

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



**ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN TRES SISTEMAS AGROFORESTALES
CON *Coffea arabica* (CAFÉ) EN EL DISTRITO SAN LUIS DE SHUARO - JUNÍN 2023**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

HUERTO PAJUELO ELDHY SIANINA

Tingo María – Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María- Perú
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°040-2026-FRNR-UNAS

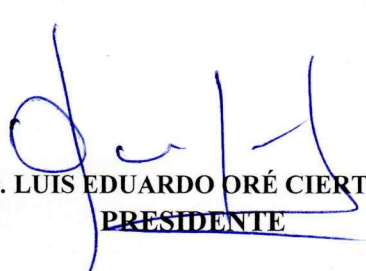
Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 11 de febrero de 2026, a horas 08:10 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN TRES SISTEMAS AGROFORESTALES CON
Coffea arabica (CAFÉ) EN EL DISTRITO SAN LUIS DE SHUARO - JUNIN 2023”**

Presentado por la Bachiller: **HUERTO PAJUELO, ELDHY SIANINA** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, la sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 15 de abril de 2026


Dr. LUIS EDUARDO ORÉ CIERTO
PRESIDENTE


Ing. MSc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO
MIEMBRO


Ing. M. Sc. MARIBEL FLORA ROCA CAPCHA
MIEMBRO


Ing. MSc. SANDRA LORENA ZAVALA GUERRERO
ASESOR



**UNAS****VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN****INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN****UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 207 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN TRES SISTEMAS AGROFORESTALES CON Coffea arabica (CAFÉ) EN EL DISTRITO SAN LUIS DE SHUARO - JUNÍN 2023	HUERTO PAJUELO ELDHY SIANINA	16 % Dieciséis	Menor a 20 %

Tingo María, 13 de julio de 2026.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO
ING. EINSTEIN X. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



**ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN TRES SISTEMAS AGROFORESTALES
CON *Coffea arabica* (CAFÉ) EN EL DISTRITO SAN LUIS DE SHUARO - JUNÍN 2023**

Autor : Bach. Huerto Pajuelo, Eldhy Sianina

Asesor : Ing. MSc. Zavala Guerrero, Sandra Lorena

Programa de investigación : Adaptación al cambio climático

Línea de investigación : Gestión ambiental

Eje temático : Fijación, captura y almacenamiento de carbono

Lugar de ejecución : Distrito San Luis de Shuaro - Junín

Duración : 6 meses

Financiamiento : S/. 12,231.00

Tingo María – Perú

2026

DEDICATORIA

A Dios, por encaminarme en los senderos de la vida, por permitirme escalar un peldaño más para mi crecimiento profesional, brindándome sabiduría, fortaleza y salud como grandes riquezas que propician el logro de mis metas.

A mis queridos padres, Avila Pajuelo Palacios y Federico Huerto Rios, por sus sabios consejos y sacrificio al darme todo lo necesario para educarme, asimismo, por brindarme su amor, paciencia y confianza.

A mis lindas hermanas, Ledhy, Yuly, Emely, Keithy y Wendy, por sus consejos y cariño que me brindan y porque cada partecita de nuestra vida juntas son un gran significado de fortaleza para poder continuar día a día.

A mis amistades, Valery, Kela, Carolina, Linda, Arel, Leodan, por su tiempo, las alegrías, el impulsarme y motivarme en el logro de mis metas.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por el regalo del día a día y por colocar a las personas adecuadas en el camino de la vida, permitiéndome el desarrollo profesional.

A la Estación Experimental Agraria (EEA) Pichanaki del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), que mediante sus colaboradores me brindaron, la oportunidad, el apoyo y las facilidades mediante las instalaciones y los medios para el desarrollo de la investigación.

A los especialistas en investigación y transferencia tecnológica de la EEA Pichanaki, Ing. Noelito Salgado Veramendi e Ing. Lorena Estefani Romero Chávez, quiénes me orientaron y asesoraron para el desarrollo de la investigación.

A los propietarios de los fundos, Andreas Christian Wörnle Vinatea, Wuiner Nestor Zevallos Rivera y Norberto Meza López, quiénes me brindaron su tiempo y las facilidades necesarias para acceder a las parcelas de investigación.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, mi alma mater, que mediante los docentes me enriquecieron con conocimiento y propiciaron mi desarrollo profesional.

A la Ing. MSc. Sandra Lorena Zavala Guerrero, asesora del presente trabajo de investigación, por sus aportes y orientación en el desarrollo de la tesis.

A los señores miembros del jurado, Dr. Luis Eduardo Oré Ciertó, Ing. MSc. Franklin Dionisio Montalvo e Ing. MSc. Maribel Flora Roca Capcha, por su tiempo, sus observaciones y aportes en el desarrollo de la tesis.

A mi familia, por sus sabios consejos, su tiempo y apoyo incondicional que me dieron fortaleza para el desarrollo de la tesis.

A mis amistades, por sus consejos, motivación y apoyo en los trámites correspondientes al desarrollo de la tesis.

INDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Antecedentes.....	3
2.1.1. Internacionales	3
2.1.2. Nacionales.....	5
2.2. Marco teórico.....	8
2.2.1. Cambio climático	8
2.2.2. Gases de efecto invernadero	9
2.2.3. Dióxido de carbono.....	10
2.2.4. Fijación del dióxido de carbono.....	11
2.2.5. Secuestro de carbono	11
2.2.6. Carbono almacenado.....	12
2.2.7. Depósitos de carbono.....	12
2.2.8. Biomasa arbórea	13
2.2.9. Biomasa no arbórea	14
2.2.10. Carbono en los suelos	14
2.2.11. Sistemas agroforestales.....	15
2.2.12. El cultivo de café	17
III. MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1. Lugar de ejecución.....	19
3.1.1. Ubicación geográfica	20
3.1.2. Ubicación política	20
3.1.3. Población y extensión geográfica	20
3.1.4. Características climáticas.....	21
3.1.5. Características del suelo.....	21
3.1.6. Características ambientales	21
3.2. Material y métodos	22
3.2.1. Materiales y equipos	22
3.2.2. Criterios de investigación	22
3.2.2.1. Tipo de investigación.....	22

3.2.2.2. Nivel de investigación.....	23
3.2.2.3. Variables de investigación	23
3.2.2.4. Operacionalización de variables	23
3.2.2.5. Diseño de investigación	24
3.2.2.6. Población y muestra	25
3.2.2.7. Tipo de muestreo.....	27
3.2.2.8. Diseño metodológico	28
3.2.2.9. Técnicas estadísticas	29
3.2.3. Metodología.....	29
3.2.3.1. Caracterización de los tres sistemas agroforestales del distrito San Luis de Shuaro	29
3.2.3.2. Evaluación del almacenamiento de carbono	31
3.2.3.3. Comparación del almacenamiento de carbono de los sistemas evaluados.....	38
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
a) Caracterización de los tres sistemas agroforestales	44
b) Evaluación del almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales	56
c) Comparación del almacenamiento de carbono de los sistemas agroforestales.....	80
d) Contrastación final de hipótesis de investigación.....	95
V. CONCLUSIONES	96
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	97
VII. REFERENCIAS.....	98
ANEXOS.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Descripción de los distintos tipos de depósitos de carbono.	12
2. Coordenadas geográficas de los sistemas evaluados.	19
3. Características básicas de los sistemas evaluados.	20
4. Operacionalización de las variables de investigación.	23
5. Tamaños de subparcela circular y los componentes evaluados.	27
6. Ecuaciones alométricas por especie.	33
7. Características agronómicas del cultivo de café.	44
8. Características agronómicas del árbol de sombra.	45
9. Resultado del análisis fisicoquímico de suelo por sistema evaluado.	48
10. Resultado de la determinación taxonómica de los árboles de sombra por sistema.	54
11. Clasificación taxonómica del árbol de sombra <i>Inga lineata</i>	54
12. Clasificación taxonómica del árbol de sombra <i>Pinus patula</i>	54
13. Clasificación taxonómica del árbol de sombra <i>Retrophyllum rospigliosii</i>	55
14. Resumen descriptivo de la biomasa estimada en el sistema de café con guaba.	57
15. Resumen descriptivo de la biomasa estimada en el sistema de café con pino.	60
16. Resumen descriptivo de la biomasa estimada en el sistema de café con ulcumano.	61
17. Resumen descriptivo de la biomasa estimada en el sistema de café sin sombra.	63
18. Resumen descriptivo del carbono almacenado en el sistema de café con guaba.	65
19. Resumen descriptivo del carbono almacenado en el sistema de café con pino.	68
20. Resumen descriptivo del carbono almacenado en el sistema de café con ulcumano.	70
21. Resumen descriptivo del carbono almacenado en el sistema de café sin sombra.	72
22. Resumen descriptivo de la tasa de fijación de carbono por sistema evaluado.	75
23. Resumen descriptivo de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente por sistema evaluado.	78
24. Promedio de los totales de biomasa, carbono, TF-C y TF-CO ₂ e por sistema evaluado.	79
25. Estimación del almacenamiento de carbono para el distrito de San Luis de Shuaro.	80
26. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos de biomasa.	81
27. Valor de “p” obtenido en la comparación de datos de la biomasa entre los sistemas.	81
28. Comparación de los datos de biomasa entre los sistemas evaluados.	82
29. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas del carbono almacenado.	84
30. Valor de “p” obtenido en la comparación de datos del carbono almacenado entre los sistemas.	85

31. Comparación de los datos de carbono almacenado entre los sistemas evaluados.....	86
32. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos de la tasa de fijación de carbono.	89
33. Valor de “p” obtenido en la comparación de datos de la tasa de fijación de carbono entre los sistemas.....	90
34. Comparación de los datos de la tasa de fijación de carbono entre los sistemas.	91
35. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente.....	92
36. Valor de “p” obtenido en la comparación de datos de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente entre los sistemas.....	92
37. Comparación de los datos de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente entre los sistemas evaluados.....	93
38. Contrastación de la hipótesis de investigación.	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Almacenes de carbono en las comunidades vegetales	13
2. Medición correcta del diámetro.....	14
3. Especificaciones técnicas del cultivo de café.....	17
4. Flujograma del diseño de la investigación.	24
5. Estructura metodológica del diseño no experimental de la investigación.....	28
6. Variantes del recorrido en zigzag en plantaciones permanentes	30
7. Sistema de cuarteos diagonales	31
8. Parámetros de C.E. (dS m^{-1}), pH, MO (%), N (%) y P (ppm) por sistema evaluado.	52
9. Parámetros de CIC y cationes cambiabiles ($\text{meq } 100\text{g}^{-1}$) por sistema evaluado.....	53
10. Composición porcentual de la biomasa total del sistema de café con guaba.	59
11. Composición porcentual de la biomasa total del sistema de café con pino.....	61
12. Composición porcentual de la biomasa total del sistema de café con ulcumano.	63
13. Composición porcentual de la biomasa total del sistema de café sin sombra.	64
14. Composición porcentual del carbono total en el sistema de café con guaba.....	67
15. Composición porcentual del carbono total en el sistema de café con pino.	69
16. Composición porcentual del carbono total en el sistema de café con ulcumano.	71
17. Composición porcentual del carbono total en el sistema de café sin sombra.	74
18. Composición porcentual de la tasa de fijación de carbono por sistema evaluado mediante barras apiladas.	77
19. Composición porcentual de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente por sistema evaluado mediante barras apiladas.	79
20. Comparación de medianas de la biomasa total entre los sistemas estudiados.	83
21. Comparación de medias y el error estándar al 95% de confianza del carbono total entre los sistemas.....	89
22. Comparación de medias y error estándar al 95% de confianza de la tasa de fijación de carbono total entre los sistemas.....	91
23. Comparación de medias y error estándar al 95% de confianza de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente total entre los sistemas.	94
24. Resultado del análisis fisicoquímico de suelo del sistema café con guaba.	109
25. Resultado del análisis fisicoquímico de suelo del sistema café con pino.....	110
26. Resultado del análisis fisicoquímico de suelo del sistema café con ulcumano.....	111
27. Resultado del análisis fisicoquímico de suelo del sistema café sin sombra.	112

28. Carbono orgánico (%) de los sistemas de café con ulcumano y café sin sombra.	113
29. Carbono orgánico (%) de los sistemas de café con ulcumano y café sin sombra (continuación).....	114
30. Carbono orgánico (%) de los sistemas de café con guaba y café con pino.	115
31. Carbono orgánico (%) de los sistemas de café con guaba y café con pino (continuación).	116
32. Constancia de determinación taxonómica de los árboles de sombra.	117
33. Clasificación taxonómica de la especie <i>Retrophyllum rospigliosii</i> (Pilg.) C. N. Page e <i>Inga lineata</i> Benth.	118
34. Clasificación taxonómica de la especie <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	119
35. Captura fotográfica de la especie <i>Inga lineata</i> Benth.	119
36. Captura fotográfica de la especie <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.....	120
37. Captura fotográfica de la especie <i>Retrophyllum rospigliosii</i> (Pilg.) C. N. Page.....	120
38. Ficha de medición del diámetro para café no podado (a 15 cm del suelo) para el SAF de CG.....	121
39. Ficha de medición del diámetro para café no podado (a 15 cm del suelo) para el SAF de CP.	122
40. Ficha de medición del diámetro para café podado (DAP a 1,30 m del suelo) para el SAF de CU.....	123
41. Ficha de medición del diámetro para café podado (DAP a 1,30 m del suelo) para el Cs	124
42. Ficha de medición del diámetro para el árbol de sombra con el uso de la forcípula para el SAF de CG.	125
43. Ficha de medición del diámetro para el árbol de sombra con el uso de la cinta métrica para el SAF de CP.	125
44. Ficha de medición del diámetro para el árbol de sombra con el uso de la cinta métrica para el SAF de CU.....	126
45. Propietario de la finca, en la que se evaluó el sistema de café con guaba.....	127
46. Propietario de la finca, en la que se evaluó el sistema de café con pino.	127
47. Encargado de la finca, en la que se evaluó el sistema de café con ulcumano y café sin sombra.	128
48. Georreferenciación y delimitación de las subparcelas de muestreo en el sistema de café con guaba.....	128
49. Recolección de muestras de arbustos/herbáceas y hojarascas en el sistema café con guaba y café con pino respectivamente.....	129

50. Recolección de muestras de suelo para densidad aparente en el sistema de café con ulcumano y café sin sombra respectivamente.	129
51. Recolección de muestras de suelo para materia orgánica en el sistema de café con guaba y café sin sombra respectivamente.	130
52. Muestras de arbustos/herbáceas y hojarascas dispuestas en la estufa para obtener el peso seco.	130
53. Peso seco de las muestras de suelo para densidad aparente.	131
54. Secado de las muestras de suelo para determinar la materia orgánica.	131
55. Tamizado de las muestras de suelo para determinar la materia orgánica.	132
56. Determinación de la materia orgánica por el método de Walkley y Black.	132
57. Recolección de muestras botánicas para su identificación taxonómica.	133
58. Capturas fotográficas de árboles de sombra para su identificación taxonómica.	133
59. Prensa botánica para la identificación taxonómica de las muestras.	134
60. Medición del diámetro de la planta de café y del árbol de sombra en el sistema de café con guaba.	134
61. Medición del diámetro de la planta de café y del árbol de sombra en el sistema de café con pino.	135
62. Medición del diámetro de la planta de café y del árbol de sombra en el sistema de café con ulcumano.	135
63. Medición del diámetro de la planta de café en el sistema de café sin sombra.	136
64. Carta de invitación para la revisión de ejecución de tesis.	137
65. Video e informe con actividades de ejecución de tesis.	138

RESUMEN

En esta investigación, el almacenamiento de carbono se evaluó en tres sistemas agroforestales (SAF) con *Coffea arabica* (café) en el distrito de San Luis de Shuaro, conformados por café con guaba (CG), café con pino (CP) y café con ulcumano (CU), sumándose a ello el sistema de control, café sin sombra (Cs); estos sistemas se caracterizaron mediante aspectos agronómicos, análisis fisicoquímico del suelo (presentando suelos francos) e identificación taxonómica de los árboles de sombra, *Inga lineata*, *Pinus patula* y *Retrophyllum rospigliosii*. Se estimaron la biomasa aérea y radicular utilizando ecuaciones alométricas, la biomasa arbustiva/herbácea y de la hojarasca en base a su materia seca; se cuantificó el carbono almacenado en la biomasa y el suelo; se estimaron las tasas de fijación de carbono (TF-C) y dióxido de carbono equivalente (TF-CO₂e) del café y los árboles.

Los resultados evidencian diferencias estadísticas significativas entre los sistemas. Para los totales de biomasa y carbono (Mg ha⁻¹), CG (209,32; 206,48) y CU (198,12; 241,12) respectivamente se registraron como los sobresalientes al presentar valores más altos. Respecto a los totales de TF-C y TF-CO₂e, el CU destaca significativamente con 11,22 y 41,17 Mg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente. Estos resultados indican que el almacenamiento de carbono es mayor en los SAF, especialmente en el CU y CG; asimismo, la asociación café-ulcumano presenta beneficios para el agricultor, dado que el árbol de sombra no perjudica la producción de biomasa del café y podría considerarse como una alternativa sostenible que contribuye a la mitigación del cambio climático.

Palabras clave: biomasa, carbono almacenado, tasa de fijación de C y CO₂e, SAF

The Carbon Storage of Three Agroforestry Systems with *Coffea arabica* (Coffee) in the San Luis de Shuaro District of Junin 2023

Abstract

In this research, the carbon storage was evaluated for three agroforestry systems (SAF – acronym in Spanish) with *Coffea arabica* (coffee) in the San Luis de Shuaro district [of Peru]; they were coffee with guava (CG), coffee with pine (CP) and coffee with ulcumano (CU), adding to this a control system of coffee without shade (Cs). These systems were characterized using agronomic aspects, physicochemical analyses of the soil (loamy soil was found) and the taxonomic identification of the shade trees, *Inga lineata*, *Pinus patula* and *Retrophyllum rospigliosii*. The aerial and root biomass were estimated using allometric equations, [and] the shrub/herbaceous biomass and the leaf litter, based on their dry matter; the carbon stored in the biomass and the soil were quantified. The carbon capture rates (TF-C) and the equivalent carbon dioxide (TF-CO₂e) from the coffee and the trees were estimated.

The results showed significant statistical differences between the systems. The total biomass and carbon (Mg ac⁻¹), CG (209.32; 206.48) and CU (198.12; 241.12), respectively, stood out since they presented the highest values. With respect to the TF-C and TF-CO₂e totals, the CU stood out significantly with 11.22 and 41.17 Mg ac⁻¹ year⁻¹, respectively. These studies indicated that the carbon storage was greater in the SAF, especially in the CU and CG; likewise, the coffee - ulcumano association presented benefits for the farmer, given that the shade tree did not impair the biomass production for the coffee and could be considered as a sustainable alternative that contributed to mitigating climate change.

Keywords: biomass, stored carbon, capture rate of C and CO₂e, SAF

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad afrontamos una situación significativa respecto al cambio climático, producida por el incremento de los gases de efecto invernadero (GEI), que como fuente de ello se tienen a las distintas actividades antropogénicas que alteran la concentración de estos gases, como el dióxido de carbono (CO₂).

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2020) informaron que los modelos globales estiman unas emisiones netas de CO₂ con $5.2 \pm 2.6 \times 10^9$ Mg año⁻¹ procedentes del uso de la tierra y el cambio de uso de la tierra durante 2007 - 2016. Asimismo, en base al INFOCARBONO, las emisiones netas en el Perú para el año 2021 fueron de 194 895 530 Mg CO₂e, parte de ello corresponde al CO₂ con 143 768 940 Mg CO₂e y respecto a la distribución de estas emisiones netas por sector, el principal emisor es “Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura” (UTCUTS) con 84 791 690 Mg CO₂e que representa el 43.51% del total de GEI generado (MINAM, 2025).

Frente a esta situación se deben plantear estrategias de adaptación y mitigación del cambio climático que propicien la seguridad alimentaria, la conservación de la biodiversidad, la lucha contra la desertificación y la degradación de la tierra; en la agricultura se deben promover prácticas de manejo del cultivo con énfasis al incremento de la materia orgánica en el suelo, el control de la erosión, la gestión mejorada de los fertilizantes, la gestión mejorada de los cultivos.

Los sistemas agroforestales (SAF) influyen en el ciclo de carbono (C), que mediante la actividad fotosintética fijan al CO₂ atmosférico y capturan el C provocando su almacenamiento dentro de sus tejidos; respecto a ello se realizaron distintas investigaciones que involucran métodos destructivos y no destructivos, en esta última se aplican ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea, complementándose a ello, se calculan la biomasa radicular, arbustiva/herbácea y de la hojarasca, que en función de estos se cuantifica el carbono almacenado, sumándose a ello el carbono orgánico del suelo; además, se estima la tasa de fijación de C y de dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

Es necesario cuantificar el carbono almacenado en los SAF porque de esta manera se hace frente a la adaptación y mitigación del cambio climático propiciándose la seguridad alimentaria, asimismo, se generan antecedentes para que en un futuro los productores puedan percibir de beneficios económicos por concepto de servicios ambientales.

Actualmente para el distrito de San Luis de Shuaro no se dispone de evidencias de investigaciones de carbono almacenado en los SAF con café mediante la aplicación de ecuaciones alométricas, por lo tanto, para la presente investigación se evaluaron tres SAF, conformados por café con guaba, café con pino y café con ulcumano, denominándolos de forma resumida para el estudio como CG, CP y CU respectivamente; estos sistemas se encuentran ubicadas en la zona de vida “bosque muy húmedo premontano tropical (bmh-PMT)” del distrito San Luis de Shuaro (INRENA, 1995), asimismo, dentro de las “zonas de recuperación” en base a la Zonificación Ecológica y Económica del distrito (MINAM, 2015), además, cabe mencionarse que la zonificación forestal se encuentra en proceso para dicho distrito.

Por consiguiente, se formuló el problema de investigación, ¿cuál es el sistema agroforestal que presentará mayor almacenamiento de carbono en el distrito de San Luis de Shuaro, Junín 2023? y se planteó la hipótesis de investigación, el sistema agroforestal conformada por café con guaba presentará mayor almacenamiento de carbono respecto a los demás sistemas de evaluación en el distrito de San Luis de Shuaro, Junín.

1.1. Objetivo general

Evaluar el almacenamiento de carbono en tres sistemas agroforestales con *Coffea arabica* (café) en el distrito San Luis de Shuaro - Junín.

1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los tres sistemas agroforestales del distrito San Luis de Shuaro.
- Evaluar el almacenamiento de carbono en los tres sistemas agroforestales del distrito San Luis de Shuaro.
- Comparar el almacenamiento de carbono de los tres sistemas agroforestales del distrito San Luis de Shuaro.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Lara et al. (2023) desarrollaron la investigación titulada “captura de carbono en cafetales del ejido Cumbres de Huicicila, Compostela, Nayarit”, en la que se plantearon como objetivo estimar la captura de carbono de la biomasa aérea de un SAF de café; evaluaron 160 árboles y 100 plantas de café y en total fueron 23 especies registradas, siendo las más representativas *Inga sp.* (71 individuos), *Cecropia obtusifolia* (21 individuos) y *Quercus castanea* (15 individuos); las especies que más aportaron a la captura de CO₂e son *Inga sp.*, *C. obtusifolia* y *Conostegia xalapensis*. Concluyeron que el secuestro de carbono en SAF con café resulta ser una estrategia básica frente al cambio climático, además, al combinar los datos de captura de carbono con las emisiones de GEI confirmaría que, la producción de café es sustentable.

Sánchez et al. (2023) desarrollaron la investigación titulada “captura de carbono en plantación forestal de laurel y sistema agroforestal laurel – café en la Provincia de San Ignacio” con el objetivo de determinar la captura de carbono en plantaciones de *Cordia alliodora* (PF) y *C. alliodora* – *C. arabica* (SAF) con dos rangos de diámetro a la altura del pecho (DAP) del laurel (<0.30 y >0.30 m) en los distritos San Ignacio y Chirinos; se aplicó el método no destructivo para el laurel y destructivo para el cafeto, el método de Walkley-Black para el carbono orgánico del suelo y mediante el secado para la hojarasca; se obtuvo que la PF ubicada en Chirinos con DAP > 0.30 m capturó mayor carbono con 482.07 Mg ha⁻¹, mientras que fue menor para el SAF en Chirinos con DAP < 0.30 m con 118.1 Mg ha⁻¹, además, se almacenó mayor carbono en la biomasa viva de las PF y en el suelo de los SAF, concluyendo que dichos sistemas juegan un papel importante como sumideros de carbono.

