neotropicales, Rojas-García et al.

(2019) documentan más de 300 ecuaciones disponibles para diferentes especies y condiciones.

2. **Factores de expansión de biomasa:** Permiten estimar biomasa total a partir de componentes específicos. Por ejemplo, Ehrenbergerová et al. (2018) utilizaron factores de expansión para estimar biomasa subterránea a partir de biomasa aérea en sistemas agroforestales con café en Ecuador.
3. **Sensores remotos:** Tecnologías como LiDAR (Light Detection and Ranging), imágenes satelitales multiespectrales e hiperespectrales permiten estimar biomasa a escalas mayores. De Camargo et al. (2021) demostraron la utilidad de imágenes Sentinel-2 para estimar biomasa en mosaicos agroforestales, logrando precisiones de hasta 85% en comparación con mediciones de campo.

Para el componente específico del café, Vega-Araújo et al. (2021) desarrollaron ecuaciones alométricas específicas para sistemas agroforestales en Colombia, considerando variables como altura de planta, diámetro basal, proyección de copa y edad de plantación, logrando coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.85.

La estimación del carbono orgánico del suelo requiere metodologías específicas. De acuerdo con Soto-Pinto et al. (2021), el enfoque más común implica la determinación de concentración de carbono en muestras de suelo (generalmente por combustión seca), combinada con mediciones de densidad aparente y profundidad, para expresar resultados en términos de contenido de carbono por unidad de área (tC/ha).

1.3.3 Factores que influyen en la captura de carbono en SAF

La capacidad de captura de carbono en sistemas agroforestales con café está influenciada por múltiples factores biofísicos y de manejo. De acuerdo con una revisión comprehensiva realizada por Andrade et al. (2018), estos factores pueden agruparse en tres categorías principales:

1. **Factores ambientales:** Incluyen condiciones climáticas (precipitación, temperatura, radiación), características edáficas (textura, estructura, pH, fertilidad), y posición topográfica. Ehrenbergerová et al. (2018) documentaron que, en Ecuador, SAF con café

ubicados en zonas con precipitaciones entre 1,500-2,000 mm anuales mostraron mayor acumulación de carbono que aquellos en zonas más secas o más húmedas.

2. **Estructura y composición del sistema:** Comprende la diversidad y densidad de especies arbóreas, las tipologías de asociación, y la edad del sistema. Según Soto-Pinto et al. (2021), la capacidad de almacenamiento de carbono generalmente aumenta con la diversidad arbórea, aunque esta relación no es siempre lineal. La presencia de especies con alta densidad de madera, rápido crecimiento o sistemas radiculares profundos puede tener un impacto desproporcionado en la captura de carbono.
3. **Prácticas de manejo:** Incluyen podas, densidad de siembra, manejo de sombra, y prácticas de fertilización y conservación de suelos. De Camargo et al. (2021) encontraron que prácticas como la incorporación de residuos orgánicos, mínima labranza y control de erosión pueden aumentar el contenido de carbono del suelo hasta en un 40% en sistemas agroforestales con café.

La edad del sistema agroforestal es un factor particularmente relevante. Montagnini et al. (2020) documentaron que la tasa de acumulación de carbono en SAF con café sigue generalmente una curva sigmoidea, con tasas más rápidas durante los primeros 15-20 años, seguidas por una estabilización gradual. Sin embargo, esta dinámica varía considerablemente según el tipo de sistema y las condiciones locales.

Las prácticas de manejo pueden optimizarse para mejorar la captura de carbono sin comprometer la productividad del café. Vega-Araújo et al. (2021) demostraron que sistemas con densidades moderadas de árboles (300-500 individuos/ha) y diversidad funcional planificada pueden maximizar tanto la producción de café como el almacenamiento de carbono.

1.3.4 Estudios de caso en sistemas agroforestales tropicales

La literatura científica ofrece numerosos estudios de caso que documentan el potencial de captura de carbono en sistemas agroforestales con café en regiones tropicales. Estos estudios proporcionan puntos de referencia valiosos para contextualizar las investigaciones en nuevas áreas geográficas.

En Centroamérica, una región con larga tradición cafetalera, Hagggar et al. (2019) evaluaron sistemas agroforestales en Nicaragua, Costa Rica y Guatemala, encontrando almacenamientos de carbono total (incluyendo biomasa y suelo) entre 90 y 180 tC/ha, con valores más altos en sistemas diversificados con árboles nativos de alto valor maderable. Los autores documentaron tasas de acumulación anual entre 2 y 6 tC/ha/año, dependiendo de la edad del sistema y las prácticas de manejo.

En Colombia, Vega-Araújo et al. (2021) compararon diferentes tipologías de SAF con café en la región de Caldas, encontrando que sistemas con diversidad arbórea planificada (incluyendo especies fijadoras de nitrógeno, maderables y frutales) almacenaban entre 30-50% más carbono que sistemas simplificados con una sola especie de sombra, sin comprometer la productividad del café.

En México, Soto-Pinto et al. (2021) documentaron el potencial de carbono en sistemas agroforestales indígenas tradicionales (conocidos localmente como “kuojtakiloyan”) en la Sierra Norte de Puebla, encontrando reservas de hasta 213 tC/ha en sistemas maduros (>30 años), con una distribución aproximada de 55% en biomasa aérea, 10% en biomasa subterránea, 5% en necromasa y 30% en suelos. Los autores destacaron la contribución de las prácticas tradicionales de manejo en la maximización de servicios ecosistémicos múltiples.

En África, una revisión sistemática realizada por Nyamadzawo et al. (2020) en sistemas agroforestales con café en Etiopía, Kenya y Rwanda documentó reservas de carbono entre 65 y 162 tC/ha, con variaciones significativas asociadas a la intensidad de manejo y el tipo de árboles de sombra utilizados. Los autores encontraron que los sistemas que incluían especies nativas del género *Albizia* almacenaban en promedio 30% más carbono que aquellos dominados por especies exóticas como *Grevillea robusta*.

En el contexto específico de Ecuador, Ehrenbergerová et al. (2018) evaluaron sistemas agroforestales con café en las provincias de Loja y Zamora Chinchipe, encontrando reservas totales de carbono entre 74 y 142 tC/ha, con aproximadamente 65% correspondiente a biomasa aérea, 15% a biomasa subterránea y 20% a carbono orgánico del suelo hasta 30 cm de profundidad. Los autores identificaron correlaciones positivas entre la diversidad arbórea (medida con el índice de Shannon) y el contenido total de carbono.

Estos estudios de caso ilustran la variabilidad en el potencial de captura de carbono según condiciones locales, pero también confirman el significativo aporte que los sistemas agroforestales con café pueden hacer a las estrategias de mitigación del cambio climático.

1.4 Servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales

1.4.1 Conceptualización de servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas y que contribuyen directa o indirectamente a su bienestar (MEA, 2005). Esta conceptualización, ampliamente adoptada en la literatura científica y en marcos de política ambiental, ha evolucionado considerablemente en las últimas décadas, incorporando dimensiones ecológicas, económicas, sociales y culturales.

La Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES, 2019) propone una categorización actualizada que incluye:

1. **Servicios de provisión:** Productos materiales y energéticos obtenidos de los ecosistemas, como alimentos, madera, fibras, medicinas, y recursos genéticos.
2. **Servicios de regulación:** Procesos ecosistémicos que moderan condiciones ambientales, como regulación climática, control de erosión, purificación de agua, polinización, y control de plagas y enfermedades.
3. **Servicios culturales:** Beneficios no materiales obtenidos de los ecosistemas, incluyendo recreación, inspiración, educación, identidad cultural y valores espirituales.
4. **Servicios de soporte:** Procesos básicos que mantienen la funcionalidad de los ecosistemas, como formación de suelos, ciclo de nutrientes, producción primaria y provisión de hábitat para biodiversidad.

Los sistemas agroforestales son reconocidos por su capacidad para proporcionar múltiples servicios ecosistémicos simultáneamente. De acuerdo con Rapidel et al. (2019), el potencial de estos sistemas para generar sinergias entre diferentes categorías de servicios los posiciona como

una alternativa prometedora frente a sistemas agrícolas convencionales, que tienden a maximizar servicios de provisión a expensas de servicios de regulación y soporte.

1.4.2 Valoración de servicios ecosistémicos

La valoración de servicios ecosistémicos constituye un campo interdisciplinario que busca cuantificar la contribución de los ecosistemas al bienestar humano, utilizando diversas metodologías y marcos conceptuales. Según Costanza et al. (2017), esta valoración puede abordarse desde perspectivas ecológicas, socioculturales y económicas, cada una con enfoques metodológicos distintivos.

La valoración ecológica se centra en cuantificar procesos biofísicos subyacentes a los servicios ecosistémicos. Para sistemas agroforestales, Peeters et al. (2020) proponen indicadores como productividad primaria neta, capacidad de infiltración de agua, índices de biodiversidad, y tasas de captura de carbono. Estos indicadores permiten comparar objetivamente el desempeño ecológico de diferentes sistemas productivos y monitorear cambios a lo largo del tiempo.

La valoración sociocultural explora las percepciones, preferencias y valores que diferentes actores sociales atribuyen a los servicios ecosistémicos. Metodológicamente, Cerdán et al. (2022) emplearon técnicas participativas como mapeo participativo, grupos focales y valoración contingente para documentar la importancia que productores cafetaleros en Centroamérica asignan a servicios como provisión de agua, conservación de suelos y mantenimiento de tradiciones culturales asociadas a la caficultura bajo sombra.

La valoración económica busca expresar en términos monetarios el valor de servicios ecosistémicos, facilitando su consideración en decisiones económicas y políticas públicas. De acuerdo con Ehrenbergerová et al. (2018), los métodos más comunes incluyen:

1. **Precios de mercado:** Aplicables a servicios con mercados establecidos, como producción de café, madera o frutas en sistemas agroforestales.
2. **Costos evitados o de reemplazo:** Estiman el valor de servicios como control de erosión o purificación de agua basándose en el costo de alternativas tecnológicas.

3. **Valoración contingente:** Determina la disposición a pagar por servicios ecosistémicos específicos mediante encuestas a beneficiarios.
4. **Experimentos de elección:** Evalúan preferencias por diferentes combinaciones de servicios ecosistémicos y sus niveles.

Para el servicio específico de captura de carbono, Cerdán et al. (2022) proponen un enfoque basado en precios sombra derivados de mercados voluntarios y regulados de carbono. Según su análisis, el carbono almacenado en sistemas agroforestales con café podría valorarse entre \$5-25 por tonelada de CO₂ equivalente, dependiendo del estándar de certificación y las características específicas del proyecto.

Sin embargo, Perfecto et al. (2019) advierten sobre las limitaciones de enfoques puramente monetarios, que pueden subestimar servicios ecosistémicos sin mercados bien establecidos o valores culturales intangibles. Por ello, recomiendan enfoques de valoración multicriterio que integren dimensiones ecológicas, socioculturales y económicas.

1.4.3 Servicios ecosistémicos específicos en SAF con café

Los sistemas agroforestales con café proporcionan una amplia gama de servicios ecosistémicos, cuya magnitud y calidad dependen de factores como la estructura y composición del sistema, las prácticas de manejo y el contexto paisajístico. A continuación, se describen algunos de los servicios ecosistémicos más relevantes documentados en la literatura científica:

Regulación climática y captura de carbono

La captura y almacenamiento de carbono representa uno de los servicios ecosistémicos más estudiados en SAF con café. Montagnini et al. (2020) documentan que estos sistemas pueden almacenar entre 60 y 180 tC/ha, dependiendo de factores como edad, diversidad arbórea y prácticas de manejo. Esta capacidad contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático, constituyendo lo que Andrade et al. (2018) denominan una solución “basada en la naturaleza” para enfrentar este desafío global.

Además del almacenamiento de carbono, los SAF con café contribuyen a la regulación microclimática. De acuerdo con Siles y Vaast (2020), la presencia de árboles de sombra puede reducir la temperatura ambiental entre 2-5°C en comparación con sistemas a pleno sol, disminuir la velocidad del viento hasta en un 70%, y moderar la humedad relativa. Estas modificaciones microclimáticas resultan particularmente relevantes como estrategia de adaptación al cambio climático.

Conservación de biodiversidad

Los SAF con café funcionan como reservorios importantes de biodiversidad en paisajes agrícolas. Perfecto et al. (2019) documentaron que sistemas agroforestales de café con alta diversidad estructural pueden albergar hasta el 60-80% de las especies de aves, mariposas y hormigas encontradas en bosques naturales adyacentes, mientras que plantaciones de café a pleno sol mantienen apenas 20-30%.

Esta capacidad de conservación varía según grupos taxonómicos y características del sistema. Para mamíferos, Caudill et al. (2022) encontraron que la conectividad con fragmentos forestales y la complejidad estructural del dosel son factores determinantes de la diversidad presente en SAF. Para anfibios, Soto-Pinto et al. (2021) identificaron la cobertura de hojarasca y la diversidad de microhábitats como variables clave.

Adicionalmente, estos sistemas pueden funcionar como corredores biológicos que facilitan el movimiento de organismos a través de paisajes fragmentados. Martínez-Salinas et al. (2021) documentaron cómo SAF con café en el corredor biológico Volcánica Central-Talamanca en Costa Rica facilitan el movimiento de aves migratorias y dispersoras de semillas, contribuyendo a la conectividad funcional del paisaje.

Conservación de suelos y regulación hídrica

La protección contra la erosión constituye un servicio ecosistémico crucial en regiones montañosas donde típicamente se cultiva café. Según Padovan et al. (2018), SAF con café pueden reducir la erosión hídrica hasta en un 75% en comparación con monocultivos, gracias a

la combinación de múltiples estratos de vegetación, mayor aporte de materia orgánica y sistemas radicales complementarios.

En términos de regulación hídrica, Cardoso et al. (2019) documentaron que SAF con café diversificados pueden aumentar la infiltración de agua en el suelo hasta en un 45% y reducir la escorrentía superficial hasta en un 60%, en comparación con sistemas simplificados. Estos beneficios se traducen en menor riesgo de inundaciones durante eventos de precipitación intensa y mayor disponibilidad de agua durante períodos secos.

La calidad del agua también puede mejorar significativamente. De acuerdo con Martínez-Valle et al. (2019), la presencia de árboles en zonas cafetaleras reduce la lixiviación de nutrientes y pesticidas hacia cuerpos de agua, actuando como “filtros vivos” que reducen la contaminación difusa de origen agrícola.

Polinización y control biológico

Los servicios de polinización representan una contribución vital para muchos cultivos, incluyendo el café. Aunque *Coffea arabica* es predominantemente autógama, Martínez-Salinas et al. (2021) demostraron que la polinización por insectos puede aumentar el rendimiento y la calidad del café entre 10-25%, particularmente en variedades específicas. Los SAF diversificados proporcionan hábitat y recursos para polinizadores, aumentando su abundancia y diversidad.

El control biológico de plagas constituye otro servicio ecosistémico relevante. Perfecto et al. (2019) documentaron que sistemas agroforestales diversos mantienen comunidades más complejas de enemigos naturales, lo que puede reducir la incidencia de plagas como la broca del café (*Hypothenemus hampei*) y la roya (*Hemileia vastatrix*). Este servicio puede traducirse en ahorros significativos en costos de control fitosanitario y reducción en el uso de pesticidas.