Valdés-Velarde et al. (2022) en su estudio “servicio ecosistémico de carbono almacenado en cafetales bajo sombra en sistema agroforestal” evaluaron el potencial de captura de carbono en la biomasa vegetal aérea, mantillo y la materia edáfica para cinco diferentes SAF, a pleno sol y especializados, estos se compararon con un bosque mesófilo de montaña y un potrero. Concluye que los SAF basados en el cultivo del café capturan carbono en promedio 245.08 Mg ha⁻¹ y la implementación, conservación de los SAF con café es vital ya que contribuye a mitigar el impacto ambiental negativo como las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Paz et al. (2022) en su investigación “caracterización de los almacenes de carbono, estructura y diversidad de los cafetales bajo sombra y vegetación natural en la sierra Madre de Chiapas, México”, nos manifiestan que en los cafetales bajo sombra, los arbustos de café arábigo son cultivados bajo árboles con distintas composiciones, que se caracteriza como una tipología de cafetales; estudiaron 72 sitios de muestreo y en cada sitio se caracterizaron los stocks de carbono, por los componentes estudiados, de biomasa aérea viva, herbáceas, biomasa subterránea muerta, árboles muertos en pie, tocones, mantillo, material leñoso caído; por la estructura (densidad arbórea por estratos de altura, densidad de cafetos y de árboles, etc.) y por la diversidad (número de especies de árboles, arbustos, otros); los resultados mostraron una capacidad limitada de discriminación de cafetales y vegetación natural, la cual se incrementa al considerar el uso de los árboles de sombra como stocks de carbono.

Manchabajoy et al. (2022) en su investigación “evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café en el departamento de Nariño” se evaluó el carbono almacenado en la biomasa aérea y bajo el suelo en cuatro sistemas productivos de café castillo (6 años) con un diseño de bloques completos al azar con tratamientos de, café a libre exposición (T1), café-limón (T2), café-guamo (T3) y café-carbonero (T4), en tres altitudes, < a 1550 msnm, entre 1550 a 2000 y > a 2000; mediante ecuaciones alométricas se obtuvo el carbono de la biomasa aérea y de raíz, luego se obtuvo el carbono en la hojarasca y el suelo. Los tratamientos presentaron diferencias altamente significativas con mayor valor en el T4 de 190.42 Mg ha⁻¹ en la biomasa aérea y de 100.14 en la biomasa bajo el suelo; concluyen que los stocks de carbono son mayores en los sistemas productivos de café con sombra que en plantaciones de café a libre exposición.

Jurado et al. (2020), en su investigación “evaluación de la captura de carbono en sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.), Consacá, Nariño, Colombia”, estimaron el carbono almacenado en la biomasa aérea y bajo el suelo de cuatro sistemas productivos de café (4 años) bajo un diseño de bloques completos al azar, a tres rangos altitudinales, I (>1800), II (1800-1600) y III (<1600 msnm) y con tratamientos de café a libre exposición (T1), café-limón (T2), café-guamo (T3) y café-carbonero (T4). Mediante ecuaciones alométricas determinaron el carbono almacenado por especie, reportando mayor almacenamiento en el rango >1800 msnm (109.81 Mg ha⁻¹) y menor en el rango <1600 msnm (42.39), sin embargo, no hubo diferencias estadísticas significativas en los sistemas, obteniéndose mayor almacenamiento en el T4 (74.82); concluyéndose que a altitudes superiores a 1800 msnm la captura de carbono es alto en sistemas de café asociados con especies leñosas.

Andrade et al. (2014) en su investigación “fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia” estimaron la biomasa área de las plantas aplicando ecuaciones alométricas disponibles para las especies de los sistemas, reportando datos de almacenamiento de carbono para el SAF con nogal cafetero (*Cordia alliodora*) con $36.7 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ en 8.4 años, para el SAF con caucho (*Hevea brasiliensis*) con $22.9 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ en 14.6 años, el SAF con plátano (*Musa AAB*) con $1.3 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ en 2.1 años y el monocultivo con $2.2 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ en 3.5 años. Asimismo, registrando la tasa media de fijación de carbono del SAF con nogal con $4.37 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, el cual superó estadísticamente a los demás sistemas y de esa manera demostraron el potencial de estos sistemas para ser incluidos en proyectos de sumidero de carbono.

2.1.2. Nacionales

Vallejos-Torres et al. (2024) estudiaron las reservas de carbono en SAF con café en la Amazonía Peruana; estimando estas reservas en los árboles aplicando ecuaciones alométricas, en la herbácea, la hojarasca y el suelo mediante muestreo y análisis de laboratorio. Teniéndose como stock de carbono para el bosque secundario con 132.2 Mg ha^{-1} , para el café con árboles de sombra de *Inga sp.* con 118.2, café con policultivo con 76.5 y la menor cantidad para café sin árboles de sombra con 31.1. El carbono secuestrado por las plantas de café en todos los SAF examinados tuvo un promedio de 2.65 Mg ha^{-1} , correspondiente al 4.63% del carbono total secuestrado, siendo mayor para el sistema de café con árboles de sombra de *Inga sp.* Estos autores indican que *Inga sp.* es un modelo compatible de sistema de sombra para cafetales, sin embargo, sugiere que se debe ampliar con más investigaciones para comprender mejor sus impactos climáticos.

Alvarez (2023) en su investigación “efecto de tres especies de sombra en las propiedades fisicoquímicas del suelo y rendimiento de café (*Coffea arabica*) Oxapampa – Pasco” estudió los sistemas de producción de café-plátano, café-pacae, café-pino y café sin sombra, en la que realizó encuestas a los agricultores reportando datos de las preferencias de la especie de los árboles de sombra para el cultivo de café, como pacae o guaba (*Inga sp.*) (42.9%), pino (*Pinus patula*) (23.8%), el cultivo de plátano (*Musa paradisiaca* L.) (14.3%), por otras especies forestales nativas (4.76%) y por café sin sombra el 9.52%; también, registra datos de las características fisicoquímicas del suelo, como la clase textural para los sistemas que presentaron suelos francos o sus variantes, el pH, la conductividad eléctrica, entre otros; además reporta datos de la nutrición de las plantas de café mediante el análisis foliar y el rendimiento del mismo.

En la investigación “carbono almacenado en el suelo de plantaciones de *Coffea arabica* establecidas en diferentes variedades en el distrito de Monzón” tuvo como objetivo, evaluar y determinar la cantidad de carbono almacenado en los suelos de variedades de *C. arabica*, como Catimor, Bourbon y Típica ubicados a 1120, 1530 y 1633 msnm respectivamente; se obtuvo alto contenido carbono en la variedad Catimor con 166.596 Mg ha⁻¹ a diferencia con los valores obtenidos de 89.047 y 87.026 Mg ha⁻¹ para las variedades de Bourbón y Typica respectivamente (Soto, 2022).

En la investigación titulada “captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú” tuvo como propósito analizar el potencial de la captura de carbono en los SAF en el Perú para lograr una agricultura sostenible, en la que se tiene información de las regiones de la amazonia peruana (Huánuco, San Martín, Ucayali, Loreto, Pasco, Amazonas, Madre de Dios y Puno) que proporcionan resultados de evaluaciones de almacenamiento de carbono (Mg ha⁻¹) y mencionan que la captura de carbono debe ser evaluado durante un periodo de tiempo y en una unidad de espacio (Mg ha⁻¹ año⁻¹); se concluye que los SAF son la mejor opción en la captura de carbono después de los bosques naturales y son considerados como una tecnología sostenible, que actualmente, evitan los efectos de la deforestación y el calentamiento global (Clemente-Arenas, 2021).

Clemente-Arenas (2021) menciona a Gonzales (2018), quién realizó su investigación de carbono almacenado en SAF de *Coffea arábica* L. (Café) en producción de 4 y 7 años en relación con la gradiente altitudinal (1000, 1400 y 1800 msnm) y su rentabilidad económica; los SAF estaban conformadas por café de variedad caturra con guaba (*Inga edulis*). Reportó datos de biomasa para 1400 msnm, con valores altos de 73.16 (4 años), 36.06 Mg ha⁻¹ (7 años) y de carbono con 73.07 (4 años) y 98.08 Mg ha⁻¹ (7 años); para 1800 msnm registró valores medios y para 1000 msnm valores bajos. Concluye que las mayores cantidades de carbono almacenado fue en la edad de 4 años para 1800 msnm con 98.88 Mg ha⁻¹ y en la edad de 7 años para 1400 msnm con 84.59 Mg ha⁻¹.

Odar (2018), citado también por Clemente-Arenas (2021), realizó la “evaluación de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café (*Coffea spp.*) en el Anexo de Vilaya, distrito de Colcamar, provincia de Luya, Amazonas, 2017-2018”; los componentes estudiados fueron la biomasa aérea viva (árboles y café), hojarasca, maleza y suelo. Reportando valores de carbono almacenado en la biomasa aérea con 26.922 Mg ha⁻¹ para el SAF café-guaba-pashaco y 16.305 para café- guaba, asimismo, presentaron un porcentaje de carbono en el suelo con 2.58% y 2.51 respectivamente.

Ehrenbergerová et al. (2016), referenciado también por Clemente-Arenas (2021), en su investigación sobre reservas de carbono en plantaciones agroforestales de café con diferentes árboles de sombra en Villa Rica, Perú; estimaron la biomasa y el carbono, para árboles y arbustos de café aplicando ecuaciones alométricas, de la hojarasca mediante muestreo de campo y análisis de laboratorio y para el suelo a una profundidad de 0.30 m. Reportando el carbono almacenado para el sitio dominado por *Inga spp.* con $119.9 \pm 19.5 \text{ Mg ha}^{-1}$, para el sitio dominado por *Pinus spp.* con 177.5 ± 14.1 , para el sitio dominado por *Eucalyptus spp.* con 162.3 ± 18.2 y para el sitio de café al sol con 99.7 ± 17.2 . Asimismo, registran que la mayor parte del carbono fue en suelo (57–99%), seguido en la biomasa de los árboles sobre el suelo (23–32%), luego en la biomasa de raíces de los árboles (8–9%), los arbustos de café (0.2–2%) y la hojarasca (1%).

En la investigación titulada “reserva de biomasa y captura del carbono de un sistema agroforestal de *Coffea arabica* L. y *Eucalyptus saligna*, Naranjillo, 2018” se determinó la biomasa y captura de carbono del sistema conformado por las especies en mención, de 4 años de edad, ubicada en la localidad de Naranjillo, provincia de Rioja, región San Martín; se establecieron tres parcelas de 100 m^2 dentro del SAF para la estimación de la biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas, dentro de estas se definió cuatro cuadrantes, dos de 1 m^2 para biomasa arbustiva y herbácea, y dos de 0.25 m^2 para hojarasca, y respecto al suelo se recolectaron muestras a una profundidad de 0 a 30 cm (una por cada parcela de 100 m^2). Se obtuvo mayor biomasa y carbono almacenado en el componente aéreo con $424.94 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $191.22 \text{ MgC ha}^{-1}$ respectivamente, respecto al componente arbustivo y herbáceo presentó valores de 2.36 Mg ha^{-1} de biomasa y 1.06 MgC ha^{-1} , en la hojarasca se estimó la biomasa en 1.24 Mg ha^{-1} y 0.56 MgC ha^{-1} almacenado, y en el suelo se obtuvo el segundo valor mayor de carbono almacenado entre los componentes evaluados con $86.99 \text{ MgC ha}^{-1}$. Se concluyó que, en promedio, el SAF presentó $428.55 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomasa y almacenó $279.83 \text{ MgC ha}^{-1}$ (Hurtado, 2019).

Silva y Olaya (2019) en su investigación “cuantificación de carbono almacenado en un sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.), asociado con guaba (*Inga edulis sp.*), distrito Jaén – Cajamarca”, cuantificaron el carbono almacenado, en la biomasa aérea (del café y guaba) mediante ecuaciones alométricas, en la necromasa (hojarasca) basándose en la metodología ICRAF 2009 y en el suelo aplicándose el método de Walkley Black, obteniéndose 22.80 Mg ha^{-1} , 6.34 y 104.13 respectivamente y en conjunto para el SAF se almacenó un total de $133.27 \text{ Mg ha}^{-1}$.

García (2019) realizó la “estimación del stock de carbono en las especies: *Retrophyllum rospigliosii* y *Prumnopitys harmsiana*, en el Bosque de Huamantanga, Jaén – 2018” con una altitud variable de 1900 a 2500 msnm; para lo cual estableció 18 parcelas de muestreo de 0.5 ha obteniendo una densidad poblacional de 103 individuos y realizó el análisis en tres intervalos de diámetro a la altura de pecho (DAP) {0.10 ; 0.50 m}, {0.50 ; 1.0 m} y {1.00 ; 1.50 m}, reportando datos para el fuste, copa y raíz, en la que no hay diferencia significativa en el stock de carbono de las dos especies, solo se distingue diferencia en los intervalos de DAP; asimismo, estimó para todo el Bosque de Huamantanga (1873.03 ha) los promedios de 10.44 MgC ha⁻¹ y 71764.76 MgCO₂e para *Retrophyllum rospigliosii* y 15.91 MgC ha⁻¹ y 109365.65 Mg CO₂e para *Prumnopitys harmsiana*.

Zavala et al. (2018a) desarrollaron una investigación titulada “estimación de la biomasa y carbono almacenado en un sistema agroforestal del cafetal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva” que tuvo como objetivo determinar la cantidad de biomasa y su contenido de carbono almacenado en el SAF de café (*C. arabica*) con guaba y otros árboles; se estimó la captura de carbono en los componentes y el suelo Inceptisols. La biomasa aérea, en árboles vivos fue de 148.10 Mg ha⁻¹, del café 51.39, de la hojarasca 12.49 y la de arbustiva 7.45, teniéndose una biomasa total de 219.43 Mg ha⁻¹ en el SAF con café, asimismo, el carbono almacenado en la biomasa de los arbustos fue de 0.95 MgC ha⁻¹; en las hojarascas de 1.90, en el café 8.42, en el componente arbóreo 25.17 y en el suelo 148.24, con un total de 184.68 MgC ha⁻¹ en el SAF con café, de los valores en mención, el mayor secuestro de carbono se dio en el componente suelo y como menor en los arbustos; se concluye que la edad del cultivo de café es un factor que influye en el stock de carbono.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Cambio climático

Los registros históricos y geológicos muestran las variaciones del clima en una amplia gama a escala temporal; a la escala pequeña (meses) las variaciones están representadas por sucesiones de periodos secos y lluviosos a lo largo del año; en cuanto a las escalas largas, como de varios siglos, están determinadas por las eras glaciares e interglaciares, como la Pequeña Edad de Hielo, correspondiente a un período frío desde comienzos del siglo XIV hasta mediados del XIX, seguido por un periodo más cálido y es el que rige en nuestros días (Benavides y León, 2007).

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) define el cambio climático como cualquier cambio en el clima con el tiempo, debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas (Benavides y León, 2007). La Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2022) informa, en base al reporte del “Sexto informe de evaluación del IPCC: Cambio Climático 2022”, que el cambio climático provocado por el hombre está causando una alteración peligrosa y generalizada en la naturaleza, lo que afecta la vida de miles de millones de personas, a pesar de los esfuerzos que se han hecho para reducir su impacto; las personas y los ecosistemas menos capaces de hacer frente a la situación son los más afectados.

Las prácticas agrícolas que incluyen los conocimientos indígenas y locales pueden contribuir a superar los desafíos del cambio climático, la seguridad alimentaria, la conservación de la biodiversidad y la lucha contra la desertificación y la degradación de la tierra, asimismo, estas prácticas de adaptación y mitigación del cambio climático incluyen el aumento de la materia orgánica del suelo, el control de la erosión, la gestión mejorada de los fertilizantes, la gestión mejorada de los cultivos (IPCC, 2020). La realidad de la caficultura de hoy en día y los cambios del clima a futuro conlleva a considerar prácticas que contribuyan la adaptación de los cafetales a cambios climáticos y socioeconómicos siendo el manejo de árboles de sombra en los cafetales, una buena estrategia frente a esta situación (Villarreyna et al., 2020).

2.2.2. Gases de efecto invernadero

a) Efecto invernadero natural

La atmósfera es un fluido constituido por diferentes tipos de gases y cada uno de ellos se comporta de manera distinta; la energía absorbida la efectúan selectivamente para diferentes longitudes de onda; la atmósfera principalmente tiene bajo poder de absorción, pero tiene un significativo poder de absorción de radiación ultravioleta o radiación de onda corta procedente del sol y el principal responsable de este fenómeno es el ozono, asimismo, la atmósfera tiene buena capacidad para absorber la radiación infrarroja o de onda larga procedente de la Tierra y los responsables en este caso son el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases traza como el metano y el óxido nitroso. Este fenómeno permite que la Tierra almacene más energía cerca de la superficie gracias a la atmósfera, este proceso es conocido como el efecto de invernadero natural, sin ella la temperatura promedio en la superficie sería aproximadamente de 18°C bajo cero y la vida en el planeta no sería posible (Benavides y León, 2007).

b) Forzamiento del efecto invernadero

Algunos gases emitidos por actividades humanas, denominados Gases de Efecto Invernadero (GEI), como el dióxido de carbono, el óxido nitroso, el metano, algunos halocarbonos (como los CFCs, HCFCs, HFCs y los PFCs), así como el ozono troposférico, son absorbentes de la radiación infrarroja; los cambios en su concentración repercuten en la absorción, dispersión y emisión de la radiación dentro de la atmósfera y en la superficie de la tierra; los resultados positivos o negativos en el balance energético debido a estos factores son expresados como forzamiento radiativo, el cual es usado como el calentamiento o enfriamiento sobre el sistema climático (Benavides y León, 2007).

2.2.3. Dióxido de carbono

Benavides y León (2007) mencionan que el dióxido de carbono es uno de los gases traza más comunes e importantes en el sistema atmósfera-océano-Tierra, este gas tiene fuentes antropogénicas y naturales; dentro del ciclo natural del carbono, el CO₂ juega un papel importante en un gran número de procesos biológicos; este GEI es el segundo más importante en el calentamiento global después del vapor de agua. El CO₂ ingresa a la atmósfera a través de la quema de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), residuos sólidos, árboles y otros materiales biológicos y así como también como resultado de ciertas reacciones químicas, como la fabricación de cemento; el CO₂ es secuestrada de la atmósfera cuando lo absorben las plantas como parte del ciclo biológico del carbono (EPA, s.f.).

La tierra es simultáneamente una fuente y un sumidero de CO₂, los modelos globales estiman unas emisiones netas de $5.2 \pm 2.6 \text{ Gt CO}_2 \text{ año}^{-1}$ (equivalente a $5.2 \pm 2.6 \times 10^9 \text{ Mg CO}_2 \text{ año}^{-1}$) procedentes del uso de la tierra y el cambio de uso de la tierra durante 2007-2016, esas emisiones se deben principalmente a la deforestación, compensada en parte por la forestación o reforestación, y a emisiones y remociones procedentes de otras actividades de uso de la tierra (IPCC, 2020). Para el año 2021, en base al INFOCARBONO, las emisiones netas en el Perú fueron de 194 895.53 kt CO₂ eq (equivalente a 194 895 530 Mg CO₂ eq) distribuyéndose por GEI con 143 768 940 Mg CO₂ eq de CO₂, 37 454 270 Mg CO₂ eq de CH₄, 12 490 250 Mg CO₂ eq de N₂O, 1 163 350 Mg CO₂ eq de HFC y 18 720 Mg CO₂ eq de SF₆. En la distribución de emisiones netas por sector, el principal emisor es “Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura” (UTCUTS) con 84 791 690 Mg CO₂ eq, que representa el 43.51% del total de GEI; seguido por Energía con 62 018 860 (31.82%); luego Agricultura con 29 773 270 (15.28%); Desechos con 10 937 980 (5.61%) y “Procesos Industriales y Uso de Productos” (PIUP) con 7 373 730 (3.78%) (MINAM, 2025).

En las últimas décadas numerosos estudios han advertido acerca de las consecuencias del cambio climático en los diferentes sectores productivos, como consecuencia, van en aumento las iniciativas destinadas a mitigar los efectos negativos del incremento progresivo de la concentración de CO₂ en la atmósfera, en un contexto de uso responsable y eficiente de los recursos, en contraposición a las actividades industriales y urbanas que causan la mayor parte de las emisiones de este gas (Iglesias et al. 2012).

2.2.4. Fijación del dióxido de carbono

El CO₂ es primordial en el equilibrio gaseoso, una fracción menor es incrementada por las emisiones volcánicas; una parte de este gas se preserva en la atmósfera, otra parte en forma de carbonatos se destinan a los océanos donde son depositados en el fondo del mar y una tercera parte es fijada por los vegetales mediante la fotosíntesis (Alvarado et al., 1999, citado por Zavala et al., 2018a); por lo tanto, este gas es absorbida de la atmósfera por las plantas, siendo las hojas los principales órganos responsables de transformar el CO₂ atmosférico en fotoasimilados (compuestos orgánicos sintetizados) (Iglesias et al., 2012).

Las reducciones de emisiones resultantes de la actividad de proyectos forestales son contabilizadas en forma de Certificados de Reducción de Emisiones (CRE's) y negociadas en el mercado internacional de carbono, un CRE corresponde a una tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) y una tonelada de carbono equivale a 3.67 toneladas de CO₂e (obtenido en razón de los pesos moleculares 44/12), para saber la cantidad de CO₂e emitido o almacenado a partir de la cantidad de carbono de un determinado depósito se debe multiplicar este por 3.67 (Rügnitz et al., 2009).

2.2.5. Secuestro de carbono

La captura de carbono por medio de la fotosíntesis produce oxígeno e hidratos de carbono, que sirven para el crecimiento de las plantas, por medio de este proceso retienen el carbono en su biomasa (Rügnitz et al., 2009), además son transferidos a otros compartimentos para su almacenamiento de manera que no pueda ser reemitido a la atmósfera (Casiano-Domínguez et al., 2018). El secuestro de carbono es un servicio ambiental en la que los ecosistemas forestales tienen la capacidad de absorber y almacenar el carbono atmosférico, evitando su conversión a ser fuentes emisoras de GEI (FONAM, 2004, citado por Zavala y Vega, 2021). Los bosques regulan el 70% del flujo de carbono entre la biósfera y la atmósfera, debido a los altos contenidos de moléculas carbónicas en la xilomasa, lignina y celulosa que están conformadas en 49% de carbono (Ávila, 2000, citado por Zavala et al., 2018a).

2.2.6. Carbono almacenado

El carbono es el elemento químico fundamental de los compuestos orgánicos, que circula por los océanos, la atmósfera, el suelo, y subsuelo, estos son considerados como depósitos (reservorios) de carbono; el carbono se traslada de un depósito a otro por medio de procesos químicos, físicos y biológicos (Rügnitz et al., 2009). Es el carbono que está acumulado en un determinado ecosistema vegetal con criterios de tipo de bosque o vegetación, datos de biomasa mediante inventarios forestales (Segura, 1997, citado por Zavala y Vega, 2021). Dicha cantidad promedio de carbono por hectárea que no será liberada a la atmósfera, considerado como un pago por el servicio ambiental de almacenamiento, se refiere a un solo pago por la conservación del bosque, evitando un cambio de uso de la tierra en forma permanente como lo son los parques nacionales o zonas de reserva absoluta (Ramírez et al., 1994, citado por Zavala y Vega, 2021).

2.2.7. Depósitos de carbono

Rügnitz et al. (2009) mencionan que, de acuerdo con la Guía de Buenas Prácticas del Uso de la Tierra, cambio del Uso de la tierra y bosques (GBP UTCUTS) se contempla cinco tipos de depósitos de carbono (tabla 1) que pueden ser medidos; asimismo, en la figura 1 son representadas mediante comunidades vegetales (adaptada de IPCC, 2003 por el Programa Mexicano del Carbono, citado por Casiano-Domínguez et al., 2018).

Tabla 1. Descripción de los distintos tipos de depósitos de carbono.