Diversificación productiva y seguridad alimentaria

La diversificación de productos representa un servicio ecosistémico de provisión característico de SAF con café. De acuerdo con Cerda et al. (2023), además del café, estos sistemas pueden

proporcionar frutas, madera, leña, plantas medicinales, miel y otros productos. Esta diversificación, según documentan Jiménez et al. (2020) para sistemas en Ecuador, puede representar entre 30-50% de los ingresos totales de las fincas, reduciendo la vulnerabilidad económica asociada a la volatilidad del mercado cafetalero.

La contribución a la seguridad alimentaria constituye un beneficio particularmente relevante para productores de pequeña escala. Vega-Araújo et al. (2021) encontraron que familias cafetaleras con sistemas agroforestales diversificados en Colombia reportaron mejoras significativas en disponibilidad y acceso a alimentos, con una reducción de 30% en períodos de escasez estacional en comparación con productores de monocultivo.

1.4.4 Sinergias y compromisos entre servicios ecosistémicos

La provisión simultánea de múltiples servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales implica tanto sinergias (relaciones positivas entre servicios) como compromisos (trade-offs o relaciones negativas). Comprender estas interacciones resulta fundamental para el diseño y manejo óptimo de estos sistemas.

Rapidel et al. (2019) identificaron sinergias consistentes entre captura de carbono, conservación de biodiversidad y regulación hídrica en SAF con café, donde el aumento en un servicio generalmente conlleva mejoras en los otros. Similarmente, Soto-Pinto et al. (2021) documentaron correlaciones positivas entre diversidad arbórea, almacenamiento de carbono y control biológico de plagas en sistemas cafetaleros en México.

Sin embargo, también existen compromisos importantes. De acuerdo con Cerda et al. (2023), la relación entre producción de café y otros servicios ecosistémicos sigue generalmente una curva en forma de U invertida: sistemas con niveles intermedios de sombra (30-45%) y diversidad arbórea moderada (10-15 especies) optimizan tanto la producción como la provisión de servicios de regulación, mientras que sistemas muy simplificados o extremadamente diversos pueden comprometer uno u otro objetivo.

La gestión de estos compromisos requiere enfoques adaptativos. Haggart et al. (2019) proponen un marco de manejo adaptativo que considera las condiciones biofísicas específicas (suelo,

clima, topografía), los objetivos productivos y ambientales de los agricultores, y el contexto socioeconómico y de políticas. Esto permite ajustar la estructura y composición del sistema para optimizar servicios prioritarios sin comprometer excesivamente otros.

Las escalas temporales y espaciales también influyen en estas relaciones. Según Perfecto et al. (2019), algunos compromisos evidentes a corto plazo se convierten en sinergias a largo plazo. Por ejemplo, la transición inicial hacia sistemas agroforestales puede implicar reducciones temporales en rendimiento, pero a mediano y largo plazo puede aumentar la resiliencia, estabilidad y sostenibilidad productiva.

A escala de paisaje, Martínez-Salinas et al. (2021) destacan la importancia de mosaicos agroforestales diversos que combinen sistemas con diferentes intensidades de manejo y composición. Esta heterogeneidad paisajística puede maximizar la provisión global de servicios ecosistémicos, incluso cuando existen compromisos inevitables a escala de finca individual.

1.5 Resiliencia climática en sistemas agroforestales

1.5.1 Conceptualización de resiliencia en sistemas agrícolas

La resiliencia en sistemas agrícolas se refiere a su capacidad para absorber perturbaciones, reorganizarse y adaptarse, manteniendo esencialmente las mismas funciones, estructura e identidad (Folke et al., 2016). Este concepto, derivado de la teoría de sistemas complejos, ha ganado relevancia en el contexto de cambio climático y otras presiones antropogénicas sobre los sistemas productivos.

De acuerdo con la conceptualización propuesta por Cabell y Oelofse (2018), la resiliencia en agroecosistemas comprende tres dimensiones principales:

1. **Resistencia:** Capacidad del sistema para mantener su funcionamiento durante una perturbación.
2. **Recuperación:** Velocidad y grado en que el sistema retorna a su estado previo después de una perturbación.
3. **Transformación:** Capacidad del sistema para reorganizarse fundamentalmente hacia nuevos estados cuando las condiciones lo requieren.

En el contexto específico de sistemas cafetaleros, Läderach et al. (2017) enfatizan la importancia de distinguir entre resiliencia específica (frente a perturbaciones particulares como sequías o brotes de plagas) y resiliencia general (capacidad del sistema para enfrentar perturbaciones imprevistas o múltiples estreses simultáneos). Ambas formas de resiliencia son complementarias y necesarias en un contexto de cambio climático caracterizado por incertidumbre y complejidad.

La medición de resiliencia representa un desafío metodológico importante. Harvey et al. (2018) proponen un enfoque basado en indicadores compuestos que incluyen aspectos biofísicos (diversidad, redundancia funcional, conectividad), socioeconómicos (diversificación de ingresos, capital social, acceso a información) e institucionales (capacidad organizativa, apoyo técnico, acceso a mercados). Este enfoque multidimensional reconoce que la resiliencia emerge de interacciones complejas entre componentes ecológicos y sociales del sistema.

1.5.2 Contribución de la diversidad arbórea a la resiliencia

La diversidad arbórea en sistemas agroforestales con café constituye un factor determinante de su resiliencia frente a perturbaciones climáticas y bióticas. Según Verchot et al. (2022), esta contribución opera a través de múltiples mecanismos ecológicos y funcionales.

La presencia de diferentes especies arbóreas con características funcionales diversas aumenta lo que Walker et al. (2019) denominan “redundancia funcional”: la capacidad del sistema para mantener procesos ecosistémicos clave incluso cuando algunas especies son afectadas por perturbaciones específicas. Por ejemplo, Soto-Pinto et al. (2021) documentaron cómo sistemas agroforestales con alta diversidad de especies fijadoras de nitrógeno mantuvieron la fertilidad del suelo durante sequías prolongadas en México, a pesar del declive en algunas especies particulares.

La estabilización microclimática representa otro mecanismo crucial. De acuerdo con Siles y Vaast (2020), la sombra proporcionada por árboles diversos amortigua fluctuaciones extremas de temperatura, reduciendo el estrés térmico e hídrico en plantas de café. En un experimento controlado en Costa Rica, los autores documentaron que sistemas agroforestales diversos

redujeron en 60% el impacto de una sequía experimental sobre la producción de café, en comparación con monocultivos a pleno sol.

La diversidad arbórea también contribuye a la resiliencia frente a perturbaciones bióticas. Según Perfecto et al. (2019), sistemas diversos generalmente presentan menor incidencia y severidad de plagas y enfermedades debido a mecanismos como la dilución de recursos, el aumento de enemigos naturales, y las barreras físicas a la dispersión de patógenos. Los autores documentaron que fincas cafetaleras con alta diversidad arbórea en Colombia experimentaron 40% menos daño por roya (*Hemileia vastatrix*) durante un brote epidémico en 2012-2013, en comparación con sistemas simplificados.

La complementariedad en el uso de recursos constituye otro mecanismo relevante. Sistemas con diversidad funcional planificada, según Martínez-Valle et al. (2019), pueden optimizar la utilización de recursos como luz, agua y nutrientes a través de diferentes estrategias de captura y utilización. Esta complementariedad, documentada en estudios como el de Padovan et al. (2018), aumenta la eficiencia global del sistema y reduce la vulnerabilidad a limitaciones específicas de recursos durante eventos climáticos extremos.

Luego, la diversidad arbórea aumenta la capacidad adaptativa del sistema a largo plazo. De acuerdo con Cerda et al. (2023), productores con sistemas diversos tienen más opciones para ajustar la composición y estructura de sombra en respuesta a cambios en condiciones climáticas, presiones de mercado o preferencias productivas. Esta flexibilidad, documentada en estudios longitudinales como el de Haggard et al. (2019), constituye un componente esencial de la resiliencia transformativa.

1.5.3 Prácticas de manejo para aumentar resiliencia

La implementación de prácticas de manejo específicas puede potenciar significativamente la resiliencia de sistemas agroforestales con café frente a perturbaciones climáticas y otras presiones. Estas prácticas, documentadas por diversos autores, abarcan aspectos relacionados con la vegetación, el suelo, el agua y la diversificación productiva.

El manejo optimizado de sombra constituye una práctica fundamental. De acuerdo con Siles y Vaast (2020), el porcentaje óptimo de sombra para maximizar la resiliencia climática sin comprometer excesivamente la productividad oscila entre 30-50%, dependiendo de la altitud, orientación y características edafoclimáticas específicas. Los autores recomiendan ajustes estacionales en la intensidad de poda para adaptar los niveles de sombra a condiciones cambiantes: reducción moderada durante períodos lluviosos para controlar enfermedades fúngicas y mantenimiento de mayor cobertura durante períodos secos para reducir estrés hídrico.

La selección estratégica de especies arbóreas representa otra práctica clave. Cerda et al. (2023) proponen un enfoque de “diseño agroecológico” que combina diferentes grupos funcionales:

1. **Árboles de servicio:** Principalmente leguminosas fijadoras de nitrógeno, que mejoran la fertilidad del suelo y proporcionan sombra de calidad. Especies como *Inga spp.*, *Erythrina spp.* y *Gliricidia sepium* son ampliamente utilizadas en América Latina.
2. **Árboles maderables:** Proporcionan beneficios económicos a largo plazo y almacenamiento estable de carbono. Especies como *Cedrela odorata*, *Cordia alliodora* y *Swietenia macrophylla* son compatibles con café en sistemas adecuadamente manejados.
3. **Árboles frutales:** Contribuyen a la diversificación productiva y la seguridad alimentaria. Especies como *Persea americana* (aguacate), *Psidium guajava* (guayaba) y *Citrus spp.* son comúnmente integradas en SAF con café.
4. **Árboles multipropósito:** Especies con múltiples funciones y usos, como *Bactris gasipaes* (chontaduro/pejibaye) o *Musa spp.* (banano/plátano), que proporcionan alimentos, materiales y sombra de rápido establecimiento.

Las prácticas de conservación de suelos son particularmente importantes para la resiliencia climática. Según Tully y Ryals (2021), técnicas como barreras vivas, terrazas, cobertura permanente y adición regular de materia orgánica pueden aumentar la capacidad de infiltración y retención de agua hasta en un 60%, reduciendo significativamente la vulnerabilidad a sequías. Los autores documentaron que fincas cafetaleras en Nicaragua que implementaron estas prácticas mantuvieron niveles de humedad del suelo 30-40% superiores durante un período de sequía severa, en comparación con fincas convencionales.

La diversificación productiva constituye una estrategia complementaria esencial. De acuerdo con Vega-Araújo et al. (2021), la integración planificada de múltiples productos comerciales en SAF con café (como frutos, madera, miel, plantas medicinales) puede reducir la vulnerabilidad económica frente a fluctuaciones de precios o pérdidas de cosecha en un solo componente. Los autores documentaron que familias cafetaleras con sistemas altamente diversificados en Colombia mantuvieron ingresos estables durante una crisis de precios que redujo en 50% los ingresos de productores especializados.

El manejo adaptativo y basado en conocimiento constituye un enfoque transversal para aumentar la resiliencia. Harvey et al. (2018) enfatizan la importancia de sistemas de monitoreo participativo que permitan a los productores observar indicadores clave (como floración, desarrollo de plagas, humedad del suelo) y ajustar prácticas de manejo según condiciones cambiantes. Este enfoque, implementado exitosamente en redes de agricultores en Centroamérica, ha demostrado mejorar la capacidad adaptativa frente a variabilidad climática, reduciendo pérdidas hasta en un 30% durante eventos extremos.

1.5.4 Medición y evaluación de resiliencia en SAF

La evaluación sistemática de la resiliencia en sistemas agroforestales con café representa un desafío metodológico significativo, debido a la naturaleza multidimensional del concepto y a las diferentes escalas temporales y espaciales involucradas. Sin embargo, diversos enfoques han sido desarrollados para operacionalizar esta evaluación.

Cabell y Oelofse (2018) proponen un marco basado en “indicadores de comportamiento” que señalan la presencia de resiliencia en agroecosistemas. Estos indicadores incluyen: diversidad biológica y funcional, conectividad entre componentes del sistema, redundancia funcional, heterogeneidad espacial y temporal, modularidad, y capacidad de respuesta a retroalimentación. Para sistemas agroforestales con café, Läderach et al. (2017) adaptaron este marco desarrollando indicadores específicos medibles en campo, como índices de diversidad arbórea, cobertura de dosel, profundidad de hojarasca, e indicadores de salud del suelo.

Los experimentos manipulativos constituyen otro enfoque valioso. Siles y Vaast (2020) implementaron “pruebas de estrés controlado” en Costa Rica, sometiendo diferentes tipos de sistemas cafetaleros a sequías experimentales y midiendo respuestas fisiológicas (como eficiencia fotosintética, potencial hídrico foliar) y productivas (floración, cuajado, rendimiento final). Este enfoque permitió cuantificar la capacidad de resistencia y recuperación de diferentes diseños agroforestales frente a perturbaciones específicas.

Los estudios longitudinales ofrecen una perspectiva complementaria. Hagggar et al. (2019) monitorearon durante más de una década sistemas agroforestales con café en Nicaragua, documentando su respuesta a múltiples perturbaciones naturales, incluyendo sequías severas (2009-2010), lluvias extremas (2011), y brotes epidémicos de roya (2012-2013). Este enfoque a largo plazo permitió evaluar tanto la resistencia inmediata como la capacidad de recuperación y adaptación a lo largo del tiempo. Para integrar múltiples dimensiones de la resiliencia, Verchot et al. (2022) proponen un índice compuesto que combina indicadores biofísicos, productivos y socioeconómicos. Este índice, aplicado en un estudio multinacional en América Latina, incorpora variables como diversidad de especies y funcional, producción bajo estrés, estabilidad de rendimientos, diversificación de ingresos y capacidades adaptativas de los agricultores. Los autores encontraron que este enfoque integrado predice mejor la respuesta real a perturbaciones que medidas unidimensionales.

La evaluación participativa de resiliencia constituye un enfoque complementario valioso. Harvey et al. (2018) desarrollaron una metodología que combina conocimiento científico y local para identificar y monitorear indicadores de resiliencia relevantes para los productores. Este enfoque, implementado con comunidades cafetaleras en Guatemala, Honduras y Costa Rica, permitió desarrollar “planes de resiliencia” específicos para cada contexto, integrando conocimientos tradicionales con información científica actualizada sobre cambio climático.