Tipo de depósito		Descripción
Biomasa viva	Biomasa sobre el suelo	Toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo, incluyendo troncos, tocones vivos, ramas, cáscaras, semillas y hojas. Para facilitar las mediciones se evalúa por separado la biomasa aérea arbórea y la biomasa aérea no arbórea.
	Biomasa subterránea	Toda la biomasa de raíces vivas. Se excluyen raíces finas de menos de 2 mm de diámetro, porque difícilmente se distinguen de la materia orgánica del suelo.
Materia orgánica muerta	Madera muerta	Toda biomasa forestal no viva: troncos caídos, árboles muertos en pie, y tocones mayores de 10 cm de diámetro.
	Hojas muertas	Toda la biomasa no viva sobre el suelo (hojas, ramas y cáscaras de frutos) en diferentes estados de descomposición. Comprende las capas de detritos y humus. Se puede establecer previamente un diámetro mínimo para diferenciar de “madera muerta” (por ejemplo, 10 cm).
Suelos	Materia orgánica del suelo	Comprende el carbono orgánico en los suelos minerales y orgánicos a una profundidad específica seleccionada por el proponente del proyecto. Raíces finas vivas con diámetro menor de 2 mm.

FUENTE: IPCC (2005), citado por Rügnitz et al. (2009).

ALMACENES DE CARBONO

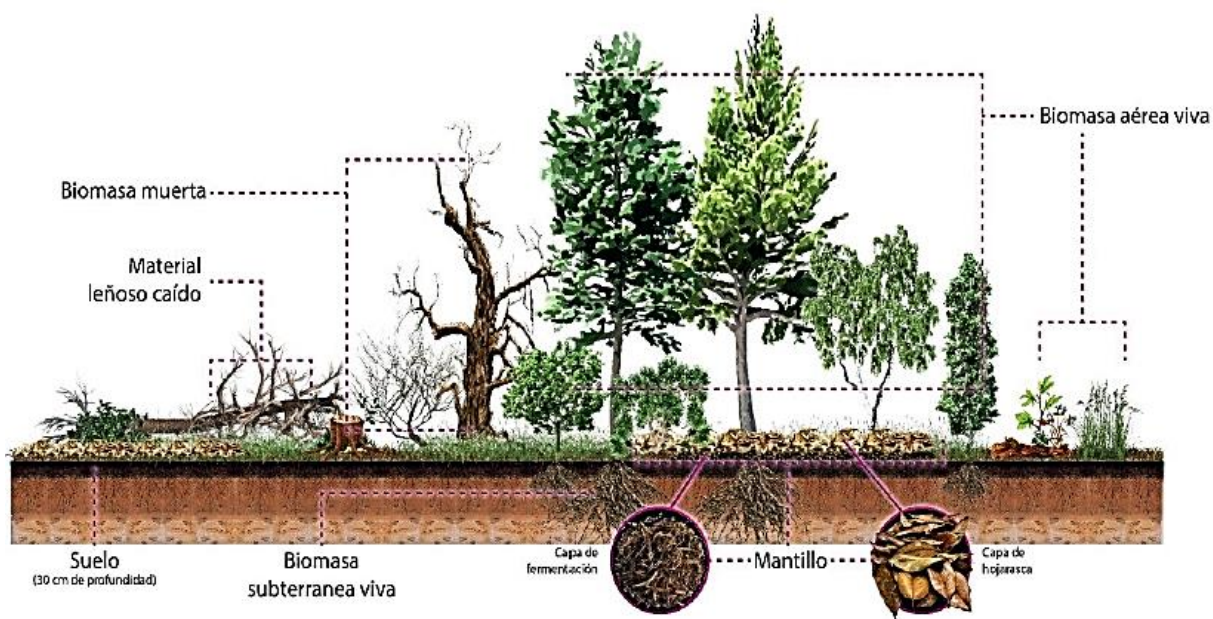


Figura 1. Almacenes de carbono en las comunidades vegetales (FUENTE: adaptada de IPCC, 2003 por el Programa Mexicano del Carbono, citado por Casiano-Domínguez et al., 2018).

2.2.8. Biomasa arbórea

Existen dos métodos para medir y estimar la biomasa arbórea sobre el suelo, el método directo (o destructivo), utilizado para la construcción de ecuaciones alométricas y factores de expansión de la biomasa, consiste en cortar uno o más individuos (árboles) para determinar la biomasa por medio del peso directo de cada uno de sus componentes (fuste, ramas y hojas) y extrapolar los resultados para el área total; el método indirecto, consiste en utilizar ecuaciones o factores de expansión que permitan relacionar algunas dimensiones básicas obtenidas en campo, de fácil medición como el diámetro; una ecuación alométrica de biomasa es una herramienta matemática que permite conocer de forma simple la cantidad de biomasa de un árbol (Rügnitz et al., 2009).

El diámetro de los árboles es medido con la corteza, a la altura del pecho (1.3 m), este diámetro se denomina DAP, la excepción son los casos particulares dados en la figura 2, en las situaciones 4, 7 y 8 la posición (b) es la correcta; la medición puede ser realizada con cinta diamétrica o con uso de una forcípula, en algunos casos, se utilizan equipos específicos como el dendrómetro de cinta (Rügnitz et al., 2009).

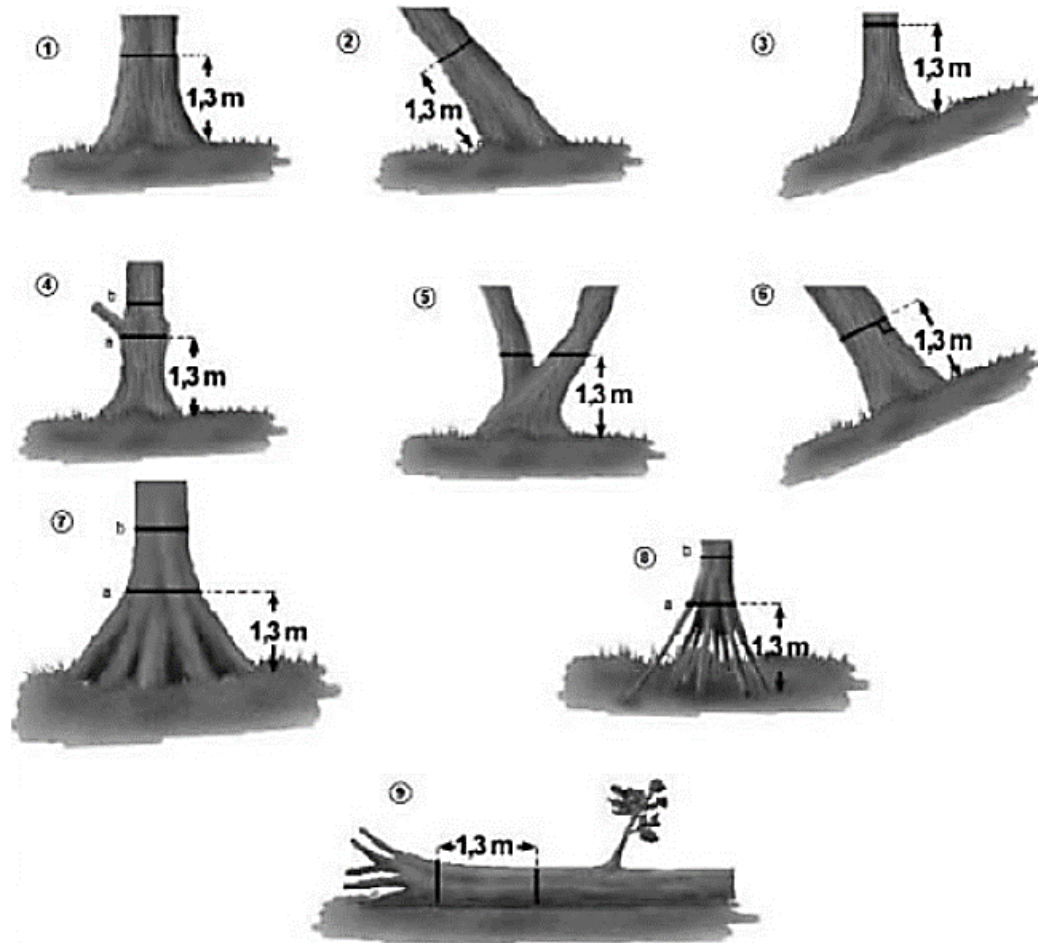


Figura 2. Medición correcta del diámetro (FUENTE: Schlegel et al., 2001, citado por Rüginitz et al., 2009).

2.2.9. Biomasa no arbórea

La vegetación no arbórea, como plantas herbáceas, arbustivas y gramíneas, está presente en todas las formas de uso del suelo (forestal, agrícola y pasturas), para el muestreo de las vegetaciones arbustivas de pequeño porte, herbáceas y gramíneas, se recomienda parcelas temporales aleatorias de 0.25m^2 ($0.50\text{m} \times 0.50\text{m}$) y para vegetación no arbórea de gran porte, una pequeña parcela de 4m^2 ($2\text{m} \times 2\text{m}$) (Rüginitz et al., 2009).

2.2.10. Carbono en los suelos

Los diferentes reservorios de carbono que existen en el suelo tienen distintos tiempos y medios de residencia, dependiendo de la composición bioquímica; por ejemplo, la lignina es más estable que la celulosa, a décadas o a más de 1000 años (fracción estable); para la fracción del carbono estable se debe hacer una distinción entre la protección física o química o captura (Cambardella, 1998, citado por Zavala y Vega, 2021).

La protección física, significa un encapsulado de los fragmentos de la materia orgánica por las partículas de arcilla o por los macro o micro agregados del suelo; la protección química, se refiere a uniones especiales de la materia orgánica con otros constituyentes del suelo coloides o arcillas; sin embargo, el término captura de carbono tal como se usa en el Protocolo de Kioto no toma en consideración esas distinciones y es equivalente al término almacenamiento de cualquier forma de carbono (Cambardella, 1998, citado por Zavala y Vega, 2021).

El carbono del suelo está presente en la forma orgánica e inorgánica, la forma orgánica, equivale a la mayor reserva en interacción con la atmósfera. El carbono orgánico presente en el suelo representa un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización); el carbono presente en el suelo está ampliamente relacionado al proceso de descomposición de la biomasa por las actividades bacterianas, parte del carbono presente en el suelo regresa a la atmósfera por la mineralización del carbono orgánico (Rügnitz et al., 2009). Si se pierde el carbono del suelo, las reservas de carbono pueden tardar mucho tiempo en recuperarse.

2.2.11. Sistemas agroforestales

Según el Decreto Supremo N° 020-2015-MINAGRI (2015), los SAF son una clase de sistemas de uso de la tierra en donde se realiza el manejo asociado de especies forestales y agropecuarias, en la que se incluyen prácticas de integración, preservación y manejo de especies leñosas perennes en sistemas productivos agrícolas anuales o perennes.

Los sistemas agroforestales (SAF), de acuerdo con Nair (1993), citado por Espinoza et al. (2012), son aquellos sistemas de uso de la tierra donde especies leñosas perennes se manejan junto con cultivos agrícolas y animales, donde se producen interacciones ecológicas y económicas entre los componentes, asimismo, son importantes reservorios de carbono respecto al tiempo. Los SAF promueven el manejo del paisaje, con árboles o arbustos interactuando con los cultivos y/o ganado, en fases temporales o secuenciales y todo ello ofrece una variedad de beneficios y servicios (Nair, 2011, citado por Clemente-Arenas, 2022). Asimismo, las considerables cantidades de carbono almacenado en la biomasa aérea de sus especies frutales y forestales podrían representar considerables ingresos económicos para los agricultores, no solo de la producción de los frutales y productos forestales sino también podrían percibir ingresos por la captura de carbono (Clemente-Arenas, 2022).

El café (*Coffea arabica*), uno de los productos agrícolas más exportados en el mundo, es producido principalmente en SAF, el manejo de árboles de sombra en un sistema de producción es una práctica de adaptación basada en ecosistemas capaces de proveer múltiples servicios ecosistémicos (Villarreyna et al., 2020). Además, esta sombra de los cafetales está compuesta mayormente por árboles y arbustos que aportan en mantener la fertilidad del suelo, reducir la erosión y contribuyen con una buena cantidad de materia orgánica mediante la hojarasca generada (González et al., 2022 y Villarreyna et al., 2020).

Asimismo, los árboles de sombra tienen un efecto en el rendimiento del café, regulan el clima dentro del cafetal (microclima), disminuyen la evaporación del agua y conservan la humedad del suelo, con un buen manejo se puede tener efectos positivos en el reciclaje de nutrientes y controlar las plagas y enfermedades, además secuestran carbono; en general la documentación de los aspectos positivos de los árboles sobre servicios de aprovisionamiento y regulación son mayores que los negativos (Villarreyna et al., 2020).

Aun así, existe todavía una comprensión limitada de cómo los árboles de sombra pueden afectar la provisión de múltiples servicios ecosistémicos y de las posibles compensaciones o sinergias entre ellos (José, 2009 y Cerda et al., 2016, citados por Villarreyna et al., 2020), debido a que también se ha documentado que pueden tener algunos efectos no deseados en el sistema si no son manejados adecuadamente; por ejemplo, el rendimiento del café bajo sombra puede ser inferior al del café a pleno sol (López-Bravo et al., 2012, mencionado por Villarreyna et al., 2020).

Es importante tomar en cuenta la elección de las especies que conformarán los SAF y se debe tener conocimientos necesarios para un manejo adecuado, sobre todo en la fase inicial, con el establecimiento de plantas juveniles que pueden ser muy vulnerables a las condiciones de campo con muchas limitantes como, la dinámica de la precipitación, altas temperaturas, la textura y fertilidad del suelo, el ataque de los insectos (Plath et al, 2011, citado por Clemente-Arenas, 2022), asimismo el área foliar y la fenología (Pallardy, 2010, mencionado por Clemente-Arenas, 2022) que pueden afectar negativamente la supervivencia de las plantas y su crecimiento óptimo.

Los SAF con café, tanto con sombra simple y con sombra diversificada, son promisorios para proveer varios servicios simultáneamente, mientras que la mayoría de los cafetales a libre exposición solo pueden ofrecer la provisión de granos de café (Cerda et al., 2016, citado por Villarreyna et al., 2020).

2.2.12. El cultivo de café

En el Perú, la producción de café tiene importancia económica, social y ambiental, y cuenta con alrededor de 425 mil ha sembradas (INEI, 2012, citado por SENAMHI, 2021). La cosecha del cultivo empieza generalmente en abril y finaliza en octubre. La superficie cultivada en la zona norte representa el 43% de la producción (Piura, Cajamarca, Amazonas y San Martín), en la zona central el 34% (Junín, Pasco, Huánuco y Ucayali) y en la zona sur el 23% (Apuurímac, Ayacucho, Cusco y Puno) (Canet et al., 2016, mencionado por SENAMHI, 2021). Se estima que unas 223 mil familias se dedican a la siembra de café y otros 2 millones de personas están incluidas en la cadena de producción de este grano (Junta Nacional del Café, 2020, citado por SENAMHI, 2021).

De acuerdo con el mapa de aptitud climática, el café se cultiva en la región tropical entre 500 a 1800 msnm, donde se presentan aptitud climática de buena y muy buena para la floración y fructificación del cultivo; sin embargo, temperaturas muy altas y escasez de lluvias condicionan la aptitud climática entre regular y mala (SENAMHI, 2021).

El MIDAGRI (2019) señala algunas especificaciones técnicas del cultivo de café, el cual se observa en la figura 3.

Nombre Común	: Café
Nombre Científico	: <i>Coffea arabica</i> L.
Familia	: Rubiaceae
Origen	: Nor-Oriente de África (Etiopia).
Regiones Naturales:	Selva Alta o Rupa Rupa (entre 1 000 a 2 000 msnm)
Departamentos	: San Martín, Junín, Cajamarca, Amazonas, Cuzco y otros
Variedades	: Arábigos (típica, caturra, catimores, pache y bourbon) y Robusta
Periodo Vegetativo:	Arbusto perenne, empieza producir: 3-4 años.

Figura 3. Especificaciones técnicas del cultivo de café (FUENTE: DGPA/DEEIA/MINAGRI, citado por MIDAGRI, 2019).

El cafeto es un arbusto perenne cuyo ciclo de vida en condiciones comerciales alcanza hasta los 20 a 25 años dependiendo de las condiciones o sistema de cultivo. A libre crecimiento, la planta comienza a producir frutos en ramas de un año, continúa su producción durante varios años y alcanza su máxima productividad entre los 6 y 8 años. La planta puede seguir su actividad por muchos años, pero con niveles de productividad bajos (Arcila et al., 2007).

El envejecimiento de la planta puede acelerarse cuando se presentan situaciones especiales de desequilibrio entre el desarrollo de la parte aérea y la zona radical, o cuando la cosecha es alta y la planta no tiene suficientes nutrimentos orgánicos y minerales para sustentarla. Un excesivo desarrollo foliar debido al exceso de fertilizante nitrogenado o a densidades de siembra por encima de las recomendadas, causan insuficiente penetración de luz al interior de la planta y reducen su período de vida útil (Arcila et al., 2007).

Un caso especial de envejecimiento prematuro del cafeto es el “paloteo”, que puede presentarse debido a la mala nutrición del cafeto, al control tardío de arvenses o al ataque grave de enfermedades que causan la defoliación severa (Arcila et al., 2007).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se ejecutó en las parcelas de sistemas agroforestales con *C. arabica* ubicadas en la zona de vida “bosque muy húmedo premontano tropical (bmh-PMT)” del distrito San Luis de Shuaro, basado en el Sistema de Clasificación de las Zonas de Vida del Mundo propuesto por el Dr. Leslie R. Holdridge, enmarcadas en las tres regiones latitudinales (tropical, subtropical y templado-cálida) que cubren al país (INRENA, 1995), asimismo, están dentro de las “zonas de recuperación” en base a la Zonificación Ecológica y Económica del distrito (MINAM, 2015), además, cabe mencionarse que la zonificación forestal se encuentra en proceso para dicho distrito.

Para más información, véase el Anexo H, referente al mapa de zonas de vida y de zonificación ecológica y económica del distrito San Luis de Shuaro. En la tabla 2 se observan las comunidades y coordenadas geográficas UTM Zona 18 Sur (WGS-84) que corresponden a cada sistema evaluado.

Tabla 2. Coordenadas geográficas de los sistemas evaluados.

Punto	Sistema evaluado	Este	Norte	Altitud	Comunidad
1	Café con guaba (CG)	477080	8802257	1369	Yapaz Bajo
2	Café con pino (CP)	475636	8804918	1392	Unión Palomar
3	Café con ulcumano (CU)	477006	8802606	1398	Yapaz Bajo
4	Café sin sombra (Cs)	477018	8802569	1390	Yapaz Bajo

Cabe mencionar, que el sistema de evaluación Café sin sombra (Cs) como monocultivo, es decir, sin la presencia de árboles de sombra, fue considerado como “control o testigo” en la evaluación del almacenamiento de carbono.

Asimismo, en la tabla 3 se observa la información básica, como la edad en años de las especies forestales y del cultivo de café, nombre del fundo y del propietario, que corresponden a cada sistema evaluado.

Tabla 3. Características básicas de los sistemas evaluados.

Nº	Sistema evaluado	Propietario	Fundo	Edad de siembra (años)	
				Café	Árbol de sombra
1	Café con guaba (CG)	Wuiner Nestor Zevallos Rivera	Caupolicán	4 años	20 años
2	Café con pino (CP)	Norberto Meza López	Los Claveles	5 años	10 años
3	Café con ulcumano (CU)	Andreas Christian Wörnle Vinatea	Roma	7 a 14 años	18 años
4	Café sin sombra (Cs)	Andreas Christian Wörnle Vinatea	Roma	6 a 13 años	-

3.1.1. Ubicación geográfica

Los sistemas evaluados se encuentran ubicadas geográficamente en el distrito de San Luis de Shuaro, dicho distrito presenta coordenadas geográficas UTM Zona 18 Sur (WGS-84) (Municipalidad Provincial de Chanchamayo, 2013):

Este : 468601
 Norte : 8796314
 Altitud : 721 m.s.n.m.

3.1.2. Ubicación política

El distrito San Luis de Shuaro, con su capital San Luis de Shuaro, se encuentra en la parte centro oriental del Perú, subregión selva central; los sistemas evaluados se ubican políticamente (Municipalidad Provincial de Chanchamayo, 2013):

Departamento : Junín.
 Provincia : Chanchamayo.
 Distrito : San Luis de Shuaro.
 Comunidades : Yapaz Bajo y Unión Palomar.

Para más información de la ubicación de los sistemas evaluados, véase el Anexo H, referente al mapa de ubicación.

3.1.3. Población y extensión geográfica

En base al Plan de Desarrollo Concertado 2013 - 2021, el Distrito San Luis de Shuaro cuenta con una población proyectada al 2023 de 8431 habitantes, calculada en base al INEI - Censos Nacionales 1993 y 2007, la densidad poblacional para el año 2007 fue de 39.3 hab./km² teniéndose como población censada 6977 habitantes y contándose con una extensión del distrito de 177.41 km² (Municipalidad Provincial de Chanchamayo, 2013).

3.1.4. Características climáticas

El distrito de San Luis de Shuaro, por la naturaleza de su topografía, presenta temperaturas variadas, según la conformación de las cadenas montañosas, que en su descenso transversal hacia la llanura amazónica presenta innumerables zonas con microclimas (Municipalidad Provincial de Chanchamayo, 2013).

San Luis de Shuaro, según el observatorio de Pichanaki Chanchamayo, se caracteriza por presentar una temperatura promedio anual máximo y mínimo que oscila de 32.9 a 20.0 °C, con una humedad relativa promedio anual de 74.7% y con precipitación pluvial promedio diario anual de 5.1 mm/día (SENAMHI, 2024) y un régimen de lluvias que ocurren entre los meses de noviembre a abril (Municipalidad Provincial de Chanchamayo, 2013).

3.1.5. Características del suelo

Está basada predominantemente en rocas metamórficas de origen calcáreo y tobas volcánicas, así como sedimentarias plegadas, disgregadas y erosionadas (Municipalidad Provincial de Chanchamayo, 2013).

San Luis de Shuaro, cuenta con una variedad de suelos por su textura como, arcillas ácidas, areniscas, cuarzosas, calizas, limonitas, rocas y grecas; materiales aluviónicos, aptos para algunos cultivos; estos suelos son apropiados para la vegetación permanente de pastos, árboles forestales, plátanos, café, cítricos, piñas, entre otros, también son adecuados para los cultivos intensivos como, maíz, frejol, yuca, hortalizas, arroz, maní, soya, etc. (Municipalidad Provincial de Chanchamayo, 2013).

3.1.6. Características ambientales

En base al Programa Municipal de Educación, Cultura y Ciudadanía Ambiental (EDUCCA) de la Municipalidad Distrital de San Luis de Shuaro (2022) informa que la población agrícola del Distrito genera también un considerable daño al suelo y a otros componentes ambientales, a causa del uso inadecuado de pesticidas y la disposición final de los envases; asimismo, existe una deforestación indiscriminada en los diferentes Anexos del distrito de San Luis de Shuaro, esto indica que un porcentaje de la población del distrito se dedica a esta actividad, generando pérdidas de bosques y alterando el ecosistema de las zonas degradadas, ya sea por desconocimiento de las responsabilidades legales, autorizaciones ante el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) y por realizar una agricultura sin responsabilidad, siendo el roce un método de realizar la limpieza de áreas de cultivo.

3.2. Material y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

Para la presente investigación se utilizaron materiales y equipos de campo, laboratorio y oficina como un aparato receptor de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) MAP 65s Garmin etrex 10, barreno muestreador de suelo, cilindro muestreador, vernier digital (rango 0 - 150 mm), forcípula forestal de aluminio (100 cm), wincha 50 m, wincha metálica de 5m, guantes de nitrilo talla S, cooler de 9 QT, balde de plástico, costal, rollos de cinta de peligro amarillo y rojo de 110 metros (para el señalamiento de los árboles de sombra y plantas de café evaluados), madera de 10cm x 7cm x 2", vara de madera de 1" x 1" x 1.30m, marco circular de madera prensada de 1.13m², bolsas de polietileno de 20.5 x 17.8 cm (para la recolección de muestras de suelo, de arbustos/herbáceas y hojarasca), navaja, poseadora recta con mango de madera, martillo, tijera podadora de mano, tijera telescópica, escalera telescópica de aluminio, prensa botánica de madera, papel periódico, cartón, cámara fotográfica digital, papel Kraft (para la colecta de muestras botánicas y el secado de muestras de arbustos/herbáceas y hojarasca), bandeja de plástico (para el secado de muestras de suelo), papel bond A4 75 g. Asimismo, los resultados de análisis de suelo y de identificación taxonómica. Además, se utilizaron herramientas de procesamiento de datos como el software ArcGIS 10.3, Microsoft Excel 2016, Microsoft Word 2016 y el software estadístico InfoStat (versión 2020e).