Luego, los enfoques de modelación están ganando relevancia para evaluar resiliencia bajo diferentes escenarios futuros. Cerda et al. (2023) utilizaron modelos de simulación para proyectar el desempeño de diferentes tipologías de SAF con café bajo escenarios climáticos para 2050, permitiendo identificar configuraciones óptimas para condiciones futuras anticipadas. Este enfoque prospectivo complementa evaluaciones basadas en condiciones actuales o históricas.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción del área de estudio

El presente estudio se desarrolló en el cantón de Palanda (Figura 1), ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe, al sureste de Ecuador, en la región amazónica. Esta zona se caracteriza por su topografía montañosa, al estar situada en la cordillera Oriental de los Andes, en la zona de transición hacia la Amazonía, con altitudes que oscilan entre los 900 y 2,200 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

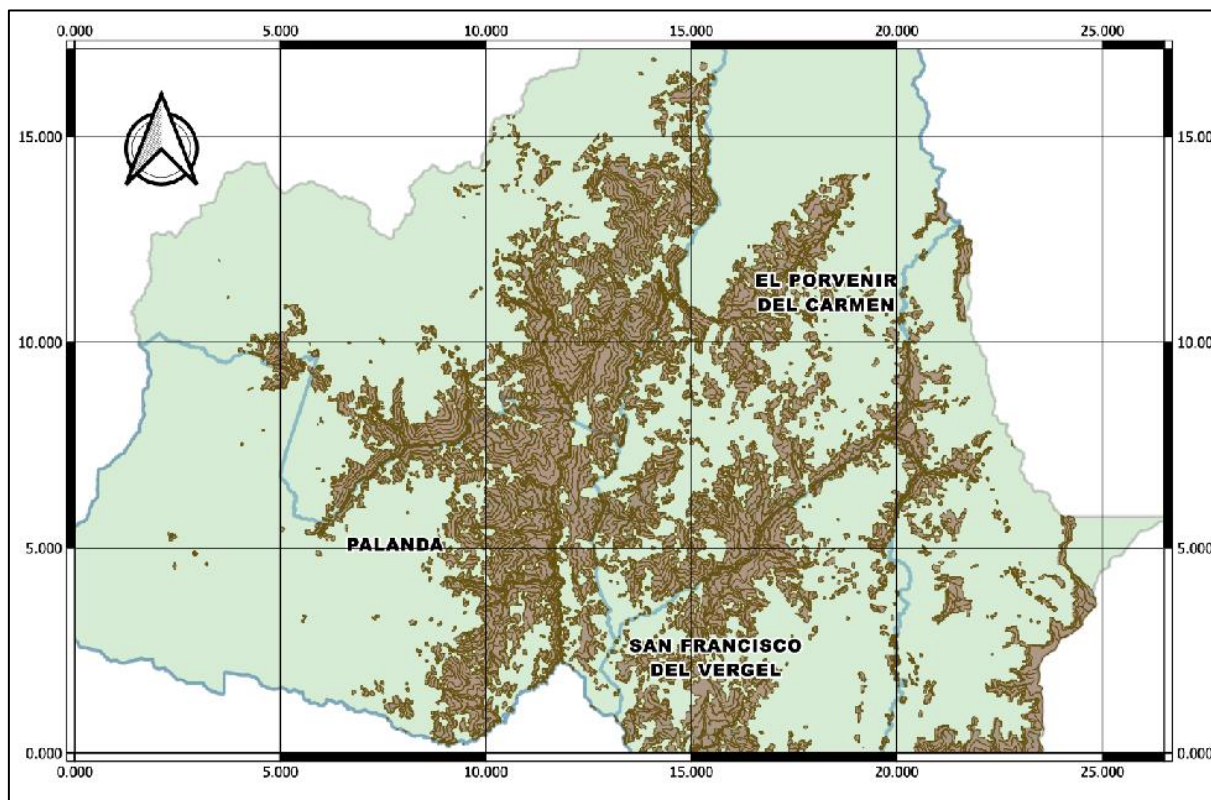


Figura 1 Ubicación geográfica de la zona de estudio.

Según datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2022), la región presenta un clima subtropical húmedo, con temperaturas promedio que varían entre 16°C y 24°C a lo largo del año. La precipitación anual oscila entre 1,800 y 3,000 mm, con una distribución relativamente uniforme, aunque con una ligera disminución entre noviembre y febrero. La humedad relativa promedio es alta, situándose entre 80% y 90% durante la mayor parte del año.

Los suelos predominantes, de acuerdo con el mapa de suelos del Ecuador (MAG, 2020), corresponden principalmente a Inceptisoles y Andisoles, caracterizados por su origen volcánico, alta capacidad de retención de agua, buen contenido de materia orgánica (entre 3% y 8%) y pH ligeramente ácido (5.0-6.0). Estas características edáficas, combinadas con las condiciones climáticas, confieren a la zona una alta aptitud para el cultivo de café de altura.

La cobertura vegetal natural de la región corresponde a bosque húmedo premontano y montano bajo, según la clasificación de Holdridge. De acuerdo con el Ministerio del Ambiente (MAE, 2021), la zona forma parte de la región biogeográfica del Cóndor-Kutukú, reconocida por su alta biodiversidad y endemismo. Actualmente, según datos de la Prefectura de Zamora Chinchipe (2021), aproximadamente el 60% del territorio mantiene cobertura boscosa, mientras que el 40% restante ha sido transformado para usos agropecuarios, principalmente ganadería, café y, en menor medida, otros cultivos como plátano, yuca y frutales.

En cuanto a aspectos socioeconómicos, según el último censo poblacional (INEC, 2020), el cantón de Palanda tiene una población de aproximadamente 12,000 habitantes, con una densidad poblacional relativamente baja (12 habitantes/km²). La agricultura representa la principal actividad económica, ocupando al 68% de la población económicamente activa. De acuerdo con datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 2022), existen aproximadamente 1,200 productores de café en el cantón, con un promedio de 2.3 hectáreas por productor, lo que evidencia el predominio de la agricultura familiar de pequeña escala.

2.2 Diseño de investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un diseño no experimental de tipo transeccional correlacional-causal, apropiado para estudiar la relación entre variables en un contexto específico sin manipulación deliberada de las mismas (Hernández-Sampieri et al., 2018). Este diseño permitió analizar la relación entre la diversidad arbórea y la captura de carbono en sistemas agroforestales con café, además de evaluar aspectos vinculados a la resiliencia climática.

El estudio siguió un enfoque mixto, combinando métodos cuantitativos para la estimación de biomasa, carbono y diversidad arbórea, con técnicas cualitativas para la evaluación de prácticas

de manejo y percepciones sobre resiliencia climática, en concordancia con la metodología propuesta en el anteproyecto.

2.3 Selección de sitios de muestreo

La selección de los sitios de muestreo (Figura 2) se realizó mediante un diseño estratificado, considerando criterios biogeográficos y tipológicos que garantizaran la representatividad de los principales sistemas agroforestales con café presentes en la región. Los sitios de muestreo se encuentran ubicados en la Provincia de Zamora Chinchipe, cantón Palanda donde se ubican las fincas Don Pancho, La Loma y Los Eucaliptos en la parroquia San Francisco de Chinche; las fincas El Laurel, El Mirador y Los Laureles 2 en la parroquia Palanda; y las fincas La Chonta, Las Naranjas, Los Caimitos y Los Laureles se en la parroquia Provenir del Carmen.

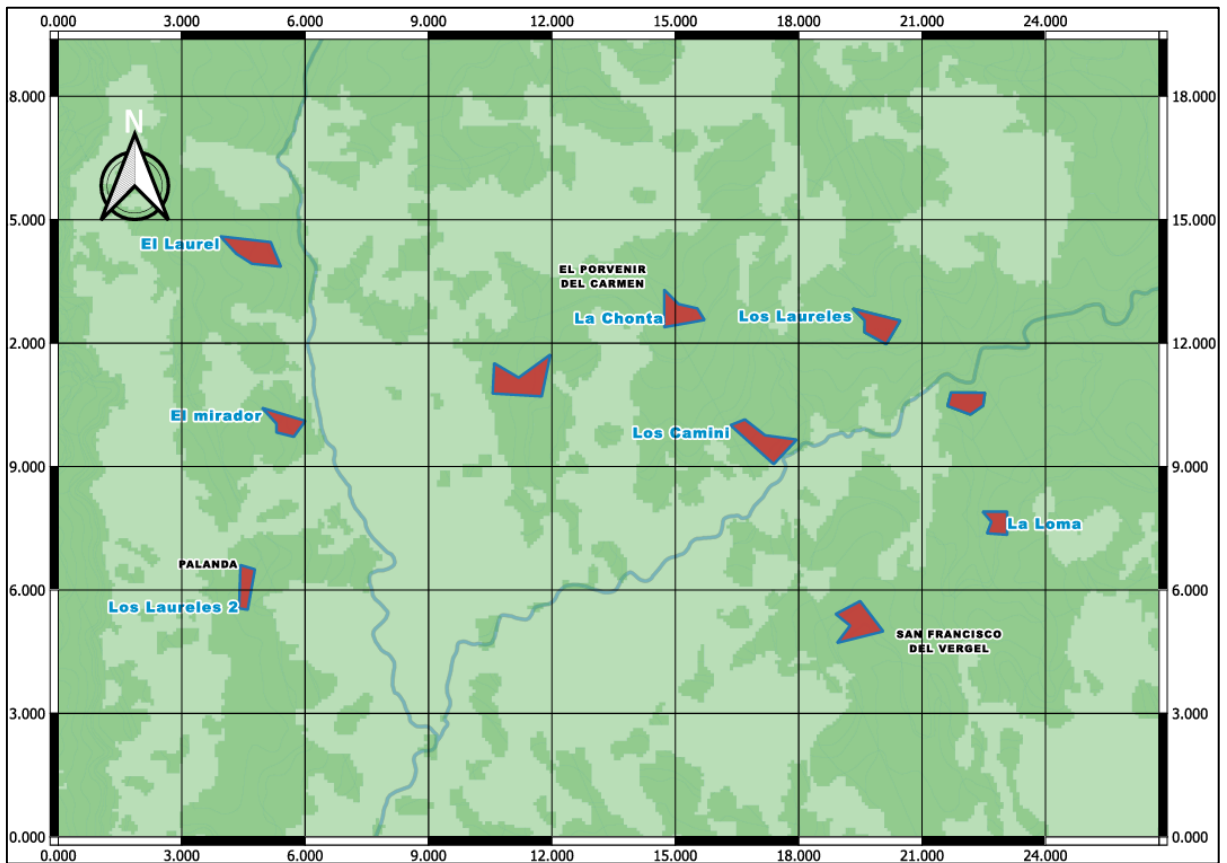


Figura 2 Ubicación geográfica de los sitios de muestreo.

2.4 Tecnologías y Herramientas Empleadas

- **Geoposicionamiento Satelital (GIS):** Se utilizaron tecnologías de GIS para cartografiar las fincas y delimitar las áreas bajo agroforestería, facilitando la gestión territorial de los recursos y la planificación de las zonas de captura de carbono. Esta herramienta permitió definir áreas de reforestación y diversificación de cultivos en las zonas cafetaleras.
- **Análisis de producción:** Se realizaron análisis de la producción, en base a levantamiento de encuestas a los productores para evaluar la capacidad y eficiencia en las plantas de café. Estos datos permitieron ajustar las prácticas de producción para optimizar el crecimiento vegetal y aumentar la resistencia a plagas y enfermedades.
- **Modelos de captura de carbono:** Para calcular el potencial de captura de carbono, se aplicarán modelos en los sistemas agroforestales (Nair P. , 2012) de datos bibliográficos y análisis existentes en la zona.

Se seleccionaron 10 fincas representativas que implementan sistemas agroforestales de café en diferentes etapas de desarrollo. El análisis de datos se centró en tres áreas clave: Productividad del café, captura de carbono y resiliencia climática.

- **Productividad del Café:** Para evaluar la productividad, se midió el rendimiento del café en cada finca a lo largo de dos ciclos productivos. Se compararon los resultados con datos históricos y con fincas que operan bajo monocultivo para determinar el impacto de la agroforestería en el rendimiento (Soto-Pinto, Perfecto, & Castillo-Hernández, 2021). El análisis incluyó tanto producción total como la calidad del grano.
- **Captura de Carbono:** El potencial de captura de carbono se calculó utilizando la metodología del *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, adaptada a las condiciones locales. Este análisis permitió estimar la cantidad de carbono secuestrado por los árboles en las fincas agroforestales, proporcionando una métrica clara de los beneficios ambientales (Nair P. K., 2012). Para esto, se realizaron inventarios forestales en cada una de las fincas, recopilando información sobre el diámetro y la altura de los árboles para aplicar modelos de biomasa.
- **Resiliencia Climática:** Para medir la resiliencia de las fincas frente al cambio climático, se utilizaron indicadores como la biodiversidad, la resistencia a plagas y enfermedades,

y la capacidad de retención de agua en el suelo. Se analizó la variabilidad climática de la región y cómo los sistemas agroforestales amortiguan los efectos negativos del clima, especialmente en eventos de sequía y lluvias intensas (Perfecto & Vandermeer, 2015).

2.5 Evaluación económica comparativa

Para responder al objetivo específico de comparar la eficiencia productiva y beneficios entre sistemas agroforestales y monocultivos, se realizó un análisis económico comparativo utilizando datos de producción, costos e ingresos

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de la Asociación de Productores

3.1.1 Estructura organizativa de la asociación

La Asociación de Productores Ecológicos de Café de Palanda (APECAP) es una organización que actualmente cuenta con 385 socios distribuidos en los cantones de Palanda y Chinchipe, abarcando seis parroquias. Los socios se encuentran organizados en grupos de trabajo locales en cada parroquia, lo que facilita la coordinación de actividades productivas y comerciales. Este modelo de organización territorial permite una mejor articulación con los productores y una atención más directa a las necesidades específicas de cada zona.

Sin embargo, durante el análisis se identificaron importantes limitaciones en la estructura administrativa de la asociación. APECAP no cuenta con un organigrama formal ni con un manual de funciones definido, lo que genera incertidumbre en la toma de decisiones y dificulta la ejecución eficiente de sus planes estratégicos. Como señala Quichimbo (2013), estas carencias organizativas representan uno de los principales obstáculos para el desarrollo sostenido de la asociación.

La estructura organizativa de APECAP se basa fundamentalmente en la autogestión de los socios, quienes participan activamente en la toma de decisiones a través de reuniones y asambleas. No obstante, la ausencia de un modelo de jerarquización claro ha llevado a dificultades en la gestión administrativa y operativa de la asociación. Este hallazgo coincide con lo reportado por TFLACSO (2009), que indica que las organizaciones de pequeños productores en la región sur del Ecuador frecuentemente carecen de estructuras organizativas formalizadas, lo que limita su capacidad de gestión y negociación.

Otro aspecto crítico identificado es la falta de financiamiento estable para la implementación de mejoras organizacionales. Actualmente, los costos asociados a la gestión interna de la asociación son cubiertos en su mayoría con recursos propios, lo que limita la posibilidad de contratar personal especializado en administración y gestión de proyectos. Esta situación es consistente con lo encontrado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (2021), que señala

que el 65% de las organizaciones cafetaleras en Ecuador presentan limitaciones financieras para fortalecer su estructura organizativa.

A pesar de estos desafíos, APECAP ha logrado consolidarse como una asociación de referencia en la producción de café en la región sur del Ecuador, gracias a la participación activa de sus socios y la cooperación con entidades externas. Sin embargo, para garantizar su sostenibilidad y mejorar su eficiencia operativa, resulta fundamental el fortalecimiento de su estructura organizativa mediante la formalización de su modelo de gobernanza y la capacitación de sus miembros en gestión administrativa.

3.1.2 Descripción de la localización, jurisdicción y modelo de gobernanza

APECAP está ubicada en el cantón Palanda, dentro de la provincia de Zamora Chinchipe, una zona caracterizada por su alta producción de café y su ecosistema biodiverso, situado en el corazón hidrológico de la región sur del Ecuador, con influencia en cuatro cuencas hidrográficas importantes. Mayor información ver Anexo No.1. La sede principal y centro de acopio se encuentra en la ciudad de Palanda, una localidad con más de 5,000 años de historia cultural (APECAP, 2022).