3.2.2. Criterios de investigación

3.2.2.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada porque se recurrió a las ciencias ambientales y agrarias, mediante la evaluación de mediciones físicas y procesamiento de muestras que permitieron cuantificar el almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales con *C. arabica* en el distrito de San Luis de Shuaro, Junín; basado en Jacobo et al. (2013), quienes indican que la investigación aplicada se efectúa con vistas a ampliar el conocimiento científico en algún campo específico de la realidad mediante la aplicación de los conocimientos teóricos de la ciencia básica para resolver problemas prácticos de interés social con la finalidad de transformar los conocimientos científicos en tecnología, técnicas, estrategias, etc.

3.2.2.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es descriptivo porque se evaluó de forma descriptiva el almacenamiento de carbono en tres sistemas agroforestales con *C. arabica* en el distrito de San Luis de Shuaro mediante la instalación de subparcelas circulares temporales; teniéndose como referente teórico a Jacobo et al. (2013), quienes indican que este nivel de investigación “consisten fundamentalmente en describir un fenómeno o una situación mediante el estudio del mismo en una circunstancia temporal espacial determinada”.

Además, se planteó como hipótesis de investigación, que el sistema agroforestal conformada por café con guaba presentaría mayor almacenamiento de carbono respecto a los demás sistemas evaluados en el distrito de San Luis de Shuaro; teniéndose como referente teórico a Hernández et al. (2010), quienes mencionan que en un estudio con alcance descriptivo solo se formulan hipótesis cuando se pronostica un hecho o dato.

3.2.2.3. Variables de investigación

Se tiene como variables de investigación:

- **Variable independiente (VI):** Sistemas agroforestales.
- **Variable dependiente (VD):** Almacenamiento de carbono.

3.2.2.4. Operacionalización de variables

La operacionalización de las variables de investigación se muestra en la tabla 4, mencionándose las dimensiones e indicadores que corresponden para medir, observar y analizar a dichas variables.

Tabla 4. Operacionalización de las variables de investigación.

Variable	Dimensión	Operacionalización	Indicador
Variable independiente (VI): Sistemas agroforestales	1. Café con guaba (CG).	*Caracterización de los sistemas.	*Características agronómicas.
	2. Café con pino (CP).		*Análisis fisicoquímico del suelo.
	3. Café con ulcumano (CU).	*Delimitación de subparcelas circulares de muestreo.	*Identificación taxonómica de los árboles de sombra.
	4. Café sin sombra (Cs) (Control).		*Componentes a evaluar en cada subparcela.

Variable	Dimensión	Operacionalización	Indicador
Variable dependiente (VD): Almacenamiento de carbono	Biomasa	*Aplicación de ecuaciones alométricas. *Materia seca.	*Aérea (Mg ha^{-1}). *Radicular (Mg ha^{-1}). *Arbustiva/herbácea (Mg ha^{-1}). *De la hojarasca (Mg ha^{-1}).
	Carbono almacenado	*Multiplicar el valor de biomasa por la fracción de C. *Toma de muestras de suelo y su análisis en laboratorio.	*Carbono almacenado en la biomasa (Mg ha^{-1}). *Carbono almacenado en el suelo (Mg ha^{-1}).
	Tasa fijación carbono	de División del C almacenado en biomasa (aérea y radicular) entre la edad promedio del componente evaluado.	*Árboles de sombra. *Plantas de café. *En $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$
	Tasa fijación dióxido carbono equivalente	de Multiplicación de la tasa de fijación de carbono con la constante 3.67 (relación de pesos moleculares de CO_2/C).	*Árboles de sombra. *Plantas de café. *En $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

FUENTE: Elaboración propia.

3.2.2.5. Diseño de investigación

La investigación es no experimental (figura 4) porque no se realizó algún cambio con la variable independiente (SAF), es decir no fue manipulada, solo fueron evaluados tal como se presentaron; basado en Hernández et al. (2010), quienes mencionan que los diseños no experimentales son “estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables y en los que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para después analizarlos”.

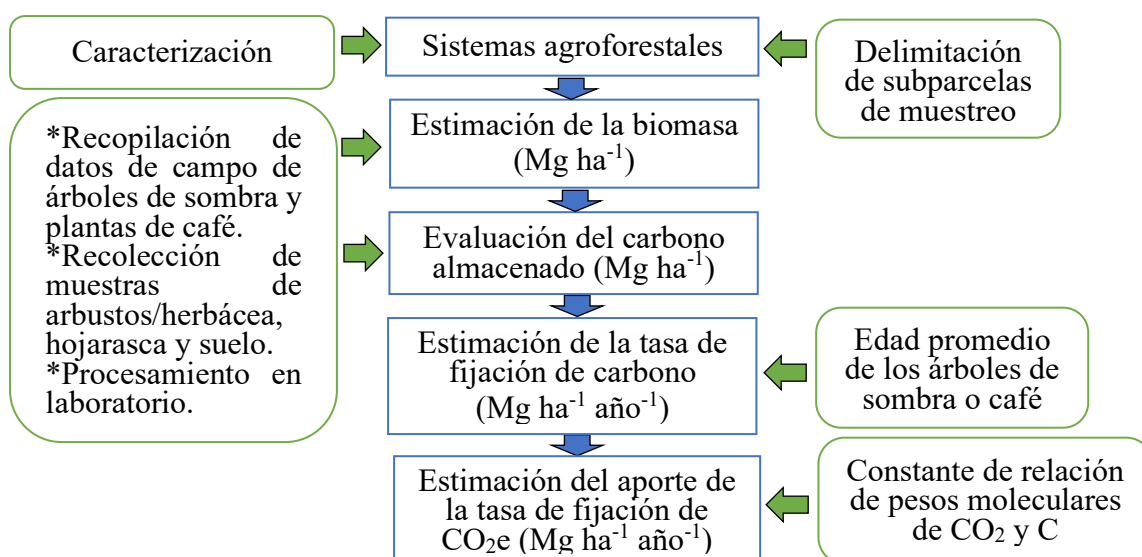


Figura 4. Flujograma del diseño de la investigación.

3.2.2.6. Población y muestra

a) Población

En base al perfil productivo regional dado por MIDAGRI (2023), reporta para el distrito de San Luis de Shuaro una superficie cosechada (áreas en producción) correspondiente al cultivo de café con valores de 4488, 4438 y 4313 ha para los años de 2020, 2021 y 2022, obteniéndose a partir ello una media de 4375.5 ha (43755000 m²).

Cabe mencionarse que, para evaluar áreas con baja densidad de árboles, Rüginitz et al. (2009) recomiendan utilizar parcelas o subparcelas circulares de muestreo de 400 m² con radio de 11.28 m y Jurado et al. (2020) de 250 m² con radio de 8.92 m, por lo tanto, para la investigación se promediaron estos valores del radio obteniéndose un resultado de 10 m aproximadamente y por ende de 314.16 m² como tamaño de las subparcelas de muestreo para los árboles de sombra del cultivo de café. Por consiguiente, se calculó la población del área de muestreo (N) (número total de parcelas o subparcelas posibles) mediante la Ecuación (1), en base a las metodologías de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO (2004) y Burkhart et al. (2019).

$$N = \frac{A}{a} \quad (1)$$

Donde:

N = Población (número total de subparcelas posibles).

A = 43755000 m², área total a muestrear.

a = 314.16 m², área de cada subparcela.

Al reemplazar los valores en dicha fórmula se obtuvo el valor de 139276.17 equivalente a 139276 subparcelas posibles a ser evaluadas (población).

b) Muestra

El tamaño de muestra para una población finita se calculó mediante la Ecuación (2), basado en la metodología de Burkhart et al. (2019), teniendo como población calculada (N) de 139276 subparcelas (unidades de muestreo posibles), un nivel de confianza de 95% (siendo el valor de t equivalente a 2), con un error de precisión (error de muestreo) de +/- 15% en base a Rüginitz et al. (2009) y al MINAM (2011), asimismo con un coeficiente de variación (CV) de 25%, basado en el cálculo del número de muestras en base al CV y al error de muestreo proporcionados por el MINAM (2011).

$$n = \frac{t^2 * CV^2 * N}{E^2 * (N - 1) + t^2 * CV^2} \quad (2)$$

Donde:

n = Tamaño de muestra (unidades de muestra evaluadas).

N = 139276 subparcelas (unidades de muestreo posibles).

t = 2 (constante que indica el valor de confianza que se asigna, para este caso, con un nivel de confianza de 95%).

CV = 0.25 (25% como valor asignado para este estudio).

E = 0.15 (15% como error de muestreo).

Al reemplazar los valores en dicha fórmula se obtuvo como tamaño de muestra el valor de 11.11, sin embargo, debido a que son 4 sistemas evaluados (los cuales cumplieron los criterios de selección) y para el estudio se requiere que la distribución de estas subparcelas sea de forma equitativa, por lo tanto, se evaluó 12 subparcelas (unidades de muestra evaluadas), siendo distribuidas 3 subparcelas por cada sistema evaluado.

Los sistemas agroforestales fueron seleccionados bajo ciertos criterios de investigación con la finalidad de reducir el sesgo en el estudio:

- ✓ Sistemas que presentaron similaridad de las características climáticas y de vegetación, al encontrarse dentro de una misma zona de vida, con la finalidad de mantener uniformidad en este aspecto.
- ✓ Sistemas conformados por *Coffea arabica* en producción asociadas a árboles de sombra de una sola especie.
- ✓ Sistemas con un distanciamiento uniforme entre las plantas de café y los árboles de sombra.
- ✓ Ubicación de un sistema control de café sin sombra en producción y con una distribución de plantas de forma uniforme.
- ✓ Sistemas con un área de 1ha para ser evaluadas.

Por lo tanto, se realizó la exploración en campo de las parcelas de café del distrito, siendo georreferenciadas y procesadas en gabinete, obteniéndose a partir de ello tres sistemas agroforestales (café con guaba, café con pino y café con ulcumano) y un sistema de café sin sombra como control que cumplieron estos criterios, las cuales fueron evaluadas de forma comparativa bajo condiciones reales de campo.

Además, en base a la metodología de Jurado et al. (2020), se trazaron dos subparcelas circulares de muestreo anidadas a la anterior en mención (314.16 m²) para evaluar los demás componentes del sistema; en la tabla 5 se observa los tamaños de las tres subparcelas circulares de muestreo (anidadas en círculo concéntrico) con los componentes que fueron evaluados en cada una.

Tabla 5. Tamaños de subparcela circular y los componentes evaluados.

Subparcela	Área (m ²)	Radio (m)	Componente evaluado
1	314.16	10.00	- Árboles de sombra: • Guaba. • Pino. • Ulcumano. - Suelo para determinar el porcentaje de materia orgánica (%MO).
2	28.27	3.00	Plantas de café.
3	1.13	0.60	- Arbustos/herbáceas. - Hojarasca. - Suelo para calcular la densidad aparente (Da).

FUENTE: Adaptado de Jurado et al. (2020).

3.2.2.7. Tipo de muestreo

Probabilístico de forma estratificada con un muestreo aleatorio sistematizado, basado al IPCC (2006) que da a conocer que “el muestreo aleatorio sistemático generalmente es superior al muestreo aleatorio simple es que las parcelas se distribuyen uniformemente por todas partes en la superficie meta”.

La estratificación del sistema evaluado se realizó en base a sus características topográficas, principalmente por la pendiente que presentaban, teniéndose 3 estratos por sistema evaluado con la finalidad de que cada subparcela sea representativa, para ello se tiene en cuenta las 30 unidades de muestra posibles para 1ha (distribuidas dentro de los 10000 m²) y se procedió a asignarles números a cada uno mediante la elaboración de mapas por cada sistema (Rügnitz et al., 2009); luego fueron seleccionadas de forma aleatoria sistemática a partir de un primer punto que fue determinado al azar (IPCC, 2006; Rügnitz et al., 2009).

Estas subparcelas temporales de muestreo (IPCC, 2006; Rügnitz et al., 2009) son localizadas en campo mediante el uso de un GPS y mediante estacas se ubicaron los tres puntos centrales (un punto por estrato) de las tres subparcelas circulares anidadas.

3.2.2.8. Diseño metodológico

En la figura 5 se observa el diseño metodológico no experimental de la investigación, comprendiendo las subparcelas muestreadas y los estratos por sistema.

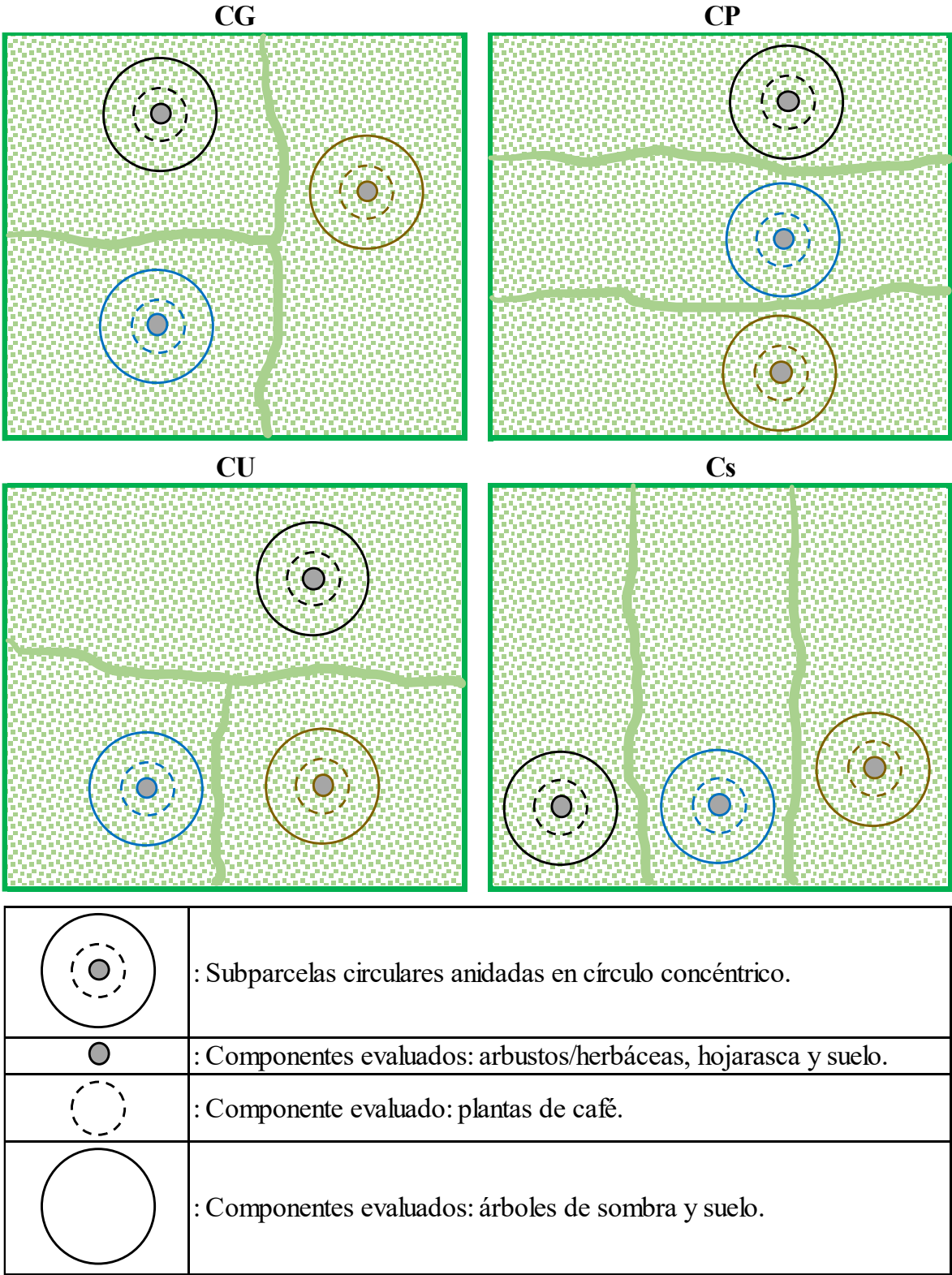


Figura 5. Estructura metodológica del diseño no experimental de la investigación.

3.2.2.9. Técnicas estadísticas

Se utilizó la estadística descriptiva, ya que los resultados fueron expresados mediante la media, mediana, coeficiente de variación, desviación estándar, error estándar, valores mínimos y máximos; estos fueron procesados mediante el software estadístico InfoStat (versión 2020e), los resultados se presentaron mediante tablas, en dónde se analizó e interpretó los datos obtenidos y posteriormente representados mediante figuras (gráficos); teniendo como referente teórico a Jacobo et al. (2013), quienes señalan que “la estadística descriptiva ofrece técnicas para organizar y resumir la información acerca de un conjunto de datos”, asimismo, que las tablas y los gráficos son las técnicas principales para la presentación de estos.

Además, se realizó la estadística inferencial de los datos, para ello se aplicó la prueba de normalidad de los datos mediante Shapiro-Wilks (modificado), luego se realizó la prueba de Levene para conocer la homogeneidad de varianzas y en base a los resultados del valor de “p” se seleccionó el tipo de prueba para comparar tres o más grupos independientes, ya sea la prueba paramétrica (ANOVA de 1 vía con la prueba comparativa de Tukey) o no paramétrica (Kruskall Wallis) utilizando el software estadístico InfoStat y los resultados se presentaron mediante tablas y figuras que fueron analizadas e interpretadas. Sustentado en Hernández et al. (2010) quienes mencionan que la estadística inferencial se utiliza para probar hipótesis y generalizar los resultados obtenidos en la muestra a la población.

3.2.3. Metodología

3.2.3.1. Caracterización de los tres sistemas agroforestales del distrito San Luis de Shuaro

Los sistemas agroforestales se describieron mediante sus características agronómicas, el análisis fisicoquímico del suelo y la identificación taxonómica de los árboles de sombra.

a) Características agronómicas

En cada sistema evaluado se realizó las mediciones en campo para describir cualitativamente el sistema de siembra y cuantitativamente la distancia de siembra y densidad de siembra (número de plantas por hectárea) (Jurado et al., 2020), la edad de los árboles de sombra y del cultivo de café (Marín et al., 2016) y la poda de las plantas de café, estas características también están comprendidas en base a los “lineamientos técnicos para el manejo forestal en concesiones para plantaciones y contratos de cesión en uso para sistemas agroforestales” (Decreto Supremo N° 020-2015-MINAGRI, 2015).

b) Análisis físicoquímico del suelo

Se realizó el muestreo del suelo en cada sistema evaluado, recorriendo al azar la parcela de 1ha en forma de zigzag (figura 6) y cada 15 o 30 pasos se ubicó un punto de muestreo, para este caso de plantación permanente (café) fue ubicado al lado de una planta, por lo tanto, se procedió a limpiar la superficie de terreno para coleccionar una submuestra a una profundidad recomendada para cultivos permanentes como cacao, café y palma de 0 a 30 cm, mediante el uso de un barreno muestreador (INIA, s.f.; Prialé, 2016).

Se completaron hasta 30 submuestras que fueron depositadas en un balde de plástico; luego, el sustrato fue colocado en un costal para reducirla a un peso de 1kg (muestra compuesta) a través del sistema de cuarteos diagonales (figura 7), en la que se descartan los lados opuestos; seguidamente fue colocada en una bolsa de polietileno con su respectiva etiqueta, en la que se registra un código o número que la distinga, el nombre del propietario y del fundo, departamento, provincia, distrito, localidad, superficie (ha) muestreada, profundidad de muestreo (INIA, s.f.; Prialé, 2016).

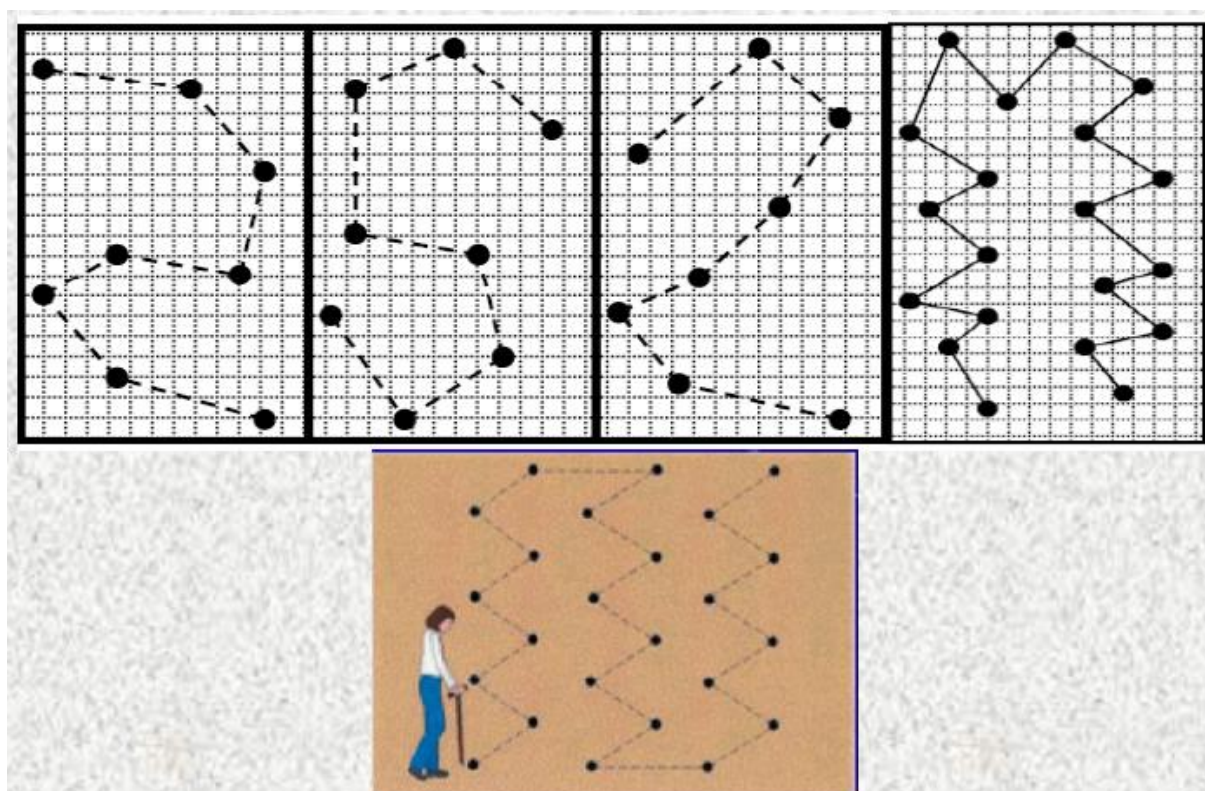


Figura 6. Variantes del recorrido en zigzag en plantaciones permanentes (FUENTE: Prialé, 2016).

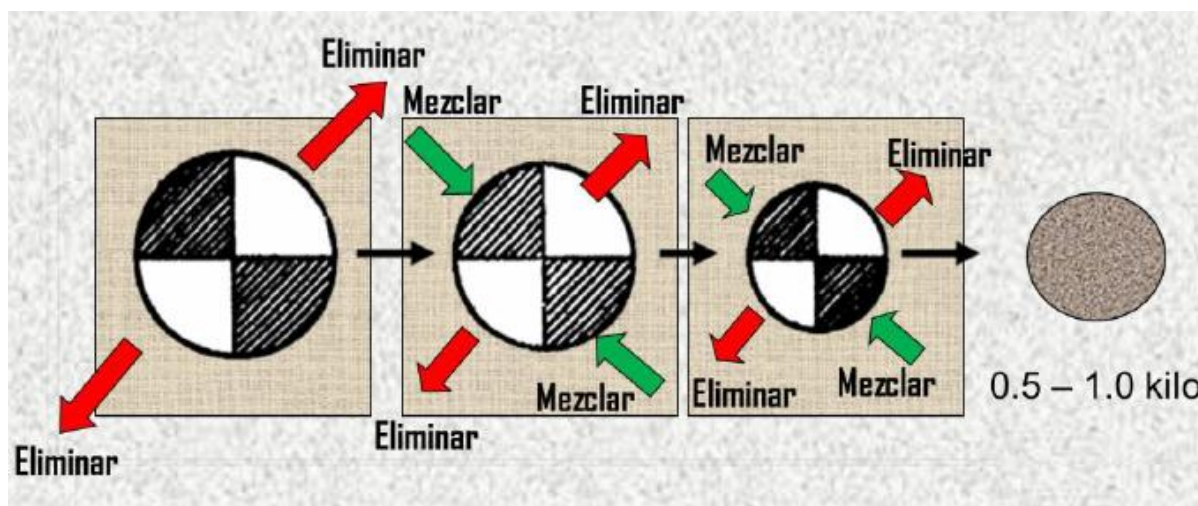


Figura 7. Sistema de cuarteos diagonales (FUENTE: Priale, 2016).