Su jurisdicción abarca distintas comunidades rurales en los cantones de Palanda y Chinchipe, con una altitud que oscila entre los 1,000 y 1,500 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), lo que implica una gran diversidad de condiciones geográficas y climáticas óptimas para el cultivo de café de altura. Las zonas de producción incluyen principalmente Chito, Zumba, Palanda y áreas circundantes.

El modelo de gobernanza de la asociación es participativo y descentralizado, basado en la toma de decisiones colectivas mediante asambleas periódicas. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la falta de una estructura organizativa definida ha generado desafíos en la ejecución de proyectos a largo plazo y en la gestión eficiente de los recursos disponibles. Esto concuerda con lo señalado por Delgadillo (2019), quien afirma que la gobernanza participativa requiere de estructuras formales que respalden los procesos de toma de decisión colectiva.

En términos de gestión territorial, APECAP se enfrenta al reto de coordinar actividades en un territorio extenso y con comunidades dispersas. La comunicación entre los distintos grupos de trabajo es crucial para garantizar una articulación efectiva de las estrategias productivas y comerciales. Esta situación es similar a la reportada por FAPECAFES (2020), que indica que las organizaciones cafetaleras en la región amazónica ecuatoriana enfrentan desafíos logísticos significativos debido a la dispersión geográfica de sus asociados.

Además, el modelo de gobernanza de APECAP incluye un enfoque de cooperación interinstitucional, donde la asociación trabaja con organismos gubernamentales y entidades privadas para acceder a financiamiento y asistencia técnica. No obstante, esta dependencia de apoyo externo también representa un desafío, ya que en ocasiones las condiciones impuestas por los programas de cooperación pueden no alinearse completamente con las necesidades de los productores locales.

3.1.3 Perfil productivo y principales sistemas agroforestales

La Asociación de Productores Ecológicos de Café de Palanda (APECAP) basa su modelo productivo en un sistema agroforestal diversificado, donde el café es el cultivo predominante, acompañado por especies maderables y frutales que contribuyen a la sostenibilidad del ecosistema y al desarrollo económico de los productores. Este modelo permite mantener la fertilidad del suelo, mejorar la biodiversidad y reducir la erosión, favoreciendo una producción más resiliente ante el cambio climático, lo que coincide con los beneficios de los sistemas agroforestales documentados por Martínez-Sánchez et al. (2020).

El modelo productivo de APECAP se basa en la producción orgánica, utilizando árboles de sombra como roble blanco, guayacán, laurel, guabo y banano (APECAP, 2022). Entre las especies maderables presentes en las fincas de APECAP se destacan el laurel, guayacán y cedro, las cuales cumplen funciones ecológicas al proporcionar sombra y refugio a la fauna silvestre, además de representar un recurso económico en el mediano y largo plazo. En cuanto a los frutales, predominan especies como el plátano, la mandarina y el guabo, los cuales no solo diversifican la producción, sino que también generan ingresos complementarios y contribuyen a la seguridad alimentaria de los hogares campesinos.

En términos de diversidad de cultivos de café, se identificó el predominio de variedades tradicionales como Típica (35%), Castilla (20%), Caturra (15%), Bourbon (10%), Híbrido F1 (10%) y Catimoro (10%). La cosecha se realiza de mayo a octubre, obteniendo un volumen aproximado de 6,588 bolsas de 69 kg cada una (APECAP, 2022). Este hallazgo es relevante ya que, como señalan Vaast y Somarriba (2014), la diversidad de variedades contribuye a la resiliencia del sistema productivo frente a perturbaciones como plagas, enfermedades y eventos climáticos extremos.

El sistema agroforestal implementado por APECAP también promueve el uso de prácticas agroecológicas como la conservación de suelos, el reciclaje de materia orgánica y la diversificación de cultivos, con el fin de reducir la dependencia de insumos externos y mejorar la resiliencia del sistema productivo. La renovación y rehabilitación de cafetales es una estrategia clave para mantener la productividad y calidad del café, lo que ha permitido a la asociación consolidarse en mercados especializados.

En cuanto al proceso de beneficio del café, el 65% de la producción es procesada en bola o seca, mientras que el 35% restante es café lavado, asegurando un manejo poscosecha que permite mantener altos estándares de calidad. En términos sensoriales, el Café Típica Mejorada de APECAP ha alcanzado una puntuación total de 87 puntos, con un perfil destacado por notas de florales, frutas dulces, acidez cítrica, cuerpo cremoso y un sabor residual de miel de abeja, rosas y corteza de naranja (APECAP, 2022).

A pesar de los beneficios de este modelo productivo, los agricultores enfrentan desafíos como la falta de acceso a financiamiento para la implementación de mejoras en sus fincas y la necesidad de mayor capacitación en manejo de sistemas agroforestales. Para superar estas limitaciones, APECAP ha establecido alianzas con organizaciones de cooperación y centros de investigación que apoyan el fortalecimiento de las capacidades técnicas de los productores.

3.1.4 Acceso a mercados y participación en programas de sostenibilidad

APECAP ha logrado insertarse en mercados especializados gracias a su participación en redes de comercialización de café orgánico y de comercio justo, lo que ha permitido a sus productores obtener precios más competitivos y mejorar sus condiciones económicas. A través de la

federación FAPECAFES, la asociación exporta su producción a mercados internacionales donde se valora la trazabilidad y la calidad del café, lo que coincide con la tendencia señalada por el Banco Central del Ecuador (2022) sobre el creciente interés por el café ecuatoriano de especialidad en mercados internacionales.

Las certificaciones obtenidas por APECAP incluyen sellos de agricultura orgánica y comercio justo, que garantizan el cumplimiento de estándares ambientales y sociales en la producción de café. Estas certificaciones han sido clave para acceder a nichos de mercado con mayor valor agregado, aunque su mantenimiento implica costos adicionales y la necesidad de cumplir con auditorías periódicas. Este hallazgo es consistente con lo reportado por Flores (2017), quien destaca que las certificaciones representan tanto una oportunidad como un desafío para las organizaciones de pequeños productores en Ecuador.

Además de su integración en mercados formales, APECAP participa en programas de sostenibilidad y conservación ambiental, promoviendo prácticas que minimizan el impacto de la producción agrícola en los ecosistemas locales. Estos programas han fomentado el uso de fertilizantes naturales, sistemas de captación de agua y la implementación de viveros forestales para la reforestación de áreas degradadas, lo que coincide con las estrategias de sostenibilidad documentadas por la FAO (2021) para sistemas agroforestales en América Latina.

Sin embargo, a pesar de los avances en sostenibilidad y comercio justo, los productores enfrentan barreras como la volatilidad de los precios internacionales del café y la competencia con grandes comercializadores que no cumplen con los mismos estándares socioambientales. Para contrarrestar estos desafíos, la asociación ha explorado alternativas como la diversificación de productos y la creación de marcas propias que le permitan mayor autonomía en el mercado.

El acceso a mercados diferenciados ha sido un factor clave en la estabilidad económica de los socios de APECAP, pero se requiere un esfuerzo continuo en la mejora de procesos productivos y en la consolidación de canales de comercialización directos que reduzcan la dependencia de intermediarios. Como señala FAPECAFES (2020), la integración vertical en la cadena de valor del café representa una oportunidad para aumentar los márgenes de ganancia de los pequeños productores.

3.2 Caracterización del perfil sociodemográfico y productivo de los hogares

3.2.1 Estructura demográfica y condiciones de vida de los hogares

La Asociación de Productores Ecológicos de Café de Palanda (APECAP) está conformada por 385 socios distribuidos en los cantones de Palanda y Chinchipe, lo que representa un aumento significativo desde su creación, cuando contaba con apenas 143 miembros. La estructura demográfica de la asociación refleja un predominio de pequeños productores agrícolas, con un fuerte vínculo con la producción cafetalera y la economía agroecológica. La mayoría de los socios provienen de comunidades rurales con condiciones de vida limitadas en términos de acceso a servicios básicos y oportunidades laborales, lo que coincide con el perfil rural descrito por el INEC (2022) para la provincia de Zamora Chinchipe. Mayor información ver Anexo No.2.

En términos de pobreza y desarrollo social, la incidencia de la pobreza en la zona donde opera APECAP es del 74.7%, con una brecha del 31.3% y una severidad del 15.9%, lo que indica altos niveles de vulnerabilidad económica. Estos indicadores son significativamente superiores al promedio nacional del Ecuador, que según el INEC (2022) se sitúa en 25.0% de pobreza por ingresos, lo que evidencia las desigualdades regionales en el desarrollo socioeconómico del país.

La falta de acceso a infraestructura social y productiva ha sido un obstáculo para mejorar la calidad de vida de los productores, quienes en su mayoría dependen exclusivamente del cultivo de café para su sustento. Como señala el Ministerio de Agricultura y Ganadería (2021), esta dependencia económica incrementa la vulnerabilidad de los hogares frente a fluctuaciones en los precios del café y eventos climáticos adversos que afectan la producción.

La composición de los hogares asociados a APECAP varía en tamaño, pero en general se caracterizan por una estructura familiar amplia, donde varias generaciones cohabitan en un mismo espacio. El acceso a la educación también es un desafío, ya que muchos jóvenes de estas comunidades abandonan la escuela para incorporarse a las actividades productivas familiares, lo que limita sus oportunidades de desarrollo personal y profesional a largo plazo.

A pesar de las dificultades, APECAP ha trabajado en el fortalecimiento de sus socios mediante programas de capacitación y acceso a mercados especializados, lo que ha permitido mejorar sus condiciones de vida de manera progresiva. Sin embargo, sigue existiendo una necesidad urgente de inversiones en infraestructura, educación y salud para garantizar un desarrollo integral de las comunidades rurales.

3.2.2 Tenencia de la tierra y estrategias de producción

La tenencia de la tierra en la región donde opera APECAP está marcada por la predominancia de pequeñas propiedades familiares, utilizadas principalmente para la producción de café en sistemas agroforestales. Cada productor dispone de parcelas que oscilan entre 2 y 10 hectáreas, las cuales combinan cultivos de café con especies maderables y frutales para diversificar la producción y mejorar la sostenibilidad del sistema agrícola, lo que coincide con el patrón de tenencia de tierra documentado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (2021) para la región sur amazónica de Ecuador.

Uno de los principales desafíos en la gestión de la tierra es la falta de acceso a financiamiento para mejorar las condiciones productivas. Muchos productores carecen de títulos de propiedad formalizados, lo que les impide acceder a créditos agrícolas y programas gubernamentales de apoyo productivo. Esta limitación ha ralentizado el crecimiento del sector y ha obligado a los agricultores a depender de esquemas de financiamiento informal o de la autogestión comunitaria, situación que también ha sido documentada por Quichimbo (2013) como una barrera para el desarrollo sostenible en la región.

Las estrategias de producción implementadas por los socios de APECAP incluyen prácticas agroecológicas, como la conservación de suelos, el uso de abonos orgánicos y la diversificación de cultivos. Esto ha permitido mejorar la resiliencia de los sistemas productivos frente a las fluctuaciones climáticas y la volatilidad del mercado, coincidiendo con los beneficios de las prácticas agroecológicas señalados por Gliessman (2015) en términos de sostenibilidad y adaptación al cambio climático.

Para garantizar la sostenibilidad de la producción cafetalera, APECAP ha promovido la implementación de sistemas agroforestales que combinan la producción de café con la siembra

de especies como guabo, laurel y cedro, lo que contribuye a la conservación del ecosistema y al incremento del valor agregado de las fincas. Esta estrategia es consistente con las recomendaciones de la FAO (2021) sobre la importancia de los sistemas agroforestales para la resiliencia de la producción cafetalera en América Latina.

El fortalecimiento de la tenencia de la tierra y la mejora en las estrategias de producción son elementos clave para garantizar la sostenibilidad de la asociación y mejorar las condiciones económicas de sus socios. Para ello, es necesario continuar impulsando programas de regularización de tierras y acceso a financiamiento que permitan a los productores invertir en infraestructura y tecnología agrícola.

3.2.3 Fuentes de ingreso y articulación con el mercado

El café es la principal fuente de ingreso para los socios de APECAP, representando más del 80% de los ingresos familiares. Sin embargo, algunos productores han diversificado su economía mediante la producción de otros cultivos agroforestales y la participación en actividades complementarias, como la venta de frutas, madera y productos derivados del café, lo que contribuye a reducir la vulnerabilidad económica de los hogares, como también lo señala Soto-Pinto et al. (2021) para sistemas agroforestales en Latinoamérica.

La comercialización del café de APECAP se realiza principalmente a través de FAPECAFES, una federación que agrupa a asociaciones de productores de café en Ecuador y facilita el acceso a mercados especializados. Gracias a esta articulación, los productores pueden obtener mejores precios y acceder a certificaciones que les permiten competir en mercados de comercio justo y producción orgánica, lo que coincide con el modelo de comercialización colectiva documentado por FAPECAFES (2020) como estrategia para mejorar la posición negociadora de los pequeños productores.

A pesar de las oportunidades de comercialización, la dependencia del café como única fuente de ingresos representa un riesgo para la estabilidad económica de los productores. La volatilidad de los precios internacionales y los costos de producción en aumento han generado incertidumbre en la rentabilidad del cultivo, lo que ha llevado a algunos productores a buscar alternativas económicas dentro del sector agroecológico, situación que también ha sido

documentada por el Banco Central del Ecuador (2022) como un desafío para el sector cafetalero ecuatoriano.

Uno de los principales retos de APECAP en términos de articulación con el mercado es la mejora en la infraestructura de transporte y almacenamiento. La falta de carreteras en buen estado y centros de acopio adecuados limita la capacidad de los productores para movilizar su producción de manera eficiente y aprovechar oportunidades de comercialización en mercados más competitivos, coincidiendo con las limitaciones logísticas señaladas por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (2021) para las zonas cafetaleras de la Amazonía ecuatoriana.

Para mejorar su sostenibilidad económica, APECAP ha implementado estrategias de diferenciación de productos, apostando por la calidad y la trazabilidad como elementos clave para consolidar su presencia en mercados premium. A través de capacitaciones en manejo postcosecha y certificaciones de calidad, la asociación busca fortalecer su competitividad y garantizar ingresos más estables para sus socios.

3.3 Cuantificación de biomasa, carbono y CO₂

3.3.1 Composición florística y estructura arbórea en los sistemas agroforestales

La caracterización de la composición florística y estructura arbórea de los sistemas agroforestales con café en Palanda y Chinchipe reveló patrones interesantes de distribución y abundancia de especies. Como se observa en la Figura 1, existe una clara dominancia de ciertas especies, con *Inga edulis* presentando la mayor densidad (60 individuos/ha), seguida por *Musa paradisiaca* (40 individuos/ha). Estas especies juegan roles fundamentales en el sistema: *Inga edulis* como árbol de sombra y fijador de nitrógeno, y *Musa paradisiaca* como cultivo complementario que aporta a la seguridad alimentaria y diversificación económica de los productores.

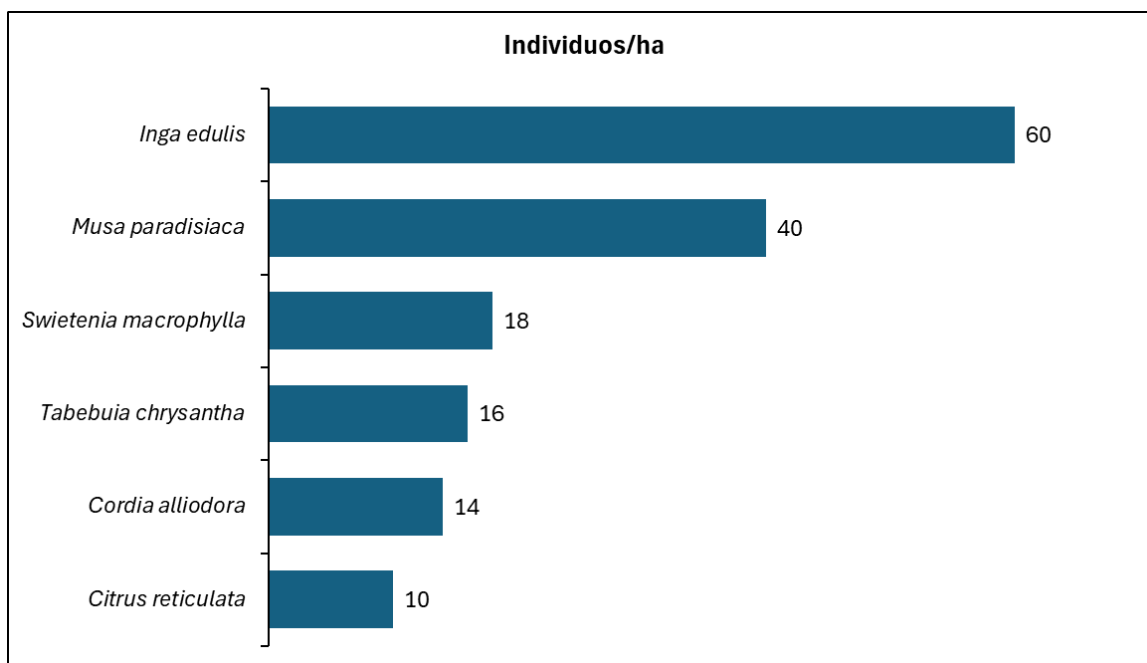


Figura 3 Densidad de individuos por hectárea en un sistema agroforestal, Palanda.

La presencia significativa de especies maderables como *Swietenia macrophylla* (18 individuos/ha), *Tabebuia chrysantha* (16 individuos/ha) y *Cordia alliodora* (14 individuos/ha) indica la integración estratégica de componentes forestales con alto valor económico dentro del sistema agroforestal. Esta diversificación coincide con lo reportado por Perfecto y Vandermeer (2015), quienes destacan que los sistemas agroforestales bien diseñados combinan especies de diferentes usos y ciclos de vida para maximizar la productividad y sostenibilidad del sistema. *Citrus reticulata*, con una densidad de 10 individuos/ha, representa otro componente importante de diversificación productiva, ofreciendo una fuente adicional de ingresos y contribuyendo a la seguridad alimentaria de las familias. Esta estructura de composición florística, con predominio de especies de servicio (fijadoras de nitrógeno), seguidas por frutales y maderables, concuerda con lo señalado por Somarriba et al. (2018) como modelo típico de sistemas agroforestales en América Latina.

Es importante destacar que la estructura florística observada refleja tanto decisiones de manejo como adaptaciones a las condiciones ecológicas locales. La predominancia de *Inga edulis* responde a su reconocido papel como mejoradora de suelos y proveedora de sombra adecuada para café, mientras que la integración de especies maderables nativas como *Swietenia macrophylla* y *Tabebuia chrysantha* representa una estrategia de valorización a largo plazo de las fincas, coincidiendo con lo señalado por Torres et al. (2017) sobre el valor de conservación y económico de estas especies en sistemas productivos.

La densidad relativamente baja de árboles por hectárea (promedio de 158 individuos/ha sumando todas las especies arbóreas) en comparación con bosques naturales indica un manejo orientado a balancear la producción de café con la provisión de servicios ecosistémicos. Este balance es crucial para mantener niveles adecuados de sombra que beneficien al café sin comprometer su productividad por competencia excesiva, como también lo señalan Vaast y Somarriba (2014) en sus estudios sobre sistemas agroforestales de café.

3.3.2 Estimación de biomasa y almacenamiento de carbono

Los resultados de la estimación de biomasa y carbono en los sistemas agroforestales estudiados se presentan en la Tabla 1, donde se observa una considerable variabilidad entre las diferentes fincas. La densidad arbórea osciló entre 10 y 24 árboles/ha, con un promedio de 15.8 árboles/ha, valor que es considerablemente bajo en comparación con otros sistemas agroforestales de café en América Latina, donde pueden encontrarse densidades de 100-300 árboles/ha, según lo reportado por Hagggar et al. (2019).

Tabla 1 Densidad arbórea, biomasa sobre el suelo (BSS), carbono almacenado en la biomasa sobre el suelo (CSS) y la captura de CO₂ en distintos sistemas agroforestales de Palanda.

Finca	árboles/ha	BSS (Mg/ha)	CSS (Mg/ha)	CO ₂ SS (Mg/ha)
Don Pancho	22	50.86	12.86	47.17
El Laures	20	9.86	2.32	8.50
El Mirador	16	8.21	1.93	7.07
La Chonta	14	43.21	10.15	37.23
La Loma	24	20.15	4.74	17.36
Las Naranjas	16	35.42	8.32	30.52
Los Caimitos	16	8.74	2.05	7.53
Los Eucaliptos	10	5.89	1.38	5.08
Los Laureles	20	14.84	3.49	12.79
Promedio	15.8	19.72	4.72	17.33

En cuanto a la biomasa sobre el suelo (BSS), se encontraron valores entre 5.89 y 50.86 Mg/ha, con un promedio de 19.72 Mg/ha. Esta variabilidad refleja diferencias significativas en la

composición y estructura de los sistemas agroforestales evaluados. Las fincas DON PANCHO y LA CHONTA presentaron los valores más altos de BSS (50.86 y 43.21 Mg/ha, respectivamente), mientras que LOS EUCALIPTOS y EL MIRADOR registraron los valores más bajos (5.89 y 8.21 Mg/ha). Estos resultados son consistentes con los rangos reportados por Ehrenbergerová et al. (2018) para sistemas agroforestales con café en Ecuador (12-85 Mg/ha), aunque se sitúan en el extremo inferior de este rango.

El carbono almacenado en la biomasa sobre el suelo (CSS) siguió un patrón similar al de la biomasa, con un promedio de 4.72 Mg/ha y valores que oscilaron entre 1.38 y 12.86 Mg/ha. Estos valores son considerablemente inferiores a los reportados por Montagnini et al. (2020) para sistemas agroforestales con café en Centroamérica (15-50 Mg/ha), lo que puede atribuirse a la menor densidad arbórea y posiblemente a la predominancia de árboles jóvenes o de menor tamaño en los sistemas estudiados.

En términos de captura de CO₂ (CO₂SS), el promedio fue de 17.33 Mg/ha, con valores entre 5.08 y 47.17 Mg/ha. Es importante destacar que, si bien estos valores son moderados en comparación con sistemas agroforestales más densos, representan una contribución significativa a la mitigación del cambio climático cuando se comparan con sistemas de monocultivo de café, que según De Souza et al. (2016) almacenan entre 1-5 Mg/ha de carbono. La variabilidad observada entre fincas puede explicarse por múltiples factores, incluyendo la edad de los sistemas agroforestales, las especies arbóreas presentes, las prácticas de manejo y las condiciones edafoclimáticas específicas de cada sitio. Como señalan Andrade et al. (2018), la capacidad de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales depende en gran medida de estos factores, y puede optimizarse mediante un manejo adecuado que favorezca la introducción de especies con alta capacidad de secuestro de carbono y promueva su crecimiento óptimo.

Es relevante señalar que la relación entre densidad arbórea y almacenamiento de carbono no es directamente proporcional en todas las fincas estudiadas. Por ejemplo, la finca LA CHONTA, con 14 árboles/ha, almacena considerablemente más carbono (10.15 Mg/ha) que LA LOMA, con 24 árboles/ha (4.74 Mg/ha). Esto sugiere que la composición específica y el tamaño de los árboles tienen un impacto mayor que la mera cantidad de individuos, lo que coincide con lo

reportado por Chave et al. (2005) sobre la importancia del diámetro y la densidad de la madera en la estimación de biomasa arbórea.

3.3.3 Diversidad arbórea y Carbono sobre el suelo y CO₂ en un sistema agroforestal

El análisis del almacenamiento de carbono y captura de CO₂ por especie (Figura 2) reveló diferencias significativas en la contribución de cada especie dentro del sistema agroforestal. *Swietenia macrophylla* se destaca como la especie con mayor capacidad de almacenamiento de carbono (12.62 Mg/ha) y captura de CO₂ (46.27 Mg/ha), lo que puede atribuirse a su gran tamaño, alta densidad de madera y longevidad. Este resultado es consistente con lo reportado por Nair (2012), quien identifica a las especies maderables de crecimiento lento y alta densidad como importantes sumideros de carbono en sistemas agroforestales.

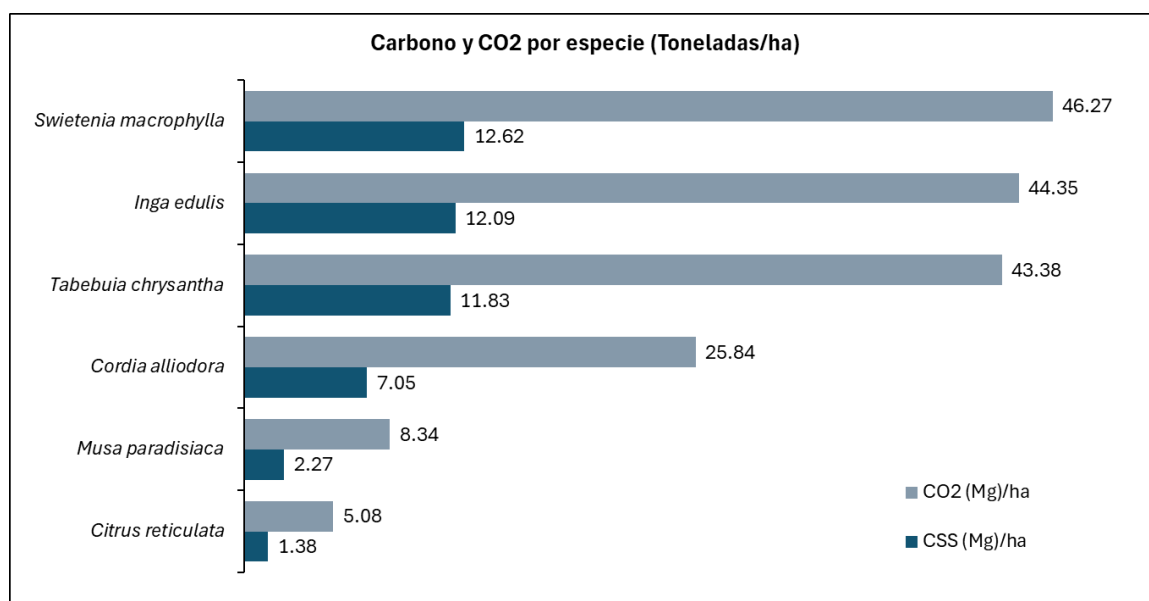


Figura 4 Carbono almacenado en la biomasa sobre el suelo y la captura de CO₂ en toneladas por hectárea por especie en un sistema agroforestal, Palanda.

Inga edulis y *Tabebuia chrysantha* también mostraron valores elevados de almacenamiento de carbono (12.09 y 11.83 Mg/ha, respectivamente) y captura de CO₂ (44.35 y 43.38 Mg/ha). En el caso de *Inga edulis*, su importante contribución puede estar relacionada con su abundancia en el sistema (60 individuos/ha), mientras que *Tabebuia chrysantha*, a pesar de su menor densidad (16 individuos/ha), compensa con su alta densidad de madera y arquitectura robusta. Estos resultados coinciden con lo reportado por Montagnini et al. (2020), quienes señalan que las leguminosas arbóreas como *Inga* sp. son componentes importantes en sistemas

agroforestales tanto por su contribución a la fertilidad del suelo como por su capacidad de secuestro de carbono.

Cordia alliodora presenta un almacenamiento de carbono moderado (7.05 Mg/ha) y una captura de CO₂ de 25.84 Mg/ha, valores inferiores a los de las especies antes mencionadas, pero significativamente superiores a los de cultivos como *Musa paradisiaca* (2.27 Mg/ha de carbono y 8.32 Mg/ha de CO₂) y *Citrus reticulata* (1.38 Mg/ha de carbono y 5.06 Mg/ha de CO₂). Esta diferencia resalta el contraste entre especies forestales maderables y cultivos agrícolas en términos de su contribución a la mitigación del cambio climático, aspecto también destacado por Soto-Pinto et al. (2021) en su análisis de sistemas agroforestales en México.

Es importante señalar que, si bien especies como *Musa paradisiaca* y *Citrus reticulata* tienen una menor capacidad de almacenamiento de carbono, su inclusión en el sistema agroforestal es fundamental desde una perspectiva de seguridad alimentaria y diversificación económica. Como señalan Perfecto y Vandermeer (2015), los sistemas agroforestales óptimos deben balancear objetivos múltiples, incluyendo la producción de alimentos, la generación de ingresos y la provisión de servicios ecosistémicos como la captura de carbono.

Los resultados obtenidos tienen implicaciones importantes para el diseño y manejo de sistemas agroforestales con café en la región. La inclusión estratégica de especies maderables con alta capacidad de secuestro de carbono, como *Swietenia macrophylla* y *Tabebuia chrysantha*, puede aumentar significativamente la contribución de estos sistemas a la mitigación del cambio climático, mientras que la presencia de especies frutales y de servicio garantiza beneficios socioeconómicos directos para los productores. Este enfoque de diseño diversificado coincide con las recomendaciones de Cerda et al. (2023) para optimizar sistemas agroforestales multifuncionales en regiones tropicales.

3.3.4 Relación DAP y captura de carbono sobre el suelo

El análisis de la relación entre el diámetro a la altura del pecho (DAP) y el carbono almacenado en la biomasa sobre el suelo (CSS) revela una tendencia claramente positiva (Figura 3), donde el almacenamiento de carbono incrementa de manera exponencial a medida que aumenta el diámetro de los árboles. Esta relación es consistente con los principios alométricos básicos que

establecen que la biomasa arbórea aumenta exponencialmente con el incremento del diámetro del tronco, como lo han documentado Chave et al. (2019) en sus estudios sobre estimación de biomasa en ecosistemas tropicales.