Estas muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliare (LABSAF) de la Estación Experimental Agraria (EEA) Pichanaki - Junín del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), obteniéndose como resultado el análisis físicoquímico (clase textural, pH, nitrógeno, fósforo, potasio, entre otros).

c) Identificación taxonómica de los árboles de sombra

En cada sistema agroforestal (SAF) se realizó la colecta botánica de los árboles de sombra mediante el método tradicional de herborización que incluye la recolección, codificación, prensado, preservado, secado y conservación de los especímenes; asimismo, se realizaron las capturas fotográficas de las distintas partes u órganos (fuste, corteza, ramas, hojas jóvenes y maduras, inflorescencias, flores, frutos y entre otras características necesarias) del árbol para la determinación de la especie (SERFOR, 2023).

Las muestras (especímenes) e imágenes fotográficas fueron enviadas al Herbario del Departamento de Biología de la Universidad Nacional Agraria La Molina (MOL) para su respectivo estudio, análisis y determinación taxonómica.

3.2.3.2. Evaluación del almacenamiento de carbono

Para la evaluación del almacenamiento de carbono en los sistemas evaluados se procedió a estimar el aporte de biomasa, seguido por la evaluación del carbono almacenado (biomasa y suelo), posteriormente la estimación de la tasa de fijación de carbono y del aporte de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente.

Luego de realizar los cálculos en base a las fórmulas, los datos obtenidos fueron procesados estadísticamente realizándose un resumen descriptivo del mismo, mediante la elaboración de una tabla considerándose los datos de muestra u observaciones realizadas (n), la media, desviación estándar (DE), error estándar (EE), coeficiente de variación (CV), valores mínimo y máximo, mediana; que permitieron entender la variabilidad de los datos en los diferentes sistemas evaluados, asimismo, se realizó el gráfico de composición porcentual para cada sistema.

a) Estimación del aporte de biomasa

Se estimó la biomasa y para ello se tuvo en cuenta, la biomasa aérea y radicular de las plantas de café y los árboles de sombra, asimismo, la biomasa arbustiva/herbácea y de la hojarasca, posteriormente se adicionaron los valores obtenidos para la biomasa total (Mg ha^{-1}) por cada sistema evaluado.

- Biomasa aérea

Se empleó el método no destructivo mediante la aplicación de ecuaciones alométricas que corresponden a cada especie de árboles de sombra y al cultivo de café (tabla 6); para la elección de estas ecuaciones, se tuvo en cuenta, un alto coeficiente de determinación (R^2), asimismo, en base a Rügnitz et al. (2009), que hayan sido desarrolladas en localidades con características climáticas similares a la zona de investigación y que el rango del diámetro de los individuos evaluados para generar estas ecuaciones sean semejantes a las evaluadas en esta investigación.

Se realizaron mediciones de los árboles de sombra, recopilándose datos de diámetro a la altura del pecho (DAP) a 130 cm del suelo, utilizándose la forcípula o cinta métrica, en las tres subparcelas circulares de 314.16 m^2 distribuidas al azar dentro del sistema evaluado; asimismo, para café podado se realizó mediciones de DAP y de diámetro a 15 cm del suelo (D_{15}) para café no podado, utilizándose el vernier digital, en las tres subparcelas circulares (anidadas a las anteriores subparcelas en mención) con un área de 28.27 m^2 (metodología basada en Rügnitz et al., 2009 y Jurado et al., 2020).

Los valores obtenidos de biomasa aérea (BA) por cada subparcela de muestreo fueron expresados en unidades de Mg ha^{-1} , para ello se tiene en cuenta la densidad de siembra de los árboles de sombra y del cultivo de café, tanto para el cálculo del número de individuos a estudiar por subparcela y al aproximarlos a una hectárea.

Tabla 6. Ecuaciones alométricas por especie.

Ecuación alométrica	Especie	Observación
$BA = 0.2811 * (DAP^{2.0635})$ (3) $R^2 = 0.9455$ Fuente: Van Noordwijk et al. (2002); Marroquín et al. (2024).	<i>C. arabica</i>	Aplicable para plantas podadas. DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm). BA = Biomasa aérea (kg planta ⁻¹).
$BA = (0.1955 * D_{15}^{1.648}) * 1.266$ (4) $R^2 = 0.93$ Fuente: Quilio et al. (2010), mencionado por Jurado et al. (2020).	<i>C. arabica</i>	Aplicable para plantas no podadas. D ₁₅ = Diámetro a 15 cm del suelo (cm). BA = Biomasa aérea (kg planta ⁻¹).
$BA = 0.01513 * DAP^{3.0054}$ (5) $R^2 = 0.94$ Fuente: Quilio et al. (2010), citado por Jurado et al. (2020).	<i>Inga sp.</i>	DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm). BA = Biomasa aérea (kg árbol ⁻¹).
$BA = 0.407073 * (DAP^{2.026167})$ (6) $R^2 = 0.98$ Fuente: Rodríguez-Laguna et al. (2009); Rojas et al. (2015).	<i>Pinus patula</i>	DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm). BA = Biomasa aérea (kg árbol ⁻¹).
$BA = 0.1184 * (DAP^{2.53})$ (7) Fuente: Callo et al. (2002); Arevalo et al. (2002); Zavala et al. (2018b).	<i>Retrophyllum rospiblosii</i>	Fórmula general para biomasa de árboles. DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm). BA = Biomasa aérea (kg árbol ⁻¹).

Fuente: Basado en los diferentes autores en mención.

- Biomasa radicular

Para la estimación de la biomasa radicular o de raíces de los árboles de sombra, se aplicó la Ecuación (8), un modelo para zonas tropicales que emplea la biomasa aérea y fue desarrollada por Cairns et al. (1997) y recomendada por el IPCC (2005), asimismo, mencionada por Rüginitz et al. (2009) y utilizada por Marín et al. (2016) en el desarrollo de su investigación. Por otro lado, teniéndose en cuenta que el cafeto es un arbusto perenne (MIDAGRI, 2019), para el cálculo de su biomasa radicular se tuvo en cuenta la relación (R), biomasa subterránea/biomasa aérea, con un valor de 0.40 para arbustos tropicales (IPCC, 2006).

$$BR = \exp(-1.0587 + 0.8836 * \ln(BA)) \quad ; \quad R^2 = 0.84 \quad (8)$$

Donde:

BR = Biomasa radicular o de raíces (Mg ha^{-1}).

BA = Biomasa aérea (Mg ha^{-1}).

- **Biomasa arbustiva/herbácea y de la hojarasca**

Para la biomasa arbustiva/herbácea (Bah) se consideraron a los arbustos con tallos menores de 2.5 cm de diámetro, incluyéndose las gramíneas y otras hierbas, las cuales fueron cortadas al nivel del suelo (Zavala et al., 2018b), estas se encontraban dentro de la subparcela circular de muestreo de 1.13 m^2 (anidada a la subparcela de 28.27 m^2); las muestras fueron recolectadas en bolsas de polietileno transparente debidamente rotuladas y fueron trasladadas al LABSAF de la EEA Pichanaki, procediéndose a registrar el peso fresco total haciendo uso de la balanza analítica, del cual se sustrajo una submuestra de 100 g, colocándolas en papel Kraft (debidamente rotuladas) y disponiéndolas en la estufa por 72 horas a una temperatura de 75°C , hasta obtener el peso seco constante (Cuellar y Salazar, 2016; Zavala et al., 2018b).

Después de haber recolectado las muestras de arbustos/herbáceas, para la estimación de la biomasa de la hojarasca (Bh), en la misma subparcela circular, se procedió a recoger la hojarasca, conformada por las hojas, ramillas, ramas, frutos, semillas, rastrojos y la capa de mantillo en diferentes estados de descomposición (Zavala et al., 2018b; Jurado et al., 2020), las cuales se caracterizan por presentar un tamaño menor que el diámetro mínimo de 10 cm para madera muerta (dispuesta superficialmente en el suelo) y mayor a 2 mm (IPCC, 2006).

Las muestras de hojarasca fueron recolectadas en bolsas de polietileno y trasladadas al LABSAF de la EEA Pichanaki, siendo procesadas de la misma manera que los arbustos/herbáceas, con la diferencia de que fueron colocadas en la estufa por un tiempo de 48 horas hasta obtenerse el peso seco constante (Cuellar y Salazar, 2016; Zavala et al., 2018b; Jurado et al., 2020).

Ambas biomásas fueron expresadas en Mg ha^{-1} en base a la Ecuación (9), modificada de Arevalo et al. (2002) y Zavala et al. (2018b).

$$Bah \text{ y } Bh = ((PSM/PFM) * PFT) * (1/A) * 0.01 \quad (9)$$

Dónde:

Bah = Biomasa arbustiva/herbácea, materia seca ($Mg \text{ ha}^{-1}$).

Bh = Biomasa de la hojarasca, materia seca ($Mg \text{ ha}^{-1}$).

PSM = Peso seco de la muestra colectada (g).

PFM = Peso fresco de la muestra colectada (g).

PFT = Peso fresco total (g).

A = Área de muestreo (m^2).

0.01 = Factor de conversión.

b) Evaluación del carbono almacenado

Se adicionaron los valores obtenidos de carbono almacenado en la biomasa (aérea, radicular, arbustiva/herbácea y de la hojarasca) y de carbono almacenado en el suelo, obteniéndose así el carbono total almacenado ($Mg \text{ ha}^{-1}$) por cada sistema evaluado.

- Carbono almacenado en la biomasa

El valor obtenido de la biomasa, tanto aérea, radicular, arbustiva/herbácea y de la hojarasca de los diferentes sistemas evaluados, fueron multiplicados por la fracción de carbono (FC); el IPCC (2006) recomienda, en base a los trabajos de investigación, que el valor de la FC se encuentre dentro del rango de 0.2 y 0.5 y que el valor por defecto de éste, para los árboles de sombra es de 0.47 y para hojarasca es 0.37. El valor de la FC para las plantas de café es de 0.4718 (Marroquín et al., 2024) y para arbustos/herbáceas se trabajó con un valor promedio de 0.44 (Razo et al., 2018).

- Carbono almacenado en el suelo

En las tres subparcelas circulares de muestreo de 1.13 m^2 , cada una anidada a la subparcela de 28.27 m^2 , se realizó una pequeña calicata de 0.3 m de profundidad, donde se definieron las tres capas u horizontes de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm y de 20 a 30 cm (Rügnitz et al., 2009; Zavala et al., 2018b) en donde se recolectaron las muestras para calcular la densidad aparente del suelo (D_a) y el peso del volumen de suelo (PVs). Posteriormente en las subparcelas circulares de 314.16 m^2 se recolectaron muestras para determinar el porcentaje de carbono orgánico (%CO). En base a ello se cuantificó el carbono almacenado ($Mg \text{ ha}^{-1}$) en este componente estudiado mediante la Ecuación 10 (Arevalo et al., 2002; Zavala et al., 2018b).

$$C\text{-suelo} = (PVs * \%CO)/100 \quad (10)$$

Dónde:

C-suelo = Carbono almacenado en el suelo ($Mg\ ha^{-1}$).

PVs = Peso del volumen de suelo ($Mg\ ha^{-1}$).

%CO = Porcentaje de carbono orgánico en el suelo (%).

100 = Factor de corrección.

• Cálculo de la densidad aparente del suelo

Se recolectó una muestra de suelo por horizonte mediante el uso de cilindros metálicos de muestreo con volumen conocido, y luego fueron llevadas al LABSAF de la EEA Pichanaki, procediéndose a disponerlas a la estufa por 24 horas a $105^{\circ}C$ hasta obtener el peso seco constante (Rügnitz et al., 2009; Cuellar y Salazar, 2016; Zavala et al., 2018b). Los valores obtenidos de la Da por horizonte de una calicata, mediante la aplicación de la Ecuación 11 (Arevalo et al., 2002; Rügnitz et al., 2009; Cuellar y Salazar, 2016; Zavala et al., 2018b), fue promediada, obteniéndose así la Da por cada subparcela de muestreo.

$$Da = PSN/VC \quad (11)$$

Dónde:

Da = Densidad aparente del suelo (g/cm^3).

PSN = Peso seco neto del suelo (g).

VC = Volumen del cilindro (constante) (cm^3).

• Cálculo del peso del volumen de suelo

Una vez calculado el valor promedio de la Da por calicata, se procedió a calcular el PVs, mediante la aplicación de la Ecuación 12 (Arevalo et al., 2002; Cuellar y Salazar, 2016; Zavala et al., 2018b). La profundidad del suelo estudiado va de 0 a 30 cm (IPCC, 2006; Rügnitz et al., 2009; Jurado et al., 2020), por lo tanto, se obtuvieron los valores de PVs ($Mg\ ha^{-1}$).

$$PVs = Da * Ps * 10\ 000 \quad (12)$$

Dónde:

PVs = Peso del volumen de suelo ($Mg\ ha^{-1}$).

Da = Densidad aparente del suelo ($Mg\ m^{-3}$).

Ps = Profundidad del horizonte del suelo (m).

10 000 = Área de una hectárea de terreno (constante).

- **Porcentaje de carbono orgánico en el suelo**

Se realizó la extracción de submuestras de suelo en diferentes puntos distribuidos al azar en la subparcela circular de 314.16 m², a una profundidad que va de 0 a 30 cm, siendo depositadas en un balde hasta obtener 1 kg de muestra compuesta (Jurado et al., 2020) para ello se utilizó un barreno muestreador (Rügnitz et al., 2009).

Posteriormente, las muestras fueron colocadas en bolsas de polietileno transparente debidamente rotuladas y luego fueron trasladadas al LABSAF de la EEA Pichanaki, procediéndose a disponerlas a secar en el área de pretratamiento de suelos, mediante el uso de bandejas plásticas rotuladas, después fueron tamizadas, haciéndose uso del tamiz malla N°10 - 2mm de espesor (Cuellar y Salazar, 2016), dicho tamaño es sugerido como límite de diámetro establecido para determinar la materia orgánica del suelo (IPCC, 2006), para ello las muestras fueron analizadas en base a Walkley y Black (1934) con el método químico de oxidación húmeda, obteniéndose como resultado el porcentaje de materia orgánica (%MO).

Luego, el porcentaje de carbono orgánico en el suelo (%CO) fue calculado mediante la Ecuación 13 (Cuellar y Salazar, 2016) en la que se aplica el factor 1.724 propuesta por Van Bemmelen (1890), asimismo, es utilizada por Eyherabide et al. (2014) en el desarrollo de su investigación.

$$\%CO = \%MO/1.724 \quad (13)$$

Dónde:

%CO = Porcentaje de carbono orgánico en el suelo (%).

%MO = Porcentaje de materia orgánica (%).

1.724 = Factor de Van Bemmelen.

c) Estimación de la tasa de fijación de carbono

La tasa de fijación de carbono (TF-C) en cada sistema evaluado se obtuvo a partir de la división entre el valor obtenido de carbono almacenado en la biomasa (aérea y radicular) y la edad promedio de los árboles de sombra o del cultivo de café, esta edad fue proporcionada por el propietario o administrador del fundo; basado en la metodología de Marín et al. (2016). Posteriormente se adicionaron las tasas de fijación de los árboles de sombra y del café para la obtención de la TF-C total por sistema.

$$TF-C = \frac{C_{BA} + C_{BR}}{\bar{E}_c} \quad (14)$$

Donde:

TF-C = Tasa de fijación de carbono (Mg C ha⁻¹ año⁻¹).

C_{BA} = Carbono almacenado en la biomasa aérea (Mg C ha⁻¹).

C_{BR} = Carbono almacenado en la biomasa radicular (MgC ha⁻¹).

$\bar{E}_c$ = Edad promedio del componente evaluado (años).

d) Estimación del aporte de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente

La tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente (TF-CO₂e) fue estimada a través de la multiplicación de la TF-C por la constante de relación de pesos moleculares del CO₂ y C, teniéndose el valor de 44/12 o 3.67 proporcionado por el IPCC (2006), basado en las metodologías de Rüginitz et al. (2009), Cuellar y Salazar (2016) y Marín et al. (2016). Posteriormente se adicionaron las tasas de fijación de los árboles de sombra y del café para la obtención de la TF-CO₂e total por sistema.

$$TF-CO_2e = TF-C * 3.67 \quad (15)$$

Donde:

TF-CO₂e = Tasa de fijación de CO₂e (Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹).

TF-C = Tasa de fijación de carbono (Mg C ha⁻¹ año⁻¹).

3.67 = Constante.

3.2.3.3. Comparación del almacenamiento de carbono de los sistemas evaluados

El almacenamiento de carbono de los sistemas evaluados fue evaluado en base al procesamiento de los datos de las cuatro dimensiones de esta variable, biomasa (aérea, radicular, arbustiva/herbácea y de la hojarasca) por cada sistema, seguido por el carbono almacenado (biomasa y suelo), luego la tasa de fijación de carbono (café y árboles de sombra) y la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente (café y árboles de sombra).

Para la comparación entre los sistemas, en base a las dimensiones antes mencionadas, se realizó la prueba de normalidad de los datos aplicándose la prueba estadística de Shapiro-Wilks (modificado). Luego, se procedió a realizar la prueba de Levene para conocer la homogeneidad de varianzas entre los grupos. En función a los resultados obtenidos (el valor de “p”) en las dos anteriores pruebas, se procedió a decidir la aplicación de la prueba paramétrica o no paramétrica para conocer las diferencias estadísticas entre los sistemas. Para cada prueba estadística se plantearon las hipótesis correspondientes.

a) Biomasa

Se planteó las hipótesis para la prueba de normalidad de los datos de biomasa, aplicándose la prueba estadística de Shapiro-Wilks (modificado) y en base al valor de “p” obtenido se realiza su interpretación:

- **Hipótesis nula (H_0):** Los datos de biomasa (Mg ha^{-1}) siguen una distribución normal.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Los datos de biomasa (Mg ha^{-1}) no siguen una distribución normal.
- **Nivel de significancia:** $\alpha = 0.05$
- **Si: $p > 0.05$:** aceptamos la hipótesis nula (H_0).
- **Si: $p \leq 0.05$:** rechazamos la hipótesis nula (H_0).

Luego, se aplicó la prueba de Levene, que confirma la aplicación de la prueba paramétrica o no paramétrica al obtenerse el valor de p, para ello se planteó las hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** No existe diferencias entre las varianzas de biomasa de los sistemas evaluados (varianzas homogéneas).
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Existe diferencias entre las varianzas de biomasa de los sistemas evaluados (varianzas heterogéneas).
- **Nivel de significancia:** $\alpha = 0.05$
- **Si: $p > 0.05$:** aceptamos la hipótesis nula (H_0).
- **Si: $p \leq 0.05$:** rechazamos la hipótesis nula (H_0).

En base a estas pruebas estadísticas realizadas, se procedió a elegir la prueba paramétrica de análisis de la varianza (ANOVA) de 1 vía con la prueba comparativa de Tukey, o la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis para comparar tres o más grupos independientes, para ello se planteó las hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** No hay diferencias significativas en la biomasa (Mg ha^{-1}) entre los sistemas evaluados.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Existe diferencias significativas en la biomasa (Mg ha^{-1}) entre los sistemas evaluados.
- **Nivel de significancia:** $\alpha = 0.05$
- **Si: $p > 0.05$:** aceptamos la hipótesis nula (H_0).
- **Si: $p \leq 0.05$:** rechazamos la hipótesis nula (H_0).

b) Carbono almacenado

Se planteó las hipótesis para la prueba de normalidad de los datos de carbono almacenado:

- **Hipótesis nula (H_0):** Los datos de carbono almacenado (Mg ha^{-1}) siguen una distribución normal.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Los datos de carbono almacenado (Mg ha^{-1}) no siguen una distribución normal.
- **Nivel de significancia:** $\alpha = 0.05$
- **Si: $p > 0.05$:** aceptamos la hipótesis nula (H_0).
- **Si: $p \leq 0.05$:** rechazamos la hipótesis nula (H_0).

Luego se aplicó la prueba de Levene, que confirma la aplicación de la prueba paramétrica o no paramétrica al obtenerse el valor de p , para ello se planteó las hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** No existe diferencias entre las varianzas de carbono almacenado de los sistemas evaluados (varianzas homogéneas).
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Existe diferencias entre las varianzas de carbono almacenado de los sistemas evaluados (varianzas heterogéneas).
- **Nivel de significancia:** $\alpha = 0.05$
- **Si: $p > 0.05$:** aceptamos la hipótesis nula (H_0).
- **Si: $p \leq 0.05$:** rechazamos la hipótesis nula (H_0).

En base a estas pruebas estadísticas, se procedió a optar por la prueba, para comparar tres o más grupos independientes, paramétrica (ANOVA de 1 vía con la prueba comparativa de Tukey) o no paramétrica (Kruskal Wallis), planteándose las hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** No hay diferencias significativas en el carbono almacenado (Mg ha^{-1}) entre los sistemas evaluados.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Existe diferencias significativas en el carbono almacenado (Mg ha^{-1}) entre los sistemas evaluados.
- **Nivel de significancia:** $\alpha = 0.05$
- **Si: $p > 0.05$:** aceptamos la hipótesis nula (H_0).
- **Si: $p \leq 0.05$:** rechazamos la hipótesis nula (H_0).

c) Tasa de fijación de carbono

Para la prueba de normalidad de los datos de la tasa de fijación de carbono, se planteó las hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** Los datos de la tasa de fijación de carbono ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) siguen una distribución normal.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Los datos de la tasa de fijación de carbono ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) no siguen una distribución normal.
- **Nivel de significancia:** $\alpha = 0.05$
- **Si: $p > 0.05$:** aceptamos la hipótesis nula (H_0).
- **Si: $p \leq 0.05$:** rechazamos la hipótesis nula (H_0).

Luego se realizó la prueba de Levene para conocer la homogeneidad de las varianzas, asimismo, esta prueba confirma la aplicación de la prueba paramétrica o no paramétrica, se planteó las hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** No existe diferencias entre las varianzas de la tasa de fijación de carbono de los sistemas evaluados (varianzas homogéneas).
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Existe diferencias entre las varianzas de la tasa de fijación de carbono de los sistemas evaluados (varianzas heterogéneas).
- **Nivel de significancia:** $\alpha = 0.05$
- **Si: $p > 0.05$:** aceptamos la hipótesis nula (H_0).
- **Si: $p \leq 0.05$:** rechazamos la hipótesis nula (H_0).

En base a la interpretación de estas pruebas anteriormente realizadas, para comparar tres o más grupos independientes, se optó por aplicar la prueba paramétrica (ANOVA de 1 vía con la prueba comparativa de Tukey) o no paramétrica (Kruskal Wallis) y se planteó las hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** No hay diferencias significativas en la tasa de fijación de carbono ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) entre los sistemas evaluados.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Existe diferencias significativas en la tasa de fijación de carbono ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) entre los sistemas evaluados.
- **Nivel de significancia:** $\alpha = 0.05$
- **Si: $p > 0.05$:** aceptamos la hipótesis nula (H_0).
- **Si: $p \leq 0.05$:** rechazamos la hipótesis nula (H_0).

d) Tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente

Se planteó las hipótesis para la prueba de normalidad de los datos de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente:

- **Hipótesis nula (H_0):** Los datos de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) siguen una distribución normal.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Los datos de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) no siguen una distribución normal.
- **Nivel de significancia:** $\alpha = 0.05$
- **Si: $p > 0.05$:** aceptamos la hipótesis nula (H_0).
- **Si: $p \leq 0.05$:** rechazamos la hipótesis nula (H_0).

Para conocer la homogeneidad de las varianzas, se aplicó la prueba de Levene, planteándose las hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** No existe diferencias entre las varianzas de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente de los sistemas evaluados.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Existe diferencias entre las varianzas de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente de los sistemas evaluados.
- **Nivel de significancia:** $\alpha = 0.05$
- **Si: $p > 0.05$:** aceptamos la hipótesis nula (H_0).
- **Si: $p \leq 0.05$:** rechazamos la hipótesis nula (H_0).

En base a estas pruebas estadísticas realizadas, se procedió a aplicar la prueba paramétrica (ANOVA de 1 vía con la prueba comparativa de Tukey) o no paramétrica (Kruskal Wallis) y para ello se planteó las hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** No hay diferencias significativas en la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) entre los sistemas evaluados.
- **Hipótesis alternativa (H_1):** Existe diferencias significativas en la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) entre los sistemas evaluados.
- **Nivel de significancia:** $\alpha = 0.05$
- **Si: $p > 0.05$:** aceptamos la hipótesis nula (H_0).
- **Si: $p \leq 0.05$:** rechazamos la hipótesis nula (H_0).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Caracterización de los tres sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales (SAF) conformados por café con guaba (CG), café con pino (CP) y café con ulcumano (CU), agregándose a ello el sistema evaluado como control, café sin sombra (Cs), están descritas por sus características agronómicas, el análisis físicoquímico del suelo y la identificación taxonómica de los árboles de sombra.