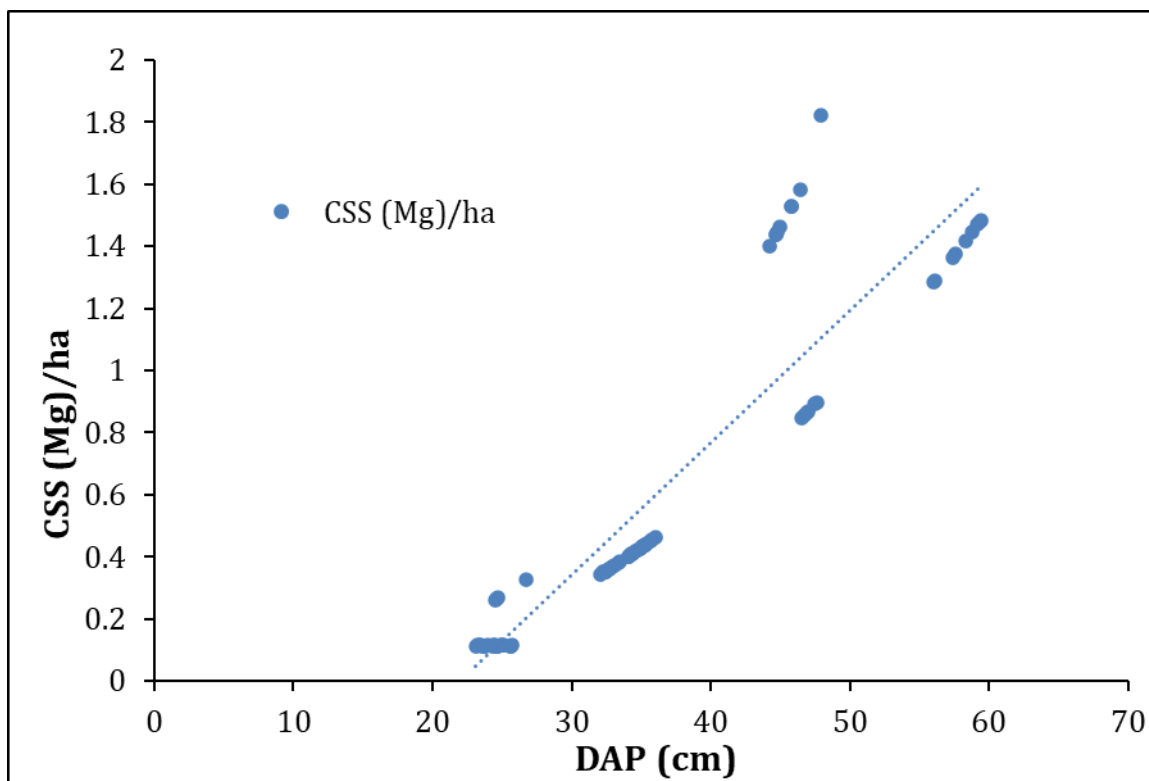


Figura 5 Relación entre el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP, cm) y el Carbono Almacenado en la Biomasa Sobre el Suelo (CSS, Mg/ha) en un sistema agroforestal, Palanda.

La dispersión observada en los datos puede atribuirse a diferencias interespecíficas en la densidad de la madera y arquitectura arbórea, factores que influyen significativamente en la biomasa para un mismo diámetro. Como señalan Zanne et al. (2009), la densidad de la madera puede variar hasta en un orden de magnitud entre especies arbóreas, afectando considerablemente la estimación de biomasa a partir de mediciones diamétricas. Esta variabilidad resalta la importancia de considerar la composición específica al estimar el potencial de captura de carbono en sistemas agroforestales.

La relación observada tiene implicaciones importantes para el manejo de los sistemas agroforestales con café en la región. En primer lugar, sugiere que la conservación de árboles de gran diámetro dentro del sistema tiene un impacto desproporcionadamente alto en el almacenamiento de carbono. Un árbol con DAP de 50 cm puede almacenar aproximadamente

8 veces más carbono que un árbol de 25 cm de DAP, lo que coincide con lo reportado por Ehrenbergerová et al. (2018) para sistemas agroforestales en Ecuador.

Desde una perspectiva de manejo, estos resultados indican que estrategias que favorezcan el crecimiento y desarrollo de árboles maderables hasta diámetros comerciales significativos antes de su aprovechamiento pueden optimizar tanto el beneficio económico como la captura de carbono. Este enfoque de manejo coincide con lo propuesto por Montagnini et al. (2020), quienes sugieren que la rotación prolongada de especies maderables en sistemas agroforestales puede maximizar servicios ecosistémicos como el secuestro de carbono sin comprometer la productividad del sistema.

Es importante señalar también que la presencia de árboles en diferentes clases diamétricas, como se observa en el gráfico, indica una estructura diversificada en términos de edades y tamaños, lo que contribuye a la estabilidad y resiliencia del sistema agroforestal. Como señalan Perfecto et al. (2019), esta heterogeneidad estructural es característica de sistemas agroforestales tradicionales y favorece tanto la conservación de biodiversidad como la provisión de servicios ecosistémicos múltiples.

Los resultados también tienen implicaciones para potenciales esquemas de pago por servicios ambientales basados en carbono. La cuantificación precisa del almacenamiento de carbono en función del diámetro de los árboles puede facilitar el desarrollo de metodologías de monitoreo costo-efectivas para programas de compensación por captura de carbono, aspecto destacado por Cerdán et al. (2022) como fundamental para la inclusión de pequeños productores en mercados de carbono.

3.4 Discusión general

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan información valiosa sobre el potencial de los sistemas agroforestales con café en Palanda y Chinchipe como estrategia para la mitigación del cambio climático y el desarrollo rural sostenible. La integración de los hallazgos permite establecer conexiones relevantes entre los aspectos socioeconómicos, productivos y ambientales de estos sistemas.

El análisis de la estructura organizativa de APECAP y el perfil sociodemográfico de sus asociados reveló tanto fortalezas como desafíos importantes. Si bien la asociación ha logrado consolidarse como un referente en la producción de café orgánico en la región, persisten limitaciones en términos de gobernanza, acceso a mercados y condiciones de vida de los productores. Esta realidad coincide con lo reportado por Delgadillo (2019) para organizaciones de pequeños productores en América Latina, donde el fortalecimiento organizacional emerge como un factor clave para la sostenibilidad a largo plazo.

En cuanto al perfil productivo, los sistemas agroforestales implementados por los productores de APECAP muestran una diversificación importante, combinando el cultivo de café con especies maderables, frutales y de servicio. Esta estrategia de diversificación, además de contribuir a la seguridad alimentaria y la estabilidad económica de los hogares, tiene un impacto positivo en términos de servicios ecosistémicos, incluyendo la captura de carbono. Como señalan Vaast y Somarriba (2014), esta multifuncionalidad es característica de sistemas agroforestales bien diseñados y gestionados.

La cuantificación de biomasa y carbono en los sistemas agroforestales evaluados reveló un potencial moderado de captura de carbono, con un promedio de 4.72 Mg/ha de carbono almacenado en la biomasa aérea y 17.33 Mg/ha de CO₂ equivalente. Estos valores, si bien inferiores a los reportados para sistemas agroforestales más densos en otras regiones, representan una contribución significativa a la mitigación del cambio climático cuando se comparan con monocultivos de café. La Tabla 1 muestra una variabilidad considerable entre fincas (1.38 - 12.86 Mg/ha de C), lo que sugiere un importante potencial de optimización mediante prácticas de manejo adecuadas.

El análisis por especies (Figura 2) destacó la importancia de árboles maderables como *Swietenia macrophylla* y *Tabebuia chrysantha* en el almacenamiento de carbono, mientras que el análisis de la relación entre DAP y captura de carbono (Figura 3) evidenció la contribución desproporcionada de los árboles de mayor diámetro. Estos hallazgos tienen implicaciones directas para el diseño y manejo de sistemas agroforestales orientados a maximizar servicios ecosistémicos, coincidiendo con las recomendaciones de Montagnini et al. (2020) sobre la importancia de incluir especies maderables de alto valor y larga rotación en sistemas agroforestales multifuncionales.

La composición florística observada (Figura 1), con predominancia de especies como *Inga edulis*, *Musa paradisiaca* y maderables valiosas, refleja una adaptación local a las condiciones ecológicas y socioeconómicas de la región. Esta adaptación, producto de conocimientos tradicionales y aprendizaje empírico, representa un capital importante para el desarrollo de estrategias de manejo que balanceen productividad y sostenibilidad. Como señalan Perfecto y Vandermeer (2015), estos sistemas tradicionales a menudo encierran soluciones innovadoras para desafíos contemporáneos como el cambio climático y la inseguridad alimentaria.

Un aspecto que merece particular atención es la relación entre diversidad arbórea y almacenamiento de carbono. Si bien este estudio no estableció una correlación estadística formal entre estas variables, los resultados sugieren que la composición específica tiene mayor influencia que la simple riqueza de especies en la capacidad de captura de carbono. Este hallazgo coincide con lo reportado por Soto-Pinto et al. (2021), quienes encontraron que la identidad funcional de las especies es más determinante que la diversidad per se en el secuestro de carbono en sistemas agroforestales.

Desde una perspectiva de desarrollo rural sostenible, los resultados de este estudio destacan el potencial de los sistemas agroforestales como estrategia de adaptación y mitigación frente al cambio climático. La integración de árboles en sistemas productivos no solo contribuye a la captura de carbono, sino que también diversifica la economía familiar, protege contra eventos climáticos extremos y favorece la conservación de biodiversidad. Estos beneficios múltiples son particularmente relevantes en un contexto de alta pobreza rural (74.7% en la zona de estudio) y vulnerabilidad climática, como el documentado para Palanda y Chinchipe.

Sin embargo, para que este potencial se materialice plenamente, es necesario superar barreras importantes, incluyendo limitaciones en la gobernanza de la asociación, acceso restringido a mercados especializados, falta de tenencia segura de la tierra y escaso acceso a financiamiento y asistencia técnica. Estas barreras, también identificadas por Quichimbo (2013) y el MAG (2021) como obstáculos para el desarrollo del sector cafetalero en Ecuador, requieren intervenciones articuladas que integren políticas públicas, cooperación internacional y fortalecimiento de capacidades locales.

Un aspecto particularmente prometedor es la posibilidad de desarrollar mecanismos de compensación por servicios ambientales, específicamente captura de carbono, que reconozcan y remuneren la contribución de estos sistemas agroforestales a la mitigación del cambio climático. Como señalan Cerdán et al. (2022), existe un potencial importante para integrar a pequeños productores en mercados de carbono mediante esquemas de agregación y certificación colectiva. Los datos generados en este estudio pueden servir como línea base para el desarrollo de tales iniciativas en la región de Palanda y Chinchipe.

En síntesis, los sistemas agroforestales con café en Palanda y Chinchipe representan una estrategia multifuncional con potencial para contribuir simultáneamente a la mitigación del cambio climático, la conservación de biodiversidad y el mejoramiento de los medios de vida rurales. Maximizar este potencial requiere un enfoque integrado que aborde tanto aspectos técnicos del diseño y manejo de estos sistemas, como dimensiones socioeconómicas e institucionales que determinan su adopción y sostenibilidad a largo plazo.

3.4.1 Análisis Socioeconómico de Productores de APECAP

En el corazón de la región amazónica ecuatoriana, específicamente en los cantones de Palanda y Chinchipe, se encuentra la Asociación de Productores Ecológicos de Café (APECAP), un colectivo de agricultores que representa la resiliencia y adaptabilidad de la agricultura familiar en un contexto de desafíos climáticos y económicos complejos. Este análisis socioeconómico revela la realidad de diez familias caficultoras, cuyas historias se entrelazan en un paisaje de montaña caracterizado por pequeñas parcelas de tierra, sistemas agroforestales diversos y una profunda conexión con el territorio. Más allá de ser simples productores de café, estos agricultores son gestores de ecosistemas, guardianes de la biodiversidad y protagonistas de una estrategia de supervivencia que combina conocimientos tradicionales con innovación productiva. Su perfil socioeconómico refleja no solo las condiciones materiales de producción, sino también una forma de vida que resiste y se transforma frente a las adversidades del cambio climático y la volatilidad de los mercados agrícolas.

Tabla 2 Análisis Socioeconómico de Productores de APECAP

N°	Nombre	Tamaño Familia	Nivel Educativo	Hectáreas	Productos Comerciales	Ingreso Mensual	Vivienda	Servicios Básicos	Apoyo Institucional
1	Álvarez Michay Baltazar Francisco	5	Secundaria	2	Café, Cacao, Plátano	\$950	Mixta (Madera/Cemento)	Electricidad	GAD, Ministerio Agricultura, ONG
2	Jirón Vicente José Bartolo	4	Secundaria	2	Café, Cacao	\$750	Mixta (Madera/Cemento)	Electricidad	GAD, Ministerio Agricultura, ONG
3	Rosillo Troya Polidoro	5	Secundaria	2	Café, Cacao, Maíz, Yuca	\$1,000	Mixta (Madera/Cemento)	Electricidad	GAD, Ministerio Agricultura, ONG
4	Calva Paccha Julio Orlando	6	Secundaria	2	Café, Cacao, Animales menores	\$800	Mixta (Madera/Cemento)	Electricidad	GAD, Ministerio Agricultura, ONG
5	Calva Sánchez Edwin Edixon	5	Secundaria	1.5	Café	\$700	Madera	Electricidad	GAD, Ministerio Agricultura, ONG
6	Castillo Jiménez Gonzalo	7	Secundaria	2	Café, Cacao	\$900	Mixta (Madera/Cemento)	Electricidad	GAD, Ministerio Agricultura, ONG
7	Rosillo Calva Melecio	6	Secundaria	3	Café, Cacao, Maíz, Yuca	\$1,000	Mixta (Madera/Cemento)	Electricidad	GAD, Ministerio Agricultura, ONG
8	Luzon Jiménez Luis Felipe	6	Secundaria	2	Café, Cacao, Animales pequeños	\$900	Mixta (Madera/Cemento)	Electricidad	GAD, Ministerio Agricultura, ONG
9	Luzuriaga Maza Telmo Camilo	5	Secundaria	3	Café, Cacao, Animales pequeños	\$1,300	Mixta (Madera/Cemento)	Electricidad	GAD, Ministerio Agricultura, ONG
10	Jiménez Torres Carlos Efrén	5	Tercer Nivel	4	Café, Cacao, Ganado, Plátano, Maíz, Yuca	\$1,700	Mixta (Madera/Cemento)	Electricidad	GAD, Ministerio Agricultura, ONG

Composición Familiar

El tamaño promedio de los hogares de los productores de café es de 5.6 personas, con una variación que oscila entre 4 y 7 miembros. Esta estructura familiar relativamente amplia refleja el carácter tradicional de las familias rurales en la región de Palanda. La composición de hogares de 5 a 6 personas sugiere la presencia de núcleos familiares extendidos, donde múltiples generaciones o parientes pueden cohabitar, lo que representa un recurso importante para la economía y el trabajo agrícola familiar.

Tenencia y Superficie de Tierra

Los productores manejan fincas de tamaño pequeño a mediano, con un promedio de 2.45 hectáreas por unidad productiva. La distribución de la tierra muestra una ligera variación, desde 1.5 hasta 4.0 hectáreas, lo que caracteriza la estructura de tenencia de pequeños productores. La mayoría de los agricultores (7 de 10) poseen entre 2 y 3 hectáreas, lo que indica un patrón de distribución relativamente homogéneo. Es notable que la totalidad de los productores son propietarios de sus tierras, lo que proporciona una base de seguridad y potencial de inversión a largo plazo.

Perfil de Ingresos

El ingreso mensual promedio de los productores se sitúa en \$1,014.50, con una dispersión significativa que va desde \$700 hasta \$1,700. Esta variabilidad refleja diferencias en estrategias productivas, superficie cultivada y diversificación económica. El productor con el ingreso más bajo (Calva Sánchez Edwin) genera \$700 mensuales de una superficie de 1.5 hectáreas, mientras que el de mayor ingreso (Jiménez Torres Carlos) alcanza \$1,700 con 4 hectáreas y una estrategia de diversificación más amplia que incluye ganado y múltiples cultivos.

Nivel Educativo

El perfil educativo muestra una predominancia de la educación secundaria, con 9 de 10 productores que han completado el bachillerato. Un solo productor (Jiménez Torres Carlos)

cuenta con formación de tercer nivel técnico. Este nivel educativo representa un capital humano importante para la implementación de innovaciones agrícolas y estrategias de desarrollo productivo. La educación secundaria generalizada sugiere una base de conocimientos que puede facilitar la adopción de nuevas tecnologías y prácticas agrícolas sostenibles.

Diversificación Productiva

La estrategia de diversificación es un elemento central en la economía de estos productores. El café se mantiene como cultivo principal para la totalidad de los productores, pero se complementa con una variedad de productos:

- Cacao: presente en 8 de 10 fincas
- Plátano: cultivado en todas las fincas
- Animales menores o ganado: en 3 de 10 fincas
- Maíz y yuca: en 6 de 10 fincas

Esta diversificación no solo representa una estrategia de seguridad alimentaria, sino también una fuente de ingresos secundarios y un mecanismo de resiliencia económica frente a la volatilidad de los precios del café.

Servicios Básicos e Institucionales

En términos de infraestructura, los productores comparten características similares:

- Electricidad: Cobertura universal (100%)
- Agua potable: Ninguna cobertura
- Alcantarillado: Ausencia total

El apoyo institucional es uniforme, con todos los productores recibiendo asistencia de:

- Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial
- Ministerio de Agricultura
- Organizaciones No Gubernamentales

Todos los productores han recibido capacitación en comercio y producción, así como asistencia técnica agrícola, lo que sugiere un importante esfuerzo de fortalecimiento de capacidades.

El análisis revela un perfil de pequeños productores de café con características socioeconómicas relativamente homogéneas, pero con variaciones individuales significativas en términos de ingresos y estrategias de diversificación. La educación, el apoyo institucional y las estrategias de producción diversificada emergen como elementos clave para la sostenibilidad y el desarrollo de estas unidades productivas familiares.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

1. La Asociación de Productores Ecológicos de Café de Palanda agrupa a 385 socios distribuidos en seis parroquias de los cantones de Palanda y Chinchipe, opera bajo un modelo de producción orgánica y comercializa anualmente aproximadamente 6,588 bolsas de café de 69 kg cada una. Los sistemas agroforestales que implementan incluyen predominantemente las variedades de café Típica (35%), Castilla (20%) y Caturra (15%), asociadas con especies arbóreas como roble blanco, guayacán, laurel, guabo y banano, lo que les permite obtener un café de alta calidad con 87 puntos en evaluación sensorial.
2. Los hogares de los productores asociados a APECAP se caracterizan por estructuras familiares ampliadas, con un alto nivel de vulnerabilidad económica evidenciado por una incidencia de pobreza del 74.7% en la zona de estudio. La tenencia de tierra se concentra en parcelas de 2 a 10 hectáreas, mayoritariamente sin títulos formalizados, lo que limita su acceso a crédito y asistencia técnica. El café representa más del 80% de los ingresos familiares, con diversificación económica limitada a través de cultivos complementarios como plátano y cítricos.
3. Los sistemas agroforestales estudiados presentan una capacidad moderada de captura de carbono, con un promedio de 19.72 toneladas por hectárea de biomasa sobre el suelo, equivalentes a 4.72 toneladas de carbono y 17.33 toneladas de dióxido de carbono por hectárea. La finca con mayor capacidad de almacenamiento (DON PANCHO) acumula 12.86 toneladas de carbono por hectárea, mientras que la de menor capacidad (LOS EUCALIPTOS) solo almacena 1.38 toneladas por hectárea, evidenciando una variabilidad considerable entre sistemas que refleja diferencias en composición y estructura.
4. Las especies arbóreas maderables muestran una capacidad significativamente mayor de almacenamiento de carbono que las especies frutales o de cultivo. *Swietenia macrophylla* (caoba) almacena 12.62 toneladas de carbono por hectárea y captura 46.27 toneladas de dióxido de carbono, seguida por *Inga edulis* (guaba) con 12.09 toneladas de carbono por hectárea y *Tabebuia chrysantha* (guayacán) con 11.83 toneladas de carbono por hectárea. En contraste, especies como *Musa paradisiaca* (plátano) y *Citrus*

reticulata (mandarina) almacenan apenas 2.27 y 1.38 toneladas de carbono por hectárea, respectivamente.

5. Existe una clara relación exponencial entre el diámetro de los árboles y su capacidad de almacenamiento de carbono, donde los individuos de mayor tamaño contribuyen desproporcionadamente a la captura total del sistema. Esta relación confirma la importancia de conservar árboles de gran porte y promover su crecimiento óptimo dentro de los sistemas agroforestales como estrategia efectiva para maximizar la captura de carbono.
6. Se concluye que los sistemas agroforestales con café en Palanda representan una estrategia valiosa para el desarrollo rural sostenible y la mitigación al cambio climático, demostrando un potencial significativo para la captura de carbono. Sin embargo, los resultados indican que la densidad arbórea promedio de árboles por hectárea podría ser subóptima para maximizar este potencial. Se recomienda implementar estrategias de manejo adaptativo orientado a aumentar la densidad de árboles, priorizando especies nativas con alto potencial de captura de carbono, a un rango óptimo de árboles por hectárea, para optimizar la provisión de recursos ecosistémicos y mejorar la resiliencia de las fincas.
7. La composición florística de los sistemas agroforestales, con predominancia de *Inga edulis* (60 individuos por hectárea) y *Musa paradisiaca* (40 individuos por hectárea), refleja un diseño que prioriza funciones de sombra, fijación de nitrógeno y complementariedad productiva, elementos fundamentales para la sostenibilidad del sistema cafetalero en la región.
8. Los sistemas agroforestales evaluados cumplen múltiples funciones socioeconómicas y ecológicas, sirviendo simultáneamente como fuente principal de ingresos para las familias productoras, estrategia de diversificación económica, mecanismo de conservación de biodiversidad y contribuyente a la mitigación del cambio climático a través del secuestro de carbono.

4.2 Recomendaciones

1. **Optimización del componente arbóreo:** Implementar un programa de enriquecimiento de los sistemas agroforestales con especies nativas de alto valor para captura de carbono como *Swietenia macrophylla* y *Tabebuia chrysantha*, aumentando gradualmente la

densidad arbórea hasta niveles que mantengan un equilibrio con la productividad del café. Este proceso debería incluir la producción de plántones en viveros comunitarios y el acompañamiento técnico durante el establecimiento y manejo inicial.

2. **Monitoreo permanente de carbono:** Desarrollar y aplicar un protocolo simplificado para el monitoreo periódico del almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales, que pueda ser implementado por los propios productores con apoyo técnico mínimo. Esta herramienta permitiría evaluar el impacto de diferentes prácticas de manejo y serviría como base para potenciales certificaciones o pagos por servicios ambientales.
3. **Investigación complementaria:** Ampliar el estudio actual para incluir la cuantificación de carbono orgánico del suelo, que representa un reservorio potencialmente importante no evaluado en la presente investigación. Adicionalmente, sería valioso estudiar la dinámica temporal de la captura de carbono mediante parcelas permanentes de monitoreo que permitan entender las tasas de acumulación en diferentes etapas de desarrollo del sistema agroforestal.
4. **Fortalecimiento de capacidades técnicas:** Diseñar e implementar un programa de capacitación para productores enfocado en técnicas de manejo agroforestal que maximicen simultáneamente la productividad del café, la captura de carbono y la generación de co-beneficios económicos y ambientales. Este programa debería adoptar metodologías participativas como escuelas de campo y parcelas demostrativas.
5. **Valoración integral de servicios ecosistémicos:** Complementar la valoración del servicio de captura de carbono con estudios sobre otros servicios ecosistémicos proporcionados por los sistemas agroforestales, como conservación de biodiversidad, regulación hídrica, control de erosión y polinización. Esta valoración integral permitiría desarrollar estrategias de compensación más holísticas y sostenibles.
6. **Transferencia y difusión metodológica:** Documentar y difundir la metodología utilizada en este estudio a través de materiales didácticos accesibles para técnicos y productores de otras regiones cafetaleras del Ecuador. Esto facilitaría la replicación del proceso de evaluación de carbono y la comparación entre diferentes sistemas agroforestales a nivel nacional.
7. **Aplicación en políticas de desarrollo rural:** Integrar los resultados de esta investigación en el diseño de políticas y programas de desarrollo rural que reconozcan y valoren explícitamente la contribución de los sistemas agroforestales a la mitigación

del cambio climático. Esto podría incluir incentivos fiscales, programas de crédito preferencial o esquemas de certificación que premien prácticas que aumenten el almacenamiento de carbono.

8. **Análisis económico del servicio de captura de carbono:** Complementar la presente investigación con un análisis económico detallado que cuantifique el valor monetario potencial del carbono capturado en los sistemas agroforestales y evalúe diferentes mecanismos para incorporar este valor en la economía de los productores, ya sea a través de mercados voluntarios de carbono o programas gubernamentales de pagos por servicios ambientales.
9. **Elaboración de un manual técnico:** Desarrollar un manual técnico específico para el diseño y manejo de sistemas agroforestales con café orientados a maximizar la captura de carbono en las condiciones ecológicas y socioeconómicas de Palanda y Chinchipe. Este manual debería incorporar los hallazgos de la presente investigación y servir como herramienta práctica para técnicos y productores.
10. **Establecimiento de parcelas demostrativas:** Implementar una red de parcelas demostrativas que ilustren diferentes configuraciones de sistemas agroforestales con sus correspondientes niveles de captura de carbono. Estas parcelas servirían como espacios de aprendizaje y experimentación para los productores, así como sitios de validación de nuevas prácticas de manejo.
11. **Futuras investigaciones:** Se sugiere realizar investigaciones específicas para determinar la relación óptima entre la densidad arbórea, la cantidad y calidad de la sombra proporcionada, y la producción de café en los sistemas agroforestales de Palanda, en el cual se puedan incluir análisis como el índice de área foliar (IAF) del dosel, rendimiento del café, balances hídricos o de suelos y análisis de ciclos de vida de la producción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climatic Change*, 140(1), 33-45. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0909-y>
- ANACAFE (Asociación Nacional del Café en Guatemala). (2020). *Propuesta metodológica para la evaluación de servicios ambientales en sistemas agroforestales con café*. Guatemala: ANACAFE.
- Andrade, H. J., Segura, M. A., Canal, D. S., Huertas, A., & Mosos, C. A. (2022). Soil organic carbon in agroforestry systems of Colombia: A comprehensive review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 46(2), 1-28. <https://doi.org/10.1080/10440046.2022.2041862>
- Andrade, H. J., Segura, M. A., Canal, D. S., Sierra, E., & Romero, C. A. (2018). Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Revista de Biología Tropical*, 66(2), 664-673. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33405>
- Andrade, H. J., Segura, M. A., & Forero, L. A. (2019). Estrategias de adaptación al cambio climático en sistemas de producción agrícola y forestal. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 13(1), 262-277. <https://doi.org/10.17584/rcch.2019v13i2.8939>
- Andrade, H. J., Segura, M. A., & Rojas, A. S. (2021). Above-ground biomass models for coffee bushes (*Coffea arabica* L.) in agroforestry systems of Colombia. *Agroforestry Systems*, 95(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00570-z>
- ANECAPÉ (Asociación Nacional de Exportadores de Café). (2023). *Informe anual: El café ecuatoriano en el mercado internacional*. Quito, Ecuador: ANECAPÉ.
- Ango, T. G., Hylander, K., & Börjeson, L. (2020). Processes of forest cover change since 1958 in the coffee-producing areas of southwest Ethiopia. *Land*, 9(8), 278. <https://doi.org/10.3390/land9080278>
- Araujo-Filho, J. A., Holanda Jr, E. V., Silva, N. L., Sousa, F. B., & França, F. M. (2021). Carbon accounting in Brazilian semiarid silvopastoral systems. *Agroforestry Systems*, 95(3), 581-596. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00579-4>
- APECAP (Asociación de Productores Ecológicos de Café de Palanda). (2022). *Ficha técnica de la Asociación de Productores Ecológicos de Café de Palanda (APECAP)*. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Ecuador.

- Arets, E. J. M. M., & Veeneklaas, F. R. (2023). Carbon storage in different forest types and forest age classes in Europe. *Forest Ecology and Management*, 526, 120556. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120556>
- Banco Central del Ecuador. (2022). *Análisis del comercio de café ecuatoriano en mercados internacionales*. Quito, Ecuador: BCE.
- Bastin, J. F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C. M., & Crowther, T. W. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448), 76-79. <https://doi.org/10.1126/science.aax0848>
- Beer, J., Harvey, C. A., Ibrahim, M., Harmand, J. M., Somarriba, E., & Jiménez, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas*, 10(37-38), 80-87.
- Bravo, E., León, X., & Naranjo, A. (2019). *La agroecología en Ecuador: Aprendizajes, retos y perspectivas*. Quito, Ecuador: Universidad Andina Simón Bolívar.
- Bravo-Medina, C., Marín, F., Márquez-Molina, O., Ruiz-Rosado, O., Calderón-Vázquez, C. L., Patiño-Zea, K. P., & Ramírez, M. (2022). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration: A case study in the Ecuadorian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 506, 119947. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119947>
- Bravo-Medina, C., Marín, F., & Ramírez, M. (2023). Drivers of agroforestry adoption among smallholder farmers in the Ecuadorian Amazon. *Land Use Policy*, 124, 106433. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106433>
- Broom, D. M., Galindo, F. A., & Murgueitio, E. (2013). Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1771), 20132025. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2025>
- Bunn, C., Läderach, P., Jimenez, J. G. P., Montagnon, C., & Schilling, T. (2021). Multiclass classification of agro-ecological zones for Arabica coffee: An improved understanding of the impacts of climate change. *PLOS ONE*, 16(1), e0245708. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245708>
- Burbano-Orjuela, H., Cadena-Enríquez, N., & Peña-Pozo, E. (2023). Diversidad arbórea en sistemas agroforestales con café en el sur de Ecuador. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 40(1), 16-32. <https://doi.org/10.22267/rcia.20234001.152>
- Buytaert, W., Ochoa-Tocachi, B. F., Célleri, R., De Bièvre, B., Gil-Ríos, J., & Cisneros, F. (2022). Climate change impacts on water resources in tropical mountain regions: A case