- Características agronómicas

El cultivo de café en los sistemas evaluados presenta (tabla 7) un sistema de siembra rectangular, resaltando entre ellas el SAF de CP que presenta una densidad mayor de 5555 plantas ha⁻¹ y Cs la menor densidad de 3787 plantas ha⁻¹. Respecto a las variedades del café, el SAF de CG está conformada por la variedad Cuscatleco, CP por Villa Sarchí, CU por Catuai, Caturra y Borbón y Cs por Caturra y Borbón.

Tabla 7. Características agronómicas del cultivo de café.

Nº	SAF	Sistema de siembra	Distancia de siembra (m x m)	Densidad de siembra (nº plantas ha ⁻¹)	Edad del cultivo (años)	Poda	Edad con poda (años)
1	CG	Rectangular	2.2 x 1.0	4545	4	No podado	-
2	CP	Rectangular	1.8 x 1.0	5555	5	No podado	-
3	CU	Rectangular	2.0 x 1.2	4166	7 a 14	Podado	2
4	Cs	Rectangular	2.2 x 1.2	3787	6 a 13	Podado	2

La World Coffee Research (WCR) (2019) recomienda las densidades de siembra para las variedades de café con porte bajo (Cuscatleco, Villa Sarchí, Catuai y Caturra) entre 5000 a 6000 plantas ha⁻¹ y de porte alto (Borbón) entre 3000 a 4000. Por lo tanto, el SAF de CP se encuentra dentro del rango sugerido a diferencia de CG que presenta un valor menor a ello. Para CU al contar con variedades diferentes, se calculó un promedio del rango establecido para estas variedades obteniéndose 4833 plantas ha⁻¹ aproximadamente, cantidad que supera el valor de 4166 plantas ha⁻¹ de este sistema, del mismo modo, para el Cs se tiene un promedio del rango sugerido de 4500 plantas ha⁻¹, siendo superior al valor de 3787 plantas ha⁻¹ para este sistema.

El Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) (2021) de Colombia señala que el cultivo de café con sombrío puede realizarse con altas densidades de siembra hasta 8000 plantas ha⁻¹ con variedades de porte bajo y hasta 5000 plantas ha⁻¹ con variedades de porte alto; en la investigación, las densidades de los sistemas evaluados son inferiores a estos valores en mención.

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) (2022) recomienda 5000 plantas ha^{-1} para variedades de porte bajo, cantidad que difiere en 455 (CG) y 555 (CP), también sugiere 3333 plantas ha^{-1} para variedades de porte alto, el CU y Cs difieren con la aproximación a este valor ya que están conformadas por variedades de porte alto y bajo.

Respecto a los árboles de sombra, se observa en la tabla 8 que el SAF de CG presenta un sistema de siembra de forma cuadrada con 100 árboles ha^{-1} , el CP y CU de forma rectangular con 125 y 208 árboles ha^{-1} .

Tabla 8. Características agronómicas del árbol de sombra.

Nº	SAF	Sistema de siembra	Distancia de siembra (m x m)	Densidad de siembra (nº árboles ha^{-1})	Edad (años)
1	CG	Cuadrado	10.0 x 10.0	100	20
2	CP	Rectangular	10.0 x 8.0	125	10
3	CU	Rectangular	6.0 x 8.0	208	18
4	Cs	-	-	-	-

El Cenicafé (2021) recomienda que la densidad de siembra de los árboles de sombra no debe superar los 70 árboles ha^{-1} mientras el café presente densidades mayores a 5000 plantas ha^{-1} ; en la investigación, las densidades de los árboles de sombra superan el valor en mención, sin embargo, la densidad del café no es superior a lo mencionado, por lo tanto, se mantiene dicha relación inversa entre las densidades del café (menor a 5000 plantas ha^{-1}) y de los árboles de sombra (mayor a 70 árboles ha^{-1}).

El INIA (2022) también sugiere que los árboles de sombra en el cultivo de café, para zonas altas (1200 a 2000 msnm), se instalen a 12 por 12 metros (70 árboles ha^{-1}); en la investigación, los SAF se encuentran dentro de este rango de altitud, sin embargo, el distanciamiento de siembra difiere con lo señalado.

Diferentes autores estudiaron a los SAF de café con guaba, como Gonzales (2018), citado también por Clemente-Arenas (2021), quién registra datos de densidades de siembra y edades, siendo 69 árboles ha^{-1} y 3333 plantas ha^{-1} para el café de variedad Caturra, ambos de 7 años; asimismo, Silva y Olaya (2019) registran densidades de 70 árboles ha^{-1} y 3703 plantas ha^{-1} de café variedad Catimor, ambos de 15 años; en comparación con esta investigación, el CG presenta mayores densidades tanto para la guaba y el cafeto.

Por otro lado, entre otros autores que estudiaron a los SAF de café con guaba, se tiene a Odar (2018), mencionado por Clemente-Arenas (2021), quién registra 329 árboles ha^{-1} y 5917 plantas ha^{-1} de café variedad Catimor, ambos de 4.5 años; asimismo, Jurado et al. (2020) registraron densidades de 123 (guaba) y 6705 (café variedad Castillo), ambos de 4 años; además Manchabajoy et al. (2022) registraron 141 árboles ha^{-1} y 6663 plantas ha^{-1} de café variedad Castillo, ambos de 6 años; en contraste con este estudio, el CG presenta valores menores de densidad (guaba y café) respecto a lo mencionado por los autores, sin embargo la edad de la guaba (20 años) difiere al ser mayor respecto a lo evaluado por dichos autores.

Respecto a los SAF de café con pino, se cuenta con Ehrenbergerová et al. (2016), mencionado también por Clemente-Arenas (2021), quiénes evaluaron un sistema denominado como “sitio *Pinus*” (café con pino y otros árboles), presentando densidades de 124 árboles ha^{-1} y 4840 plantas ha^{-1} de café (variedades Típica, Catimor y Caturra), ambos de 15 años de plantación; en comparación con esta investigación, el CP presenta como densidad 125 árboles ha^{-1} (pino de 10 años), cantidad similar a lo evaluado por el autor en mención con una ligera diferencia de edad, respecto a la densidad del café (5 años) con 5555 plantas ha^{-1} , cantidad que es mayor a lo registrado por dicho autor con una gran diferencia de edad.

Respecto a los SAF de café con ulcumano, no se encuentran evidencias de estudios realizados en este tema, por lo tanto, se tiene a Manchabajoy et al. (2022) quiénes evaluaron SAF de café-limón con 6625 plantas ha^{-1} y 179 árboles ha^{-1} , café-carbonero con 6725 plantas ha^{-1} y 79 árboles ha^{-1} , ambos sistemas son de 6 años conformadas por la variedad Castillo; en comparación con este estudio, el CU presenta mayor densidad (208) de árboles de sombra y menor densidad (4166 plantas ha^{-1}) para el café respecto a lo mencionado por los autores, diferenciándose también en la edad de siembra que presentan, al ser mayor para el ulcumano con 18 años y para el café con una edad de siembra entre 7 y 14 años, las cuales tienen 2 años de poda.

También se puede mencionar a Hurtado (2019) quién estudio un SAF de *Coffea arabica* L. (café) con eucalipto (*Eucalyptus saligna*) de 4 años, con densidades de 4200 y 600 respectivamente; las densidades registradas por este autor son mayores a comparación con el SAF de CU, además cabe mencionarse que las demás densidades del árbol de sombra para los SAF de CG y CP también son muy menores a lo mencionado por dicho autor, a diferencia de la densidad del cafeto de 4545 y 5555 respectivamente, los cuales son mayores a lo registrado por el autor en mención.

Para los sistemas de café sin sombra, se evidencian diferentes estudios, teniéndose a Jurado et al. (2020), quienes registran para el “café a libre exposición” de 4 años, una densidad de 6828 plantas ha⁻¹ de variedad Castillo; asimismo, Manchabajoy et al. (2022), evaluaron el sistema denominado “café libre” de 6 años con una densidad de 6804 plantas ha⁻¹ de variedad Castillo; en contraste con el sistema de Cs evaluado en la investigación, esta presenta menor densidad (3787) respecto a lo mencionado por los autores, diferenciándose además por la edad de siembra, la cual varía entre 6 y 13 años, las cuales se encuentran en su segundo año de haber sido podadas.

- **Análisis físicoquímico del suelo**

La clase textural del suelo, en base a las tablas de interpretación (adjuntadas en los resultados de análisis del suelo) dadas por el LABSAF de la EEA Pichanaki, para el SAF CP es franco (Fr.), mientras que para CG y CU es franco arenoso (Fr.A) y para Cs es franco arcillo arenoso (Fr.Ar.A); estas clases texturales de suelo, en base al United States Department of Agriculture (USDA) (2017), son consideradas como suelos francos, asimismo, Carranza-Patiño et al. (2024) manifiestan que estos suelos tienen alta productividad agrícola y suficiente retención de humedad. También, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (2021), indica como requerimientos edáficos para el cultivo de café, en base a Benacchio (1982), suelos con textura franco y franco-arcilloso. Además, estos suelos son considerados como aptos, en base a Valencia-Aristizábal y Carrillo-Pachón (1983) mencionado por Salgado y Ottos (2025), al encontrarse dentro del rango óptimo requerido para el cultivo de café. Bajo estas premisas, la textura del suelo de los sistemas evaluados se puede considerar como aptos para el cultivo de café.

Ehrenbergerová et al. (2016), mencionado por Clemente-Arenas (2021), evaluaron la capacidad de almacenamiento de carbono para las plantaciones de café agroforestales denominadas como “sitio *Inga*”, “sitio *Pinus*”, “sitio *Eucalyptus*” y “sitio café al sol”, las cuales presentaron su textura del suelo clasificada como franca; en comparación con los sistemas evaluados en esta investigación, se concuerda con la clase textural del suelo, lo que podría indicar la similitud de capacidad productiva agrícola. Alvarez (2023) en su investigación realizada en el distrito de Chontabamba de la provincia de Oxapampa - Pasco, registra la clase textural del suelo para los sistemas de producción de café como el café-plátano, café-pacae, café-pino y café sin sombra presentando suelos francos o sus variantes; en comparación con los sistemas evaluados en esta investigación, se concuerda con la clase textural del suelo, las cuales son aptos para el cultivo de café.

En la tabla 9 se detallan la clase textural, la concentración de potasio, fósforo y entre otras características fisicoquímicas del suelo. La concentración de potasio disponible (K) es mayor en el SAF CP con 80.40 ppm, sin embargo, en los sistemas evaluados, los valores de este elemento químico se encuentran en una clasificación baja, en base a las tablas de interpretación dadas por el LABSAF de la EEA Pichanaki.

Alvarez (2023) registra el potasio del suelo a 2.5 m de distancia del tallo del árbol de sombra, con valores de 267.50 ppm para el café sin sombra, 140.18 para el café-pino, con 120.63 para el café-plátano y 106.33 para el café-pacae, para fines comparativos se interpretan con las tablas del LABSAF de la EEA Pichanaki, presentando una clasificación alta para el primero y medio para los tres restantes; en contraste con esta investigación, los sistemas (CG, CP, CU y Cs) difieren a lo registrado por el autor, ya que se encuentran en una clasificación baja.

Tabla 9. Resultado del análisis fisicoquímico de suelo por sistema evaluado.

N°	SAF	Clase textural	C.E. (dS m ⁻¹)	pH	MO (%)	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	CIC (meq 100g ⁻¹)	Cationes cambiables (meq 100g ⁻¹)			
										Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Al ⁺³
1	CG	Franco Arenoso	0.09	4.2	4.5	0.23	4.99	42.90	2.98	1.15	0.29	0.11	0.61
2	CP	Franco	0.14	5.0	2.0	0.10	3.17	80.40	4.08	1.58	0.79	0.11	0.21
3	CU	Franco Arenoso	0.06	4.9	8.5	0.43	6.21	50.70	4.69	1.29	0.89	0.13	0.41
4	Cs	Franco Arcillo Arenoso	0.14	4.2	7.9	0.40	6.34	35.10	2.21	1.03	0.45	0.09	0.29

Fuente: Basado en los resultados del análisis de suelo realizado en el LABSAF de la EEA Pichanaki.

En la figura 8 se puede apreciar que la conductividad eléctrica (CE) en los sistemas evaluados presenta valores cercanos a cero, indicando que se encuentran en la clasificación de muy ligeramente salino en base a las tablas de interpretación dadas por el LABSAF de la EEA Pichanaki; asimismo, estos valores están dentro de la categorización no salino y que tendría un efecto imperceptible en el rendimiento del cultivo, interpretación realizada en base a Rodríguez-Delgado et al. (2025) quienes mencionan el efecto de la salinidad del suelo en el rendimiento de los cultivos dada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2016). Además, el SENAMHI (2021), señala que el cultivo de café no tolera la salinidad. Por lo tanto, estos valores mínimos de salinidad en el suelo son favorables para dicho cultivo.

Alvarez (2023) en su investigación registra la conductividad eléctrica del suelo (en unides de mS m^{-1} , la cuales son convertidas a dS m^{-1} con fines comparativos, 1 dS m^{-1} es igual a 100 mS m^{-1}) obteniéndose 0.053 dS m^{-1} para el café sin sombra, 0.0499 para el café-plátano, 0.0309 para el café-pino y 0.028 para el café-pacae, los cuales fueron evaluados a 2.5 m de distancia del tallo del árbol de sombra, estos se interpretan con las tablas del LABSAF de la EEA Pichanaki con fines comparativos, clasificándolos como muy ligeramente salinos (son menores a 2 dS m^{-1}); en contraste con los resultados de CE obtenidos para los sistemas de CG, CP, CU y Cs de esta investigación, se concuerda que también presentan suelos con la misma condición de salinidad.

Los valores de pH (1:1) (figura 8), de acuerdo con las tablas de interpretación proporcionadas por el LABSAF de la EEA Pichanaki, indican que los sistemas CG y Cs presentan suelos extremadamente ácidos y los restantes (CP y CU) suelos muy fuertemente ácidos; el SENAMHI (2021), indica como requerimientos edáficos para el cultivo de café, en base a Benacchio (1982), presente un pH dentro del rango que va de 4.5 a 7.0; por lo tanto, el SAF CP (5.0) y CU (4.9) cumplen con esta premisa a diferencia de las otras restantes que presentan más acidez en el suelo; corroborándose con Valencia-Aristizábal y Carrillo-Pachón (1983), citado por Salgado y Ottos (2025), quiénes señalan un rango óptimo de 4.9 a 5.6, confirmandose que CP y CU cumplen con esta condición química requerida para el cultivo de café.

Ehrenbergerová et al. (2016), citado también por Clemente-Arenas (2021), evaluaron el carbono almacenado en los SAF, en la que registraron el pH/KCl con valores de 4.1 para el “sitio *Pinus*”, 4.0 para el “sitio *Inga*” y 3.7 para el “sitio café al sol”, estos son consideradas como reacción extremadamente ácida del suelo y para el “sitio *Eucalyptus*” con reacción fuertemente ácida (4.4) del suelo; en comparación con los sistemas evaluados en esta investigación, se concuerda con el CG (4.2) y Cs (4.2) que también son extremadamente ácidos, diferenciándose con el CP (5.0) y el CU (4.9) que presentan suelos muy fuertemente ácidos.

Alvarez (2023) registra el pH del suelo a 2.5 m de distancia del tallo del árbol de sombra, con 5.94 para el café-pino, 5.91 para el café-plátano, 5.60 para el café sin sombra y 5.13 para el café-pacae, interpretándolo con las tablas del LABSAF de la EEA Pichanaki con fines comparativos, los tres primeros se caracterizan como moderadamente ácido y el último como fuertemente ácido; comparándolo con los sistemas estudiados de esta investigación, se diferencian al presentar más acidez en el suelo categorizándose como muy fuertemente ácidos (CP con 5.0 y CU con 4.9) y extremadamente ácidos (CG y Cs, ambos con 4.2).

Vallejos-Torres et al. (2024) estimaron el stock de carbono para los tipos de sistemas agroforestales con café, registrando valores de pH de 5.42 para “café sin árboles de sombra” (772 msnm), 5.72 para “café con árboles de sombra *Inga sp.*” (783 msnm) y 6.75 para “café con policultivo” (704 msnm), esto se podría interpretar en base a las tablas dadas por el LABSAF de la EEA Pichanaki, siendo para el primero fuertemente ácido, el segundo moderadamente ácido y el último como neutro; en comparación con esta investigación, se tiene que los sistemas evaluados difieren con lo mencionado por los autores, CP (5.0) y CU (4.9) son muy fuertemente ácidos y el CG (4.2) y Cs (4.2) son extremadamente ácidos, esto puede deberse a la diferencia de altitud, ya que los sistemas evaluados se encuentran alrededor de los 1387 msnm, diferenciándose considerablemente a lo estudiado por los autores, asimismo el pH puede estar influenciada por el manejo agronómico del sistema.

La fluctuación del contenido de materia orgánica (MO) entre los sistemas evaluados (figura 8), es menor en el SAF CP con 2.0%, que indica una clasificación media, en cambio, CG (4.5%), CU (8.5%) y Cs (7.9%) están dentro de una clasificación alta, interpretadas en base a las tablas proporcionadas por el LABSAF de la EEA Pichanaki. El Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (2019) señala que el contenido de MO debe estar en el rango de 2 y 4%; por lo tanto, el SAF CP cumple con esta premisa a diferencia de las restantes (CG, CU y Cs).

Alvarez (2023) registra la materia orgánica del suelo a 2.5 m de distancia del tallo del árbol de sombra para los sistemas de café-plátano con 6.62%, café-pino con 6.13%, para el café sin sombra con 4.90% y para el café-pacae con 4.21%, interpretándolo con las tablas dadas por el LABSAF de la EEA Pichanaki con fines comparativos, estos sistemas en mención se encuentran dentro de la clasificación alta; comparándolo con los sistemas de esta investigación, el CG (4.5%), CU (8.5%) y Cs (7.9%) presentan la misma condición de MO en el suelo (alto) a diferencia del CP (2.0%) que presenta una clasificación media de MO, la variabilidad de este parámetro puede estar influenciada principalmente por la composición (café, árbol de sombra, hojarasca, herbáceas/arbustos, entre otras) del sistema y por el manejo agronómico que puede incrementar o disminuir la MO en el suelo.

Del mismo modo, para la cantidad de nitrógeno total (N) (figura 8), los valores obtenidos se mantienen en la clasificación media para el SAF CP con 0.10% y alta para CG (0.23%), CU (0.43%) y Cs (0.40%), interpretación realizada mediante las tablas dadas por el LABSAF de la EEA Pichanaki.

Alvarez (2023) registra el nitrógeno total del suelo a 2.5 m de distancia del tallo del árbol de sombra para los sistemas de café-plátano con 0.33%, café-pino con 0.31, para el café-pacae con 0.21 y para el café sin sombra con 0.20, para fines comparativos se interpretan con las tablas del LABSAF de la EEA Pichanaki, los tres primeros se encuentran dentro de la clasificación alta y el último como media; comparándolo con los sistemas de esta investigación, el CG (0.23%), CU (0.43%) y Cs (0.40%) presentan la misma condición de nitrógeno total (alto) de los tres primeros sistemas mencionados por el autor y el CP (0.10%) concuerda con el sistema de café sin sombra (clasificación media) mencionada por dicho autor.

Vallejos-Torres et al. (2024) registraron valores de nitrógeno (%) para los tipos de sistemas agroforestales con café, con 0.13 para “café sin árboles de sombra”, 0.18 para “café con árboles de sombra *Inga sp.*” y 0.24 para “café con policultivo”, esto se interpreta en base a las tablas proporcionadas por el LABSAF de la EEA Pichanaki como una clasificación media para el primero y el segundo y como clasificación alta para el último; en contraste con este estudio, el CG (0.23% - alto) y Cs (0.40% - alto) difieren con lo registrado por los autores para el “café con árboles de sombra *Inga sp.*” y “café sin árboles de sombra”, ambas con clasificación media, además el CU (0.43% - alto) presenta mayor porcentaje de nitrógeno en el suelo y el CP (0.10% - medio) presenta el menor porcentaje a comparación con lo mencionado por dichos autores.

Respecto al fósforo disponible (P), el SAF CP presentó menor concentración (3.17 ppm) a comparación de los demás sistemas, sin embargo, al ser interpretadas en base al LABSAF de la EEA Pichanaki, todos los valores obtenidos son menores a 7.0 ppm, indicando que se encuentran en una clasificación baja. Por lo contrario, en base a Valencia-Aristizábal y Carrillo-Pachón (1983) mencionado por Salgado y Ottos (2025), los sistemas de CU (6.21 ppm) y Cs (6.34 ppm) se encuentran dentro del rango óptimo para café (6 a 14 ppm), por lo tanto, bajo esta premisa, estos dos cumplen con esta condición química requerida.

Alvarez (2023) registra el fósforo del suelo a 2.5 m de distancia del tallo del árbol de sombra, con valores de 30.08 ppm para el café-plátano, 20.81 para el café-pino, con 9.96 para el café-pacae y con 4.30 para el café sin sombra, para fines comparativos se interpretan con las tablas del LABSAF de la EEA Pichanaki, siendo de clasificación alta para los dos primeros, media para el tercero y baja para el último en mención; comparándolo con los sistemas evaluados (CG, CP, CU y Cs) de esta investigación, concuerdan con el sistema de café sin sombra ya que coinciden con la clasificación baja de fósforo disponible en el suelo.

Vallejos-Torres et al. (2024) registraron valores de fósforo (en unidades de mg Kg^{-1} , las cuales son expresadas en ppm como unidad equivalente con fines comparativos), teniéndose para el “café sin árboles de sombra” y “café con árboles de sombra *Inga sp.*” el valor de 1.32 ppm para ambas y para el “café con policultivo” con 2.00 ppm, esto se interpreta en base a las tablas dadas por el LABSAF de la EEA Pichanaki como una clasificación baja para los tres sistemas; en comparación con los sistemas evaluados (CG, CP, CU y Cs) en esta investigación, se concuerda con los autores al registrar el fósforo disponible dentro de una clasificación baja, sin embargo CU (6.21 ppm) y Cs (6.34 ppm) presentan valores mayores frente a los demás sistemas evaluados y a lo registrado por los autores en mención.

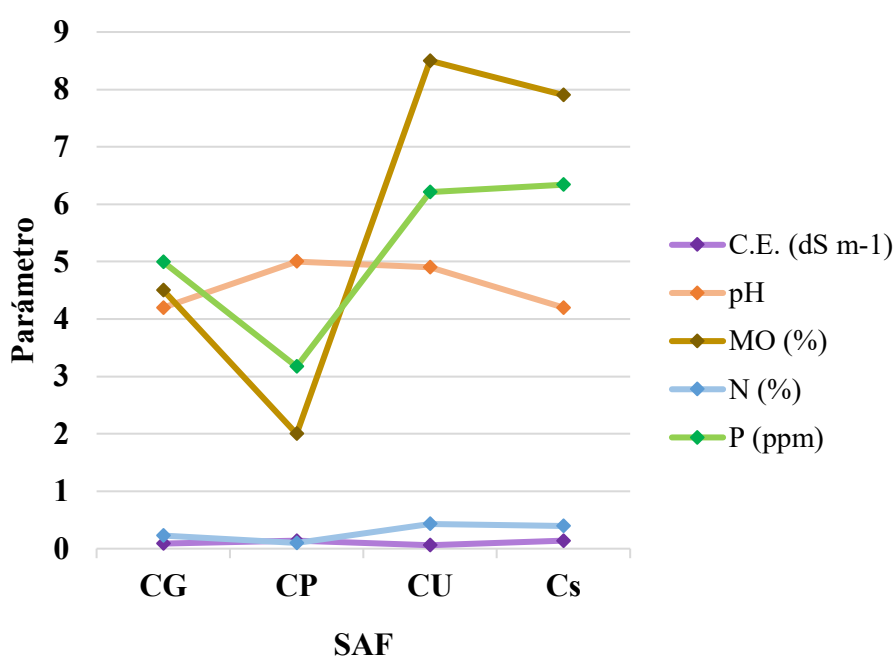


Figura 8. Parámetros de C.E. (dS m^{-1}), pH, MO (%), N (%) y P (ppm) por sistema evaluado.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) en los sistemas evaluados (figura 9) se encuentran dentro del rango de 0 a $10 \text{ meq } 100\text{g}^{-1}$ de suelo, en la categoría muy bajo, interpretación basada en Garrido (2020), citado por Rodríguez-Delgado et al. (2025).