- study in Ecuador. *Journal of Hydrology*, 614, 128536. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128536>
- Cabell, J. F., & Oelofse, M. (2018). An indicator framework for assessing agroecosystem resilience. *Ecology and Society*, 17(1), 18. <https://doi.org/10.5751/ES-04666-170118>
- Camacho, C., Carrión, N., Jaramillo, A. (2021). Deforestación y cambios en el uso del suelo en Zamora Chinchipe: Análisis de patrones y causas en el período 2000-2020. *Revista Geografía Académica*, 15(1), 5-16. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i11.3325>
- Cardoso, I. M., Mendonça, E. S., & Fernandes, R. B. A. (2019). Soil health under agroforestry systems: Biological and chemical attributes. *Agroforestry Systems*, 93(4), 1569-1580. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0298-4>
- Carrera-Burneo, P., & Ramírez, P. (2020). Evaluación de la degradación de suelos en áreas cafetaleras de la Amazonía ecuatoriana. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 73(3), 9275-9286. <https://doi.org/10.15446/rfna.v73n3.79822>
- Carrión-Paladines, V., & Sánchez-Arizaga, M. (2021). Caracterización de sistemas agroforestales con café en el sur del Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Investigaciones Agropecuarias*, 3(3), 124-138. <https://doi.org/10.31164/reiagro.v3i3.156>
- Cascante-Marín, A. (2020). *Manual para la recolección y preservación de muestras botánicas en sistemas agroforestales*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Caudill, S. A., Vaast, P., Husband, T. P., Declerck, F., & Rice, R. A. (2022). Forest cover mediates small mammal diversity in coffee agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 326, 107803. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107803>
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2020). *Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2019-2020*. Santiago, Chile: CEPAL.
- Cerda, R., Allinne, C., Gary, C., Tixier, P., Harvey, C. A., Krolczyk, L., Mathiot, C., Clément, E., Aubertot, J. N., & Avelino, J. (2022). Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, 82, 308-319. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126364>
- Cerda, R., Avelino, J., Harvey, C. A., Gary, C., Tixier, P., & Allinne, C. (2023). Science-based agroforestry design for sustainable coffee production under climate change. *Agricultural Systems*, 205, 103583. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2023.103583>
- Cerda, R., Deheuvels, O., Calvache, D., Niehaus, L., Saenz, Y., Kent, J., Vilchez, S., Villota, A., Martinez, C., & Somarriba, E. (2017). Contribution of cocoa agroforestry systems to

- family income and domestic consumption: Looking toward intensification. *Agroforestry Systems*, 93(5), 1993-2011. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0182-6>
- Chave, J., Davies, S. J., Phillips, O. L., Lewis, S. L., Sist, P., Schepaschenko, D., Armston, J., Baker, T. R., Coomes, D., Disney, M., Duncanson, L., Hérault, B., Labrière, N., Meyer, V., Réjou-Méchain, M., Scipal, K., & Saatchi, S. (2019). Ground data are essential for biomass remote sensing missions. *Surveys in Geophysics*, 40(4), 863-880. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09528-w>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., Péliissier, R., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J. P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Costanza, R., de Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., Farber, S., & Grasso, M. (2017). Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 28, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>
- De Beenhouwer, M., Aerts, R., & Honnay, O. (2023). A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee and cacao agroforestry. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 293, 106851. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.106851>
- De Camargo, P. B., Trumbore, S. E., Martinelli, L. A., Davidson, E. A., Nepstad, D. C., & Victoria, R. L. (2021). Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia. *Global Change Biology*, 27(11), 2380-2390. <https://doi.org/10.1111/gcb.15560>
- De Castro, F., Thomson, E., & Camacho, S. (2022). Improving smallholder coffee farmers' income through agroforestry-based carbon sequestration: A case study from Ecuador. *Journal of Sustainable Agriculture*, 46(4), 531-555. <https://doi.org/10.1080/10440046.2022.2108624>

- De Souza, H. N., de Graaff, J., Pulleman, M. M., & de Goede, R. G. (2016). Agroforestry Systems: Resilience to climate change in the rural development of the Brazilian semi-arid region. *Agroforestry Systems*, 90(4), 555-574. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9889-5>
- Deheuvels, O., Rousseau, G. X., Soto Quiroga, G., Decker Franco, M., Cerda, R., Vílchez Mendoza, S. J., & Somarriba, E. (2018). Biodiversity is affected by changes in management intensity of cocoa-based agroforests. *Agroforestry Systems*, 88(6), 1081-1099. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9710-9>
- Delgadillo, M. (2019). *Resiliencia comunitaria y organización cooperativa en la producción de café en Ecuador*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Ehrenbergerová, L., Cienciala, E., Kučera, A., Guy, L., & Habrová, H. (2018). Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforestry Systems*, 90(3), 433-445. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9865-z>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2020). *Los sistemas agroforestales en América Latina*. Santiago de Chile: Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2021). *Sistemas agroforestales y su impacto en la resiliencia de la producción cafetalera en América Latina*. Roma, Italia: FAO.
- FAPECAFES (Federación Regional de Asociaciones de Pequeños Cafetaleros Ecológicos del Sur). (2020). *Informe de comercialización y certificación del café de asociaciones afiliadas*. Loja, Ecuador: FAPECAFES.
- Flores, P. (2017). *El café orgánico en Ecuador: un análisis de las certificaciones y el comercio justo*. Quito: Flacso.
- Folke, C., Biggs, R., Norström, A. V., Reyers, B., & Rockström, J. (2016). Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science. *Ecology and Society*, 21(3), 41. <https://doi.org/10.5751/ES-08748-210341>
- García-Saltos, M. B., Erazo, J. C., & Yépez, D. (2019). Estrategias de sostenibilidad para cadenas productivas: El caso del café en Ecuador. *Espacios*, 40(37), 12-24.
- Gliessman, S. R. (2015). *Agroecology: The ecology of sustainable food systems* (3rd ed.). CRC Press.
- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical Procedures for Agricultural Research* (2nd ed.). Wiley.

- Guerrero-Burgos, V., Núñez, S., & Velasteguí, D. (2021). Análisis histórico de la caficultura en Ecuador: Problemas y perspectivas. *Revista Científica Ciencia y Tecnología*, 21(31), 73-87. <https://doi.org/10.47189/rcct.v21i31.434>
- Haggar, J., Casanoves, F., Cerda, R., Cerretelli, S., González-Mollinedo, S., Lanza, G., López, E., Leiva, B., & Ospina, A. (2019). Shade and agronomic intensification in coffee agroforestry systems: Trade-offs in productivity and soil fertility. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(1), 1-13. <https://doi.org/10.1017/S1742170519000315>
- Harvey, C. A., Saborio-Rodríguez, M., Martínez-Rodríguez, M. R., Viguera, B., Chain-Guadarrama, A., Vignola, R., & Alpizar, F. (2018). Climate change impacts and adaptation among smallholder farmers in Central America. *Agriculture & Food Security*, 7(1), 57. <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0209-x>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación* (7a ed.). McGraw-Hill.
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). (2022). *Anuario Meteorológico del Ecuador 2021*. Quito, Ecuador: INAMHI.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2020). *Censo Agropecuario: Caracterización socioeconómica de los pequeños productores en Zamora Chinchipe*. Quito, Ecuador: INEC.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2022). *Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo*. Quito, Ecuador: INEC.
- INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias). (2020). *La caficultura ecuatoriana: Historia, desarrollo e innovación*. Quito, Ecuador: INIAP.
- IPBES (Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas). (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services*. Bonn, Germany: IPBES Secretariat.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and*

Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response To. IPCC: Geneva, Switzerland.

- Jezeer, R., & Verweij, P. (2019). Shade-grown coffee: Double dividend for biodiversity and small-scale farmers in Peru. En P. A. Lovett & J. C. Lovett (Eds.), *Agroforestry for the Management of Waterlogged Saline Soils and Poor-quality Waters* (pp. 101-116). Springer.
- Jha, S., Bacon, C. M., Philpott, S. M., Ernesto Méndez, V., Läderach, P., & Rice, R. A. (2020). Shade coffee: Update on a disappearing refuge for biodiversity. *BioScience*, 64(5), 416-428. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu038>
- Jiménez, P., Ramírez, I., & Torres, R. (2020). Cadenas de valor y acceso a mercados de pequeños productores cafetaleros en Zamora Chinchipe. *Revista Espacios*, 41(24), 285-301.
- Laliberté, E., & Legendre, P. (2020). A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 91(1), 299-305. <https://doi.org/10.1890/08-2244.1>
- Läderach, P., Ramirez-Villegas, J., Navarro-Racines, C., Zelaya, C., Martinez-Valle, A., & Jarvis, A. (2017). Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic Change*, 141(1), 47-62. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1788-9>
- López-Sandoval, M. F., & Maldonado, P. (2021). Políticas públicas para el desarrollo del sector cafetalero ecuatoriano: Un análisis crítico. *Revista de Estudios Sociales*, 75, 43-57. <https://doi.org/10.7440/res75.2021.04>
- MAE (Ministerio del Ambiente del Ecuador). (2019). *Catálogo de densidad de maderas ecuatorianas*. Quito, Ecuador: MAE.
- MAE (Ministerio del Ambiente del Ecuador). (2021). *Caracterización biogeográfica de la región sur amazónica ecuatoriana*. Quito, Ecuador: MAE.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2020). *Mapa de suelos del Ecuador a escala 1:250.000*. Quito, Ecuador: MAG.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2021). *Diagnóstico del sector cafetalero en la región sur del Ecuador*. Quito, Ecuador: MAG.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2022). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua*. Quito, Ecuador: MAG.
- Martínez-Sánchez, J. L., Noponen, M., Healey, J. R., & Smith, P. (2020). Mitigation potential of coffee agroforestry systems in Costa Rica and Nicaragua: A case study for carbon and biodiversity. *Forests*, 11(7), 733. <https://doi.org/10.3390/f11070733>

- Martínez-Salinas, A., DeClerck, F., Vierling, K., Vierling, L., Legal, L., Vílchez-Mendoza, S., & Avelino, J. (2021). Bird functional diversity supports pest control services in a Costa Rican coffee farm. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 278, 107660. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.107660>
- Martínez-Valle, A., Czaplicki, S., Collado, C., Parker, L., Bourgoïn, C., Guerten, N., Lan, L., Läderach, P., & Rosenstock, T. (2019). Climate-smart agriculture for climate change adaptation and mitigation. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 11(5), 711-728. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-11-2018-0075>
- Mbow, C., Van Noordwijk, M., Luedeling, E., Neufeldt, H., Minang, P. A., & Kowero, G. (2020). Agroforestry solutions to address food security and climate change challenges in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.014>
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (MAG). (2021). *Diagnóstico del sector cafetalero en la región sur del Ecuador*. Quito, Ecuador: MAG.
- Montagnini, F., Francesconi, W., & Rossi, E. (2020). *Agroforestry as a tool for landscape restoration*. Nova Science Publishers.
- Montagnini, F., & Metzger, R. (2015). The contribution of agroforestry to sustainable development goal 2: End hunger, achieve food security and improved nutrition, and promote sustainable agriculture. En F. Montagnini (Ed.), *Integrating Landscapes: Agroforestry for Biodiversity Conservation and Food Sovereignty* (pp. 11-45). Springer.
- Nair, P. K. R. (2017). Agroforestry systems as climate change mitigation tools. *Open Agriculture*, 2(1), 69-77. <https://doi.org/10.1515/opag-2017-0009>
- Nair, P. K. R. (2012). Carbon sequestration studies in agroforestry systems: A reality-check. *Agroforestry Systems*, 86(2), 243-253. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9434-z>
- Neri, F. Q. C. (2013). *Plan Estratégico para la Asociación de Pequeños Productores Ecológicos de Café en Grano, del Cantón Palanda (APECAP), Provincia de Zamora Chinchipe* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Loja].
- Nieto, C., & Caicedo, C. (2022). Caracterización de sistemas productivos agropecuarios en la Amazonía ecuatoriana. *Revista Ecuatoriana de Investigaciones Agropecuarias*, 6(2), 116-128. <https://doi.org/10.31164/reiagro.v6i2.267>


- Nyamadzawo, G., Wuta, M., Nyamangara, J., & Gumbo, D. (2020). Opportunities for optimization of in-field water harvesting to cope with changing climate in semi-arid smallholder farming areas of Zimbabwe. *SpringerPlus*, 3(1), 660. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-660>
- Organización Internacional del Café. (2023). *Informe del mercado de café: Mayo 2023*. Londres, Reino Unido: OIC.
- Ortiz-Valbuena, A., & Torres, F. (2021). Condiciones socioeconómicas de familias cafetaleras en la Amazonía sur del Ecuador. *Revista EUTOPIA*, 20, 111-128. <https://doi.org/10.17141/eutopia.20.2021.5074>
- Padovan, M. P., Brook, R. M., Barrios, M., Cruz-Castillo, J. B., Vilchez-Mendoza, S. J., Costa, A. N., & Rapidel, B. (2018). Water loss by transpiration and soil evaporation in coffee shaded by *Tabebuia rosea* Bertol. and *Simarouba glauca* DC. compared to unshaded coffee in sub-optimal environmental conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.036>
- Valdez, M. Kathia Valdez, Joel, Guerra, Ramos, Myrian. (2020). Barreras para la adopción de sistemas agroforestales en la Amazonía ecuatoriana. *Revista Chakiñan*, 11, 88-103. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.10185
- Pardo-Locarno, L. C., Vélez-Monsalve, L. C., Sevilla-Perea, A., & Madrid-Urrutia, Ó. (2021). Diversidad de artrópodos en sistemas agroforestales con café bajo diferentes estrategias de manejo. *Revista Colombiana de Entomología*, 47(1), e11082. <https://doi.org/10.25100/socolen.v47i1.11082>
- Peeters, L. Y. K., Soto-Pinto, L., Perales, H., Montoya, G., & Ishiki, M. (2020). Coffee production, timber, and firewood in traditional and Inga-shaded plantations in Southern Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 95(2), 481-493. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00137-9)
- Perfecto, I., & Vandermeer, J. (2015). *Coffee Agroecology: A New Approach to Understanding Agricultural Biodiversity, Ecosystem Services and Sustainable Development*. Routledge.
- Perfecto, I., Jiménez-Soto, M. E., & Vandermeer, J. (2019). Coffee landscapes shaping the anthropocene: Forced simplification on a complex agroecological landscape. *Current Anthropology*, 60(S20), S236-S250. <https://doi.org/10.1086/703413>

ANEXOS

ANEXO 1: CERTIFICADO ANTIPLAGIO COMPILATIO

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutora del trabajo de titulación denominado " POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO Y RESILIENCIA CLIMÁTICA PARA CAFÉ AGROFORESTAL EN PALANDA, ZAMORA CHINCHIPE", bajo la modalidad de titulación EXAMEN COMPLEXIVO, elaborado por el Ing. MOREIRA MUÑOZ HENRY GONZALO, de la MAESTRÍA EN AGROPECUARIA MENCIÓN EN GESTIÓN DEL DESARROLLO RURAL SOSTENIBLE, DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio COMPILATIO, luego de haber cumplido los requisitos exigidos de valoración, el presente proyecto ejecutado, se encuentra con 4% de la valoración permitida, por consiguiente, se procede a emitir el presente informe.

 CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

**Trabajo Final - Henry
Moreira**

4%
Textos
sospechosos

- 100% Similitudes (ignorado)
- 1% similitudes entre comillas
- 0% entre las fuentes mencionadas
- 4% Idiomas no reconocidos
- 70% Textos potencialmente generados por la IA (ignorado)

Nombre del documento: TRABAJO_FINAL_MMHG.docx	Depositante: Henry Moreira	Número de palabras: 18.728
ID del documento: 392fb61a57712b75d8fb79cb1ab754407c5f243	Fecha de depósito: 16/7/2025	Número de caracteres: 133.740
Tamaño del documento original: 93,46 kb	Tipo de carga: L1 (Submisión)	
Autor: Henry Moreira	Fecha de fin de análisis: 16/7/2025	

Ubicación de las similitudes en el documento:

**SEGUNDO
BOLIER TORRES
NAVARRETE**

Firmado digitalmente por
SEGUNDO BOLIER TORRES
NAVARRETE
Fecha: 2025.07.20 16:28:09
-05'00'

Ing. Segundo Bolier Torres Navarrete, Ph.D.
C.I. 1711988855
TUTOR