Los cationes cambiables de Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} y Al^{+3} en unidades de $\text{meq } 100\text{g}^{-1}$ de suelo (figura 9), se interpretan en base a los rangos óptimos requeridos para el cultivo de café mencionados por Valencia-Aristizábal y Carrillo-Pachón (1983), citado por Salgado y Ottos (2025). Para el Ca^{+2} , el rango óptimo es de 1.6 a 4.2, los sistemas evaluados (CG, CP, CU y Cs) presentan valores menores a este, indicando deficiencia de calcio en el suelo.

Continuando, para el Mg^{+2} , se tiene como rango de 0.5 a 1.4, los sistemas de CG (0.29) y Cs (0.45) presentan valores menores, por lo tanto, indica deficiencia de magnesio en el suelo, en cambio CP (0.79) y CU (0.89) se encuentran dentro de lo establecido. Para el K^{+} , con intervalo óptimo de 0.29 a 0.41, los sistemas presentan valores menores, mostrando deficiencia de este elemento en el suelo. Para el Al^{+3} , con valores menores a 1.1 es favorable para el café, por lo tanto, los valores obtenidos por sistema (CG, CP, CU y Cs) cumplen con esta premisa.

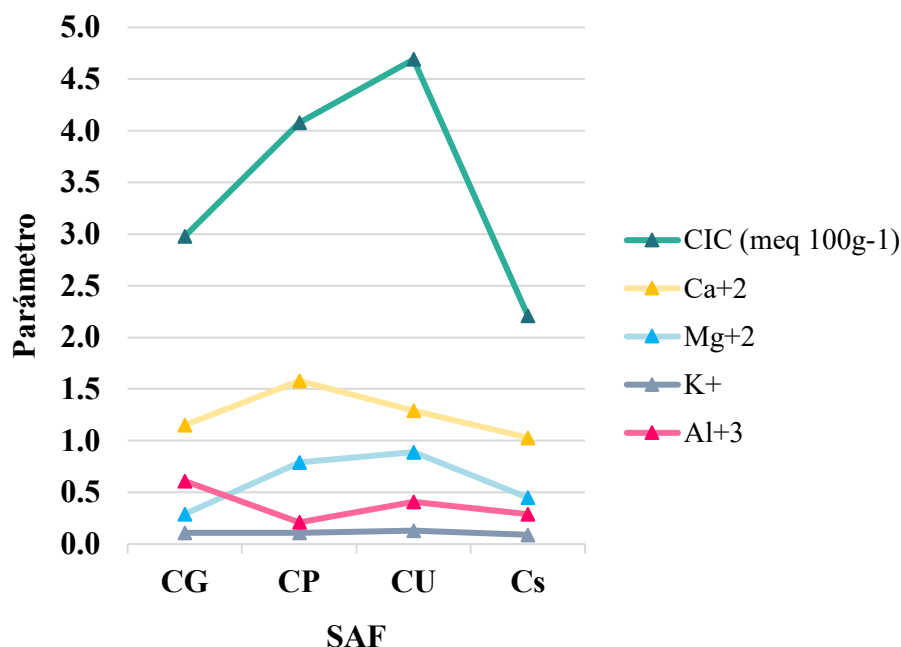


Figura 9. Parámetros de CIC y cationes cambiabiles (meq 100g⁻¹) por sistema evaluado.

- Identificación taxonómica de los árboles de sombra

Los sistemas evaluados están ubicados alrededor de los 1387 msnm con la presencia de árboles de sombra como la guaba, pino y ulcumano, de los cuales se detalla los nombres científicos en la tabla 10 y su clasificación taxonómica (tablas 11, 12 y 13).

El Cenicafé (2021) señala los árboles de sombrío más comunes y recomendados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia como el guamo santafereño, guamo macheto, písamo, cámbulo, carbonero gigante y nogal cafetero. Asimismo, el INIA (2022) sugiere para zonas altas (1200 a 2000 msnm), la guaba, *Pinus tecunumanii*, roble y nogal. Por lo tanto, la guaba es comúnmente recomendada en SAF con café; en la investigación se evaluó dicho árbol en mención y otras dos diferentes a lo sugerido.

Tabla 10. Resultado de la determinación taxonómica de los árboles de sombra por sistema.

Nº	SAF	Descripción
1	CG	<i>Coffea arabica</i> L. con <i>Inga lineata</i> Benth.
2	CP	<i>C. arabica</i> con <i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham.
3	CU	<i>C. arabica</i> con <i>Retrophyllum rospigliosii</i> (Pilg.) C. N. Page
4	Cs	<i>C. arabica</i> sin sombra

Fuente: Basado en los resultados de determinación taxonómica emitida por el Herbario del Departamento de Biología (MOL) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) (2024).

Tabla 11. Clasificación taxonómica del árbol de sombra *Inga lineata*

Categoría taxonómica	Nombre común
	Guaba
Clado	angiospermas (Angiospermae)
Clado	mesangiospermas (Mesangiospermae)
Clado	eudicotiledóneas (Eudicotyledoneae)
Clado	gunnéridas (Gunneridae)
Clado	pentapétalas (Pentapetalae)
Clado	superrósidas
Clado	rósidas
Clado	eurrósidas
Clado	fábricas
Orden	Fabales
Familia	Fabaceae
Género	<i>Inga</i> Mill.
Especie	<i>Inga lineata</i> Benth.

Fuente: Basado en los resultados de determinación taxonómica emitida por el Herbario del Departamento de Biología (MOL) de la UNALM (2024).

Tabla 12. Clasificación taxonómica del árbol de sombra *Pinus patula*

Categoría taxonómica	Nombre común
	Pino
Clado	gimnospermas (Gymnospermae)
Clase	Pinopsida
Subclase	Pinidae
Orden	Pinales
Familia	Pinaceae
Género	<i>Pinus</i> L.
Especie	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.

Fuente: Basado en los resultados de determinación taxonómica emitida por el Herbario del Departamento de Biología (MOL) de la UNALM (2024).

Tabla 13. Clasificación taxonómica del árbol de sombra *Retrophyllum rospigliosii*

Categoría taxonómica	Nombre común
	Ulcumano
Clado	gimnospermas (Gymnospermae)
Clase	Pinopsida
Subclase	Cupressidae
Orden	Araucariales
Familia	Podocarpaceae
Género	<i>Retrophyllum</i> C. N. Page
Especie	<i>Retrophyllum rospigliosii</i> (Pilg.) C. N. Page

Fuente: Basado en los resultados de determinación taxonómica emitida por el Herbario del Departamento de Biología (MOL) de la UNALM (2024).

Respecto a los SAF de café con guaba, Clemente-Arenas (2021) menciona a Gonzales (2018), quién evaluó este sistema conformado por los árboles de sombra de la especie de *Inga edulis* de 7 años; de igual manera, Silva y Olaya (2019) evaluaron a la misma especie de guaba de 15 años; de la misma forma, se tiene a Zavala et al. (2018a) quiénes estudiaron un SAF de café con guaba (*Inga edulis*) y otras especies forestales; en comparación con el CG de esta investigación, la especie identificada es *Inga lineata* el cual difiere respecto a los estudios realizados por estos autores. Se tiene también a Ehrenbergerová et al. (2016), citado también por Clemente-Arenas (2021), quiénes evaluaron el SAF con café denominado como “sitio *Inga*” conformada por las especies dominantes *Inga adenophylla* Pittier, *I. densiflora* Benthams, *I. edulis* C. Marius, *I. feuillei* DC., *I. velutina* Willdenow y entre otras como *Pinus oocarpa* D. Don., *P. tecunumanii* (Schwd) Equiluz & Perry, *Retrophyllum rospigliosii* (Pilger) C. Page y las menos representadas como *Euphorbia heterophylla* L. y *Ficus spp.*; este sistema se diferencia con el SAF de CG, al estar compuesta por diferentes especies de árboles de sombra.

En cuanto a los SAF de café con pino, se tiene a Ehrenbergerová et al. (2016), mencionado también por Clemente-Arenas (2021), quiénes evaluaron el SAF denominado como “sitio *Pinus*” con especies dominantes de *Pinus oocarpa*, *P. tecunumanii* y entre otras representativas como *Acrocarpus fraxinifolius* Wt. & Arn., *Eucalyptus spp.*, *Inga spp.*, *Pinus spp.* and *Retrophyllum rospigliosii*; a comparación con SAF de CP evaluado en esta investigación, se observa la gran diferencia en la composición de los árboles de sombra en el sistema.

En cambio, para el ulcumano, García (2019) realizó la estimación del stock de carbono para la especie *Retrophyllum rospigliosii* del Bosque de Huamantanga; en comparación con este estudio, se concuerda con la evaluación del almacenamiento de carbono para esta especie, con la diferencia que esta es asociada como árbol de sombra para el café (SAF de CU).

Vallejos-Torres et al. (2024) evaluaron el SAF denominado como “café con policultivo” conformado por especies como la *Cedrela odorata*, *Persea americana* y *Theobroma cacao*; en comparación con los SAF (CG, CP y CU) evaluados en la investigación, se diferencian en que estas están compuestas por individuos de una sola especie de árbol de sombra.

Alvarez (2023) en su investigación realizada en el distrito de Chontabamba de la provincia de Oxapampa - Pasco, señala las preferencias de los agricultores por la especie de los árboles de sombra para el cultivo de café, teniéndose que el 42.9% prefieren al paca o guaba (*Inga sp.*), seguido por el 23.8% que prefieren el pino (*Pinus patula*), el 14.3% por el cultivo de plátano (*Musa paradisiaca* L.), el 4.76% por otras especies forestales nativas (caoba, tornillo, sangre de grado, etc.) y el 9.52% por café sin sombra o monocultivo; en comparación con los sistemas evaluados en esta investigación, se tiene al CP, café con *Pinus patula*, coincidiendo con la preferencia de este árbol de sombra por el agricultor de la finca.

b) Evaluación del almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales

Se estimó el aporte de biomasa, luego se evaluó el carbono almacenado tanto en la biomasa y el suelo, posteriormente se estimaron la tasa de fijación de carbono y el aporte de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente. Finalmente, a partir de los valores totales de media se infiere hacia la población (áreas de café en producción del distrito).

- Estimación del aporte de biomasa

En la tabla 14 se observa el resumen de la estadística descriptiva de los datos de biomasa para el sistema agroforestal (SAF) de café con guaba (CG), mostrándose la cantidad de muestra u observaciones realizadas (n), la media, desviación estándar (DE), error estándar (EE), coeficiente de variación (CV), valor mínimo (mín) y máximo (máx) y la mediana.

El mayor aporte de biomasa es la biomasa aérea del árbol (BA árbol) con una media de 141.47 Mg ha⁻¹ y una desviación de los datos respecto a ella en 37.97, asimismo, con un error estándar de 21.92, lo que indica en cuánto varía la media muestral respecto a la media poblacional y un CV de 26.84%, indicando una dispersión de datos relativamente homogéneas al ser menor de 30%. El menor aporte es la biomasa arbustiva/herbácea (Bah) con 0.10 ± 0.03 Mg ha⁻¹ (reflejándose la variabilidad de los datos respecto a la media), asimismo, con un EE de 0.02 y un CV de 34.64%, indicando una dispersión heterogénea de los datos al ser mayor de 30%, además con una mediana de 0.08, considerándose como el valor medio de los datos.

La biomasa total estimada para el SAF de CG fluctúa respecto a la media en $192.29 \pm 44.35 \text{ Mg ha}^{-1}$ con un EE de 25.60 indicando su variabilidad respecto a la media poblacional y con un CV de 23.06%, evidenciando una dispersión de datos relativamente homogénea.

Tabla 14. Resumen descriptivo de la biomasa estimada en el sistema de café con guaba.

Variable	n	Media	DE	EE	CV	Mín	Máx	Mediana
BA café	3	10.98	1.25	0.72	11.42	10.19	12.43	10.33
BR café	3	4.39	0.50	0.29	11.38	4.08	4.97	4.13
BA árbol	3	141.47	37.97	21.92	26.84	98.90	171.85	153.65
BR árbol	3	27.50	6.60	3.81	23.98	20.10	32.75	29.66
Bah	3	0.10	0.03	0.02	34.64	0.08	0.14	0.08
Bh	3	7.84	1.04	0.60	13.31	6.64	8.53	8.35
Biomasa total	3	192.29	44.35	25.60	23.06	141.95	225.59	209.32

BA café (biomasa aérea del café), BR café (biomasa radicular del café), BA árbol (biomasa aérea del árbol), BR árbol (biomasa radicular del árbol), Bah (biomasa arbustiva/herbácea) y Bh (biomasa de la hojarasca).

Clemente-Arenas (2021) también menciona a Odar (2018), quién realizó una estimación de la biomasa en el sistema de café–guaba, que fueron expresados en unidades de t ha^{-1} , las cuales fueron expresadas en Mg ha^{-1} (unidad equivalente) para fines comparativos. Reportando tres valores (14.125 ; 29.772 y $25.240 \text{ Mg ha}^{-1}$) para la biomasa aérea de la guaba y a partir de ello se calculó un promedio de $23.046 \text{ Mg ha}^{-1}$, presentando una densidad de $329 \text{ árboles ha}^{-1}$ de 4.5 años; en contraste, esta cantidad de biomasa es menor a la media obtenida en este estudio con $141.47 \text{ Mg ha}^{-1}$ para la BA árbol teniendo 20 años y presentando una densidad de $100 \text{ árboles ha}^{-1}$; esto indica que la edad de la plantación influye en la producción de biomasa y la densidad de esta incrementa la biomasa contenida en una hectárea.

Por otro lado, Gonzales (2018), citado también por Clemente-Arenas (2021), reporta la biomasa de los SAF de café con guaba con una media $\pm$ DE (desviación estándar), teniéndose la biomasa aérea de la guaba de $15.43 \pm 10.59 \text{ Mg ha}^{-1}$ con una densidad de $69 \text{ árboles ha}^{-1}$ de 7 años; esta cantidad al ser comparada con la media obtenida en esta investigación confirma que la edad del árbol de sombra es un factor importante en la estimación de su biomasa.

Odar (2018) registró valores (5.837, 5.085 y 9.690 Mg ha⁻¹) de la biomasa aérea del café y en base a ello se calculó la media (6.871 Mg ha⁻¹), en su estudio el cafeto presenta una densidad de 5917 plantas ha⁻¹ de la variedad Catimor con 4.5 años; a comparación con la presente investigación, se estimó una media de 10.98 Mg ha⁻¹ para la BA café con una densidad de 4545 plantas ha⁻¹ de variedad Cuscatleco con 4 años; esto señala que la variedad del cafeto influye en la producción de su biomasa. Además, Gonzales (2018) para la biomasa aérea del café reportó 2.60 ± 0.31 (4 años) y 5.32 ± 0.60 Mg ha⁻¹ (7 años), ambos correspondientes a la variedad Caturra con una densidad de 3333 plantas ha⁻¹; datos que refuerzan la premisa que la variedad del cafeto juega un papel importante en la cantidad de biomasa generada y a su vez se suma a ello la edad que tiene y su densidad.

Por otro lado, Odar (2018) también reportó datos (Kg) de biomasa para las hojarascas y herbáceas, datos que para fines comparativos fueron transformadas a unidades de Mg ha⁻¹ en base a la fórmula aplicada por el mismo autor, obteniéndose el cálculo de las medias de 1.207 y 1.500 Mg ha⁻¹ respectivamente, asimismo, Gonzales (2018) estimó 11.85 ± 1.52 y 1.68 ± 0.34 Mg ha⁻¹ respectivamente; en contraste con la investigación realizada se obtuvieron medias de 7.84 (Bh) y 0.10 (Bah); las diferencias observadas reflejan que tanto para la Bh y la Bah están influenciadas por el manejo agronómico (frecuencia del deshierbo) que se realiza en el sistema.

Gonzales (2018), mencionado también por Clemente-Arenas (2021), registró valores de media $\pm$ DE para la biomasa de raíces del café, teniéndose 2.42 ± 1.61 (4 años) y 1.77 ± 0.42 Mg ha⁻¹ (7 años); por lo contrario, en este estudio se obtuvo una media de 4.39 Mg ha⁻¹ para la BR café con 4 años, esta diferencia podría deberse a la variedad del cafeto y a la edad que esta presenta, ya que este cultivo se caracteriza por tener una curva ascendente de mayor producción hasta los 4 a 5 años, pasado ese tiempo su producción disminuye.

Considerando las cuatro variables evaluadas por Odar (2018), referenciado también por Clemente-Arenas (2021), se obtiene la suma total de 32.623 Mg ha⁻¹ (biomasa aérea del café, de la guaba, herbácea y de la hojarasca); que al compararla con la sumatoria (160.39 Mg ha⁻¹) de la BA café, BA árbol, Bah y Bh para el SAF de CG de esta investigación, se observa una diferencia notable y esto se atribuye a la diferencia de edad de los árboles de sombra (guaba), por la densidad de este, por la variedad del cafeto y por las condiciones de manejo agronómico del sistema.

En la figura 10 se presenta la composición porcentual del aporte de los diferentes componentes evaluados para la obtención de la biomasa total del SAF de CG; teniéndose a la BA árbol con un valor alto de 73.58%, seguido por la biomasa radicular del árbol (BR árbol) con 14.30% y con un valor bajo de 0.05% para la Bah.

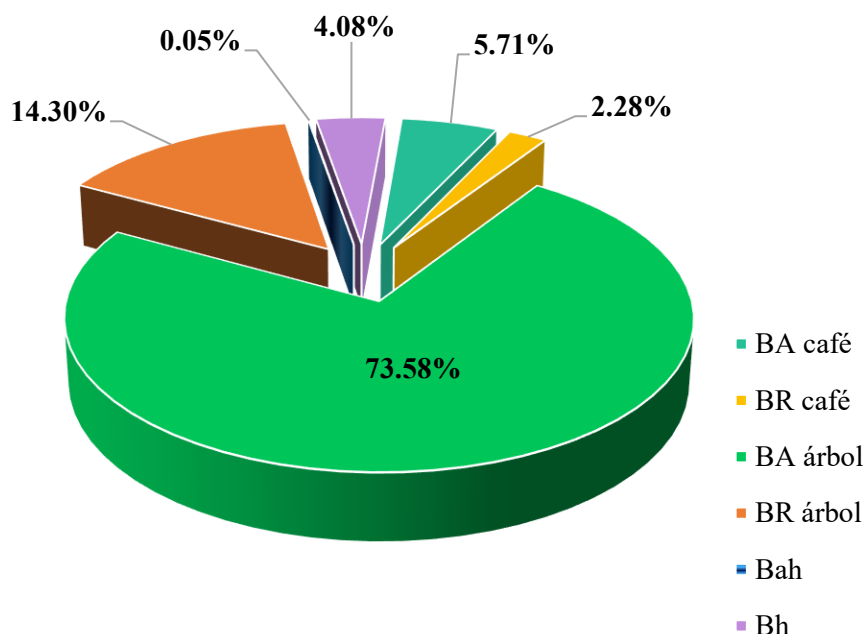


Figura 10. Composición porcentual de la biomasa total del sistema de café con guaba.

En la tabla 15 se muestra el resumen de la estadística descriptiva de los datos de biomasa para el SAF de café con pino (CP), mostrándose la media, DE, EE y entre otros parámetros que describen a estos datos.

El mayor aporte de biomasa es la BA árbol con $61.71 \pm 8.99 \text{ Mg ha}^{-1}$, a su vez, estos valores presentan una distribución moderadamente homogénea (CV de 14.57%) y el menor es la Bah con $1.04 \pm 0.34 \text{ Mg ha}^{-1}$ y sus datos se distribuyen de forma heterogénea (CV de 33.21%) teniéndose como valor medio (mediana) de 0.89. También se observa que la biomasa aérea del café (BA café) con $21.14 \pm 1.95 \text{ Mg ha}^{-1}$ y la biomasa radicular del café (BR café) con $8.46 \pm 0.78 \text{ Mg ha}^{-1}$ presentan un CV de 9.21% y 9.27% respectivamente, indicando alta homogeneidad en la dispersión de los datos.

Se estimó como biomasa total un valor de $108.92 \pm 8.96 \text{ Mg ha}^{-1}$ para el SAF de CP con un CV de 8.22% indicando la dispersión altamente homogénea de los datos.

Tabla 15. Resumen descriptivo de la biomasa estimada en el sistema de café con pino.

Variable	n	Media	DE	EE	CV	Mín	Máx	Mediana
BA café	3	21.14	1.95	1.12	9.21	19.39	23.24	20.80
BR café	3	8.46	0.78	0.45	9.27	7.75	9.30	8.32
BA árbol	3	61.71	8.99	5.19	14.57	51.51	68.49	65.13
BR árbol	3	13.24	1.72	0.99	12.97	11.29	14.53	13.90
Bah	3	1.04	0.34	0.20	33.21	0.79	1.43	0.89
Bh	3	3.33	0.99	0.57	29.84	2.27	4.24	3.48
Biomasa total	3	108.92	8.96	5.17	8.22	99.04	116.51	111.20

BA café (biomasa aérea del café), BR café (biomasa radicular del café), BA árbol (biomasa aérea del árbol), BR árbol (biomasa radicular del árbol), Bah (biomasa arbustiva/herbácea) y Bh (biomasa de la hojarasca).

Ehrenbergerová et al. (2016), mencionado también por Clemente-Arenas (2021), reportaron la biomasa total sobre el suelo con un valor de $124 \pm 9.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ (media $\pm$ DE) para un sistema de café agroforestal con la presencia de especies de *Pinus* spp. en su mayoría (67.5%) y en su minoría conformada por otras especies de *Eucalyptus* spp., *Inga* spp. y otros, este valor comprende a la biomasa aérea de los árboles y del café, así como también la biomasa de las hojarascas, cabe mencionarse que la edad del sistema es de 15 años con 124 árboles ha^{-1} y 4840 plantas de café ha^{-1} con variedades de Típica, Catimor y Caturra; por lo contrario, en la presente investigación para el SAF de CP se tiene como sumatoria de 86.18 Mg ha^{-1} de biomasa, obtenida a partir de las medias de la BA café, BA árbol y Bh, en la que el pino (*Pinus patula*) tiene 10 años con 125 árboles ha^{-1} y el café tiene 5 años con 5555 plantas ha^{-1} de variedad Villa Sarchí; esta diferencia señala que puede deberse a la edad y especie de los árboles de sombra, la densidad del cultivo de café y su variedad, a su vez de que el cafeto sea podado (como es el caso del autor en mención) o no podado (en esta investigación), son factores que repercuten en la cantidad de biomasa aportada por cada sistema que se evalúa.

En la figura 11 se observa la composición porcentual del aporte de biomasa de los distintos componentes estudiados para la estimación de la biomasa total en el SAF de CP; obteniéndose como valor alto de 56.656% correspondiente a la BA árbol, seguido por el 19.409% de la BA café, luego la BR árbol con 12.156%, posteriormente la BR café con 7.767%, y como penúltimo la Bh con 3.057 y el valor menor a todos de 0.955% proporcionado por la Bah.

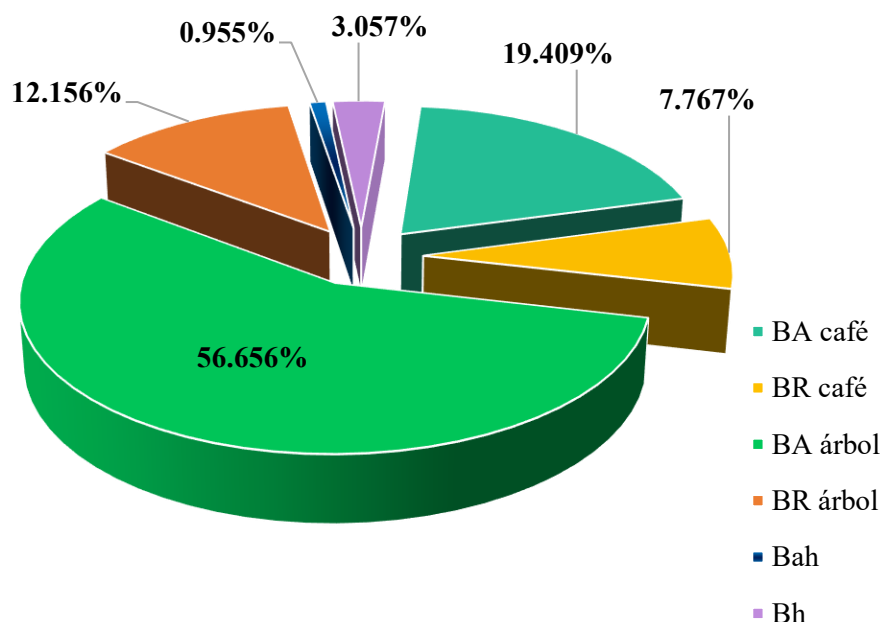


Figura 11. Composición porcentual de la biomasa total del sistema de café con pino.

En la tabla 16 se observa los parámetros estadísticos descriptivos de los datos de biomasa para el SAF de café con ulcumano (CU). Teniéndose a la BA árbol con un mayor aporte de $143.69 \pm 23.21 \text{ Mg ha}^{-1}$ con un CV de 16.15% (dispersión moderadamente homogénea de los datos), seguido por la BR árbol con $27.93 \pm 3.97 \text{ Mg ha}^{-1}$ y un CV de 14.22%, de igual forma presenta una distribución de datos moderadamente homogénea.

Se tiene como aportes bajos de biomasa a la Bah y a la biomasa de la hojarasca (Bh) con valores de 0.53 ± 0.36 y $4.03 \pm 1.42 \text{ Mg ha}^{-1}$ respectivamente y un CV de 67.72% para la primera y 35.22% para la segunda, ambas indican heterogeneidad en la dispersión de los datos, además presentan como valores medios 0.34 y 3.31 respectivamente. Para el SAF de CU se estimó $204.72 \pm 23.79 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomasa total con una dispersión moderadamente homogénea de los datos al presentar un CV de 11.62%.

Tabla 16. Resumen descriptivo de la biomasa estimada en el sistema de café con ulcumano.

Variable	n	Media	DE	EE	CV	Mín	Máx	Mediana
BA café	3	20.38	5.04	2.91	24.71	15.88	25.82	19.44
BR café	3	8.15	2.02	1.16	24.73	6.35	10.33	7.78
BA árbol	3	143.69	23.21	13.40	16.15	128.18	170.37	132.51
BR árbol	3	27.93	3.97	2.29	14.22	25.27	32.50	26.03
Bah	3	0.53	0.36	0.21	67.72	0.31	0.95	0.34
Bh	3	4.03	1.42	0.82	35.22	3.12	5.67	3.31
Biomasa total	3	204.72	23.79	13.73	11.62	184.93	231.11	198.12

BA café (biomasa aérea del café), BR café (biomasa radicular del café), BA árbol (biomasa aérea del árbol), BR árbol (biomasa radicular del árbol), Bah (biomasa arbustiva/herbácea) y Bh (biomasa de la hojarasca).

García (2019) realizó su investigación en la que determinó el stock de carbono por intervalos de diámetro a la altura del pecho (DAP) de la especie de *Retrophyllum rospigliosii* (ulcumano) en el Bosque de Huamantanga - Jaén, que fueron expresados mediante su almacenamiento de carbono en unidades de $t\ ha^{-1}$, las cuales fueron divididas entre la fracción de carbono (0.5) utilizada en la fórmula de su investigación, con el fin de obtener la información de la biomasa generada, las cuales fueron expresadas en $Mg\ ha^{-1}$ (unidad equivalente), resultando $4.712\ Mg\ ha^{-1}$ para el fuste, 1.190 para la copa, 0.686 para la raíz y $6.588\ Mg\ ha^{-1}$ como biomasa total, datos que corresponden a un intervalo de DAP de $\{0.10\ m; 0.50\ m\}$, observándose que la mayoría de los árboles evaluados en este rango presentan un DAP entre $0.30\ m$ a $0.50\ m$.

Asimismo, se tiene como biomasa total de $14.628\ Mg\ ha^{-1}$ y $35.308\ Mg\ ha^{-1}$ para un DAP de $\{0.50\ m; 1.00\ m\}$ y un DAP de $\{1.00\ m; 1.50\ m\}$ respectivamente. La estimación de la biomasa se realizó en base a 70 árboles evaluadas de dicha especie y en función a su DAP (García, 2019). En contraste con la presente investigación, se estimó 143.69 (BA árbol), 27.93 (BR árbol) y obteniéndose la sumatoria entre ambos un valor de $171.62\ Mg\ ha^{-1}$ para el SAF de CU (café con ulcumano) con una densidad de $208\ árboles\ ha^{-1}$ de 18 años y con un DAP que fluctúa entre $0.25\ m$ y $0.38\ m$; el elevado valor obtenido en la presente investigación puede deberse a su alta densidad, que genera el incremento de la biomasa en dicho sistema y porque éstas fueron cultivadas y distribuidas de forma uniforme a diferencia de la investigación del autor en mención en dónde los árboles evaluados crecieron de forma natural con características de abundancia y frecuencia, señalando que a medida que aumenta el DAP se incrementa la biomasa para esta especie.

En la figura 12 se observa los valores de aporte porcentual de cada componente evaluado dentro del SAF de CU, que en conjunto incrementan la biomasa total. Estos valores se ordenan de forma descendente, lo que permite entender el orden de su contribución de biomasa, teniéndose 70.19% , 13.64% , 9.96% , 3.98% , 1.97% y 0.26% para la BA árbol, BR árbol, BA café, BR café, Bh y Bah respectivamente, siendo el árbol de sombra el de mayor aporte.

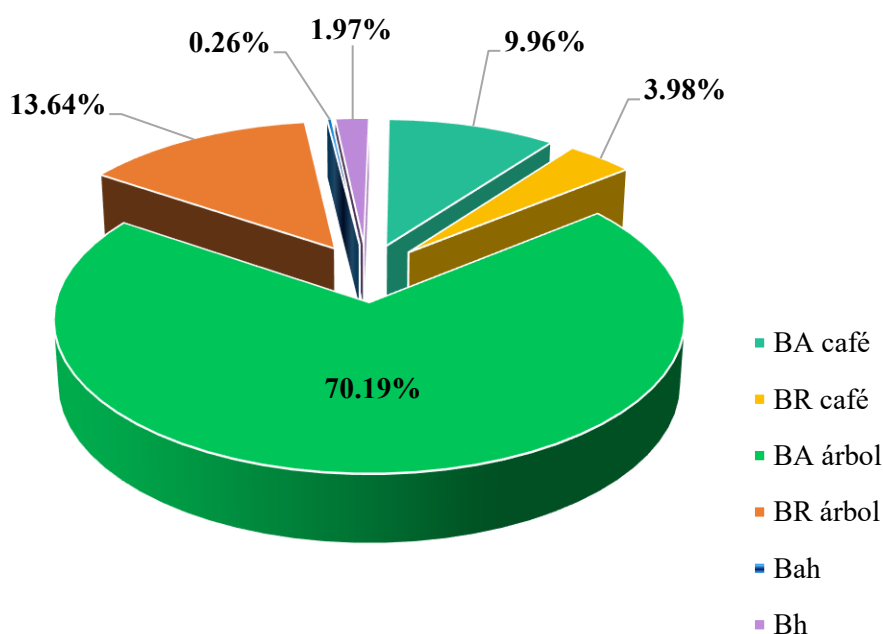


Figura 12. Composición porcentual de la biomasa total del sistema de café con ulcumano.

En la tabla 17 se observa la estadística descriptiva de cada variable estudiada de biomasa para el sistema de café sin sombra (Cs). Presentando valores de $15.52 \pm 2.75 \text{ Mg ha}^{-1}$ con un CV de 17.69% y $6.21 \pm 1.10 \text{ Mg ha}^{-1}$ con un CV de 17.71% para la BA café y BR café respectivamente, para ambas variables la distribución de sus datos es moderadamente homogénea. Además, se tienen valores para la Bah con $1.78 \pm 0.66 \text{ Mg ha}^{-1}$ y un CV de 37.27% (dispersión heterogénea) y para la Bh con $1.75 \pm 0.14 \text{ Mg ha}^{-1}$ y un CV de 7.70% (distribución altamente homogénea).

Se estimó $25.26 \pm 3.74 \text{ Mg ha}^{-1}$ como biomasa total para el sistema de Cs (control), con una dispersión de datos moderadamente homogénea (CV de 14.79%).

Tabla 17. Resumen descriptivo de la biomasa estimada en el sistema de café sin sombra.

Variable	n	Media	DE	EE	CV	Mín	Máx	Mediana
BA café	3	15.52	2.75	1.59	17.69	13.33	18.60	14.63
BR café	3	6.21	1.10	0.63	17.71	5.33	7.44	5.85
BA árbol	3	0.00	0.00	0.00	sd	0.00	0.00	0.00
BR árbol	3	0.00	0.00	0.00	sd	0.00	0.00	0.00
Bah	3	1.78	0.66	0.38	37.27	1.25	2.52	1.56
Bh	3	1.75	0.14	0.08	7.70	1.62	1.89	1.75
Biomasa total	3	25.26	3.74	2.16	14.79	21.80	29.22	24.75

BA café (biomasa aérea del café), BR café (biomasa radicular del café), BA árbol (biomasa aérea del árbol), BR árbol (biomasa radicular del árbol), Bah (biomasa arbustiva/herbácea) y Bh (biomasa de la hojarasca).

Ehrenbergerová et al. (2016), citado también por Clemente-Arenas (2021), registró la biomasa total sobre el suelo (biomasa aérea del café y de la hojarasca) para un sistema de café expuesto al sol, con un valor de $1.9 \pm 0.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ (media $\pm$ DE) y conformada por las variedades de Típica, Catimor, Caturra y Catuai; por lo contrario, en este estudio se obtuvo como sumatoria 17.27 Mg ha^{-1} (15.52 para la BA café y 1.75 para la Bh) con $3787 \text{ plantas ha}^{-1}$ de 2 años (podado) y de la variedad Caturra y Borbón; la biomasa obtenida para este sistema de Cs es elevado, debido a la densidad y variedad que presenta el cafeto.

Soto (2022) determinó el carbono almacenado en hojarascas y raíces en el suelo de tres variedades de café, obtenidas a partir de su biomasa y siendo multiplicadas por la fracción de carbono (0.5), reportadas en t ha^{-1} , en base a ello se calculó la biomasa de cada uno de ellos y fueron expresadas en Mg ha^{-1} (unidad equivalente), obteniéndose para la biomasa de las hojarascas valores de 0.10738 (Catimor), 0.10036 (Bourbón) y 0.09784 (Typica), asimismo, para la biomasa de raíces 0.058 (Catimor), 0.048 (Bourbón) y 0.044 (Typica); en contraste con en este estudio se estimó 1.75 (Bh) y 6.21 (BR café) con variedades de Caturra y Borbón; estos valores elevados puede estar afectada por la densidad y por la utilización de metodología diferenciada en la estimación de la BR café.

En la figura 13 se muestra el aporte porcentual de cada componente que comprende a la biomasa total en el sistema de control (Cs), para este caso el mayor aporte es de la BA café (61.44%), seguido por la BR café (24.58%) y el menor la Bh (6.93%).

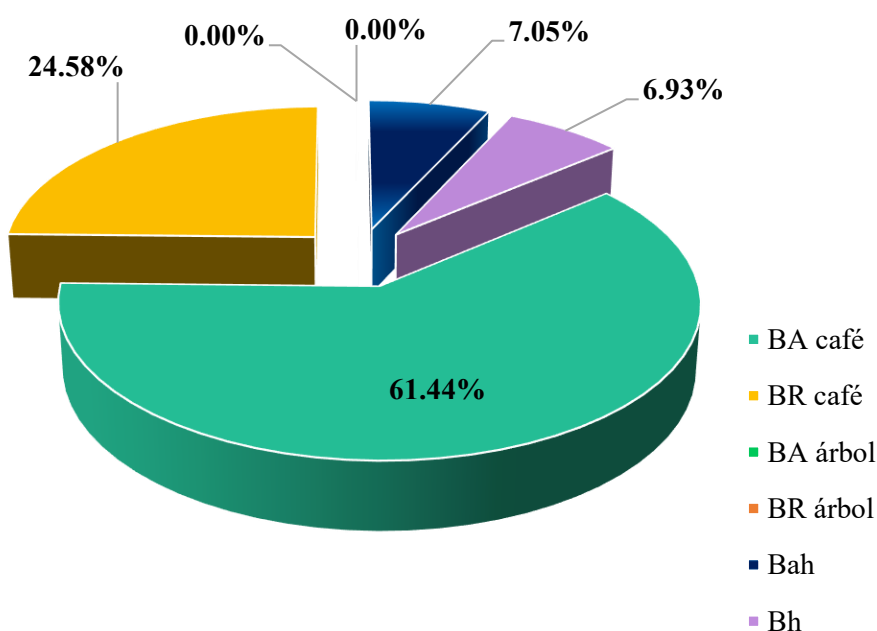


Figura 13. Composición porcentual de la biomasa total del sistema de café sin sombra.

- Evaluación del carbono almacenado

La estadística descriptiva del carbono almacenado en el SAF de CG (tabla 18) está comprendida por las diferentes variables estudiadas, siendo el carbono en el suelo (C-suelo) el mayor con $116.87 \pm 4.04 \text{ Mg ha}^{-1}$ presentando un CV de 3.46% (dispersión altamente homogénea) y el carbono en la biomasa arbustiva/herbácea (C-Bah) el menor con $0.05 \pm 0.01 \text{ Mg ha}^{-1}$ presentando un CV de 24.74% (dispersión relativamente homogénea).

El carbono total almacenado en el SAF de CG es de $206.48 \pm 22.16 \text{ Mg ha}^{-1}$ con un CV de 10.73% (distribución moderadamente homogénea).

Tabla 18. Resumen descriptivo del carbono almacenado en el sistema de café con guaba.

Variable	n	Media	DE	EE	CV	Mín	Máx	Mediana
C-BA café	3	5.18	0.59	0.34	11.38	4.81	5.86	4.87
C-BR café	3	2.07	0.23	0.14	11.32	1.92	2.34	1.95
C-BA árbol	3	66.49	17.85	10.30	26.84	46.48	80.77	72.22
C-BR árbol	3	12.93	3.10	1.79	23.96	9.45	15.39	13.94
C-Bah	3	0.05	0.01	0.01	24.74	0.04	0.06	0.04
C-Bh	3	2.90	0.39	0.22	13.28	2.46	3.16	3.09
C-suelo	3	116.87	4.04	2.33	3.46	112.91	120.99	116.70
Carbono total	3	206.48	22.16	12.79	10.73	182.60	226.38	210.47

C-BA café (carbono en la biomasa aérea del café), C-BR café (carbono en la biomasa radicular del café), C-BA árbol (carbono en la biomasa aérea del árbol), C-BR árbol (carbono en la biomasa radicular del árbol), C-Bah (carbono en la biomasa arbustiva/herbácea), C-Bh (carbono en la biomasa de la hojarasca) y C-suelo (carbono en el suelo).

Clemente-Arenas (2021) menciona a Odar (2018), quién evaluó el almacenamiento del carbono para un sistema de café con guaba, en unidades de t ha^{-1} , que para fines comparativos fueron expresadas en Mg ha^{-1} (unidad equivalente), registrando la media de $11.523 \text{ Mg ha}^{-1}$ para el carbono aéreo arbóreo (guaba), con una densidad de 329 árboles ha^{-1} de 4.5 años; a comparación con esta investigación, se obtuvo un valor de 66.49 Mg ha^{-1} (C-BA árbol) con 100 árboles ha^{-1} de 20 años, esto indica que el árbol de sombra (guaba) almacena mayor carbono en relación al incremento de su edad y su incremento para una determinada área puede variar en función a la cantidad de árboles presentes en el sistema estudiado, además, cabe mencionarse que la longevidad del árbol de sombra también sería un factor que podría influenciar en su almacenamiento de carbono.

Asimismo, Odar (2018) registró las medias de 3.439 Mg ha^{-1} para el carbono aéreo del café (5917 plantas ha^{-1} de la variedad Catimor con 4.5 años), de 0.603 para el carbono almacenado en la hojarasca y 0.741 para el contenido de carbono herbáceo; a diferencia en esta investigación se estimó 5.18 para C-BA café (4545 plantas ha^{-1} de variedad Cuscatleco con 4 años), 2.90 para C-Bh y 0.05 para C-Bah; esto podría señalar que para el cafeto, la densidad es un factor importante para el almacenamiento de carbono ya que la WCR (2019) sugiere densidades de siembra hasta 6000 plantas ha^{-1} y en base a ello se podría decir que la densidad del café en el estudio del autor en mención es muy alta a diferencia de esta investigación, lo que repercute en su almacenamiento de carbono y a su vez se debe tener en consideración la variedad del café lo que define su densidad; en el caso del C-Bh tiene mucho que ver la edad del sistema evaluado y para el C-Bah el manejo de las parcelas por el agricultor.

Gonzales (2018), citado también por Clemente-Arenas (2021), reporta el carbono almacenado (en unidades de t ha^{-1} , el cual es expresado en Mg ha^{-1} , unidad equivalente) en un sistema de 7 años con café y guaba (3333 plantas ha^{-1} y 69 árboles ha^{-1} respectivamente), con una media de 16.23 Mg ha^{-1} , este carbono almacenado corresponde a la biomasa aérea del café y guaba, biomasa radicular del café, biomasa de las hojarascas y la arbustiva/herbácea; en contraste, en la investigación se obtuvo una sumatoria de 76.69 Mg ha^{-1} (cantidad que refleja el C-BA café, C-BR café, C-BA árbol, C-Bah, C-Bh) para el SAF de CG (guaba de 20 años con 100 árboles ha^{-1} y café de 4 años con 4545 plantas ha^{-1}); esto señala que la edad del componente evaluado (árbol de sombra y cafeto) dentro del sistema, juega un papel importante en el stock de carbono para los sistemas agroforestales.

Manchabajoy et al. (2022) evaluaron el carbono almacenado en cuatro sistemas productivos de café de seis años con la variedad Castillo a diferentes altitudes (en unidades de t ha^{-1} y siendo expresadas en Mg ha^{-1}), registrando para un sistema de café (6663 plantas ha^{-1}) con guaba (141 árboles ha^{-1}) a una altitud menor a los 1550 msnm, el carbono aéreo del café y la guaba con 26.87 Mg ha^{-1} , el carbono radicular del café y la guaba con 6.00 y el carbono en la hojarasca con 0.42 ; en contraste con esta investigación, la sumatoria del C-BA café (4545 plantas ha^{-1} de 4 años) y C-BA árbol (100 árboles ha^{-1} de 20 años) con 71.67 y la sumatoria del C-BR café y C-BR árbol con 15.00 Mg ha^{-1} , ambos valores son mayores a lo mencionado por el autor, lo que señala la importancia de la edad del cafeto y la guaba, asimismo, que la alta densidad del café puede generar sinergia entre los árboles y el cafeto repercutiendo en el stock de carbono; respecto al C-Bh se obtuvo 2.90 , siendo mayor a lo mencionado por el autor, lo que indica que la hojarasca también guarda relación con la edad del sistema.

El carbono orgánico en el suelo está relacionado con la presencia de la materia orgánica en dicho componente y su estimación por Paz et al. (2022) es de $74.6 \pm 19.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ para suelos cafetaleros como monocultivo bajo sombra, asimismo, Gonzales (2018) reportó 40.01 y 82.53 Mg ha^{-1} para sistemas de café con guaba de 4 y 7 años respectivamente; Manchabajoy et al. (2022) registraron 55.10 Mg ha^{-1} de COS para un sistema de café con guaba de 6 años; Jurado et al. (2020) reportaron 33.52 Mg ha^{-1} de carbono en el suelo en base a la estimación de cuatro sistemas productivos de café de cuatro años; a comparación con este estudio se obtuvo $116.87 \pm 4.04 \text{ Mg ha}^{-1}$ para el C-suelo, una cantidad elevada respecto a las demás en mención, esto puede deberse a la edad del sistema y también a la actividad de los microorganismos presentes en el suelo que degradan la materia orgánica (Ehrenbergerová et al., 2016 y Rüginitz et al., 2009) aportada por los componentes del sistema influenciando así en el almacenamiento del carbono para este depósito.

Se observa la composición porcentual de cada componente estudiado (figura 14) que conforman el carbono total almacenado en el SAF de CG, siendo el mayor con 56.598% para el C-suelo, seguido por 32.200% para el carbono en la biomasa aérea del árbol (C-BA árbol) y el menor con 0.024% para el C-Bah.

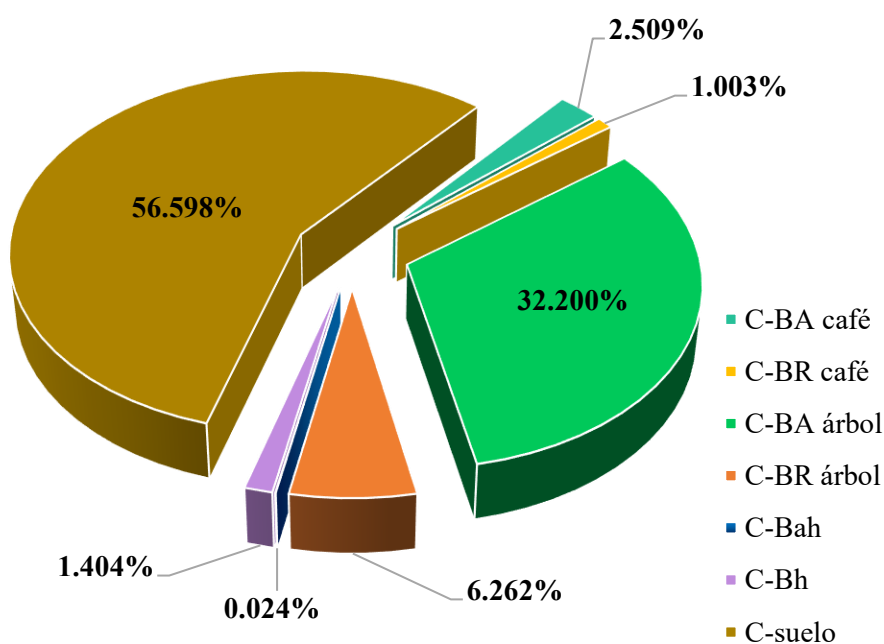


Figura 14. Composición porcentual del carbono total en el sistema de café con guaba.

El resumen de la estadística descriptiva del carbono almacenado en el SAF de CP (tabla 19) presenta el mayor valor de almacenamiento para el C-suelo con 109.94 ± 8.67 Mg ha⁻¹ y un CV de 7.89% (dispersión altamente homogénea) y el menor valor para el C-Bah con 0.46 ± 0.15 Mg ha⁻¹ y un CV de 33.16%, indicando su distribución heterogénea, a su vez, teniéndose como mediana (valor medio) de 0.39. En el SAF de CP se tiene como carbono total almacenado de 160.82 ± 6.43 Mg ha⁻¹ con un CV de 4.00% (distribución altamente homogénea).

Tabla 19. Resumen descriptivo del carbono almacenado en el sistema de café con pino.

Variable	n	Media	DE	EE	CV	Mín	Máx	Mediana
C-BA café	3	9.97	0.92	0.53	9.18	9.15	10.96	9.81
C-BR café	3	3.99	0.37	0.21	9.24	3.66	4.39	3.93
C-BA árbol	3	29.00	4.23	2.44	14.57	24.21	32.19	30.61
C-BR árbol	3	6.22	0.81	0.46	12.94	5.31	6.83	6.53
C-Bah	3	0.46	0.15	0.09	33.16	0.35	0.63	0.39
C-Bh	3	1.23	0.37	0.21	29.86	0.84	1.57	1.29
C-suelo	3	109.94	8.67	5.01	7.89	101.57	118.88	109.37
Carbono total	3	160.82	6.43	3.71	4.00	153.44	165.22	163.81

C-BA café (carbono en la biomasa aérea del café), C-BR café (carbono en la biomasa radicular del café), C-BA árbol (carbono en la biomasa aérea del árbol), C-BR árbol (carbono en la biomasa radicular del árbol), C-Bah (carbono en la biomasa arbustiva/herbácea), C-Bh (carbono en la biomasa de la hojarasca) y C-suelo (carbono en el suelo).

Clemente-Arenas (2021) menciona a Ehrenbergerová et al. (2016), quienes evaluaron un sistema de 15 años denominado como sitio *Pinus* (conformada por el 67.5% de especies de *Pinus* spp. y lo restante por *Eucalyptus* spp., *Inga* spp. y otros) presentando 124 árboles ha⁻¹ y 4840 plantas de café ha⁻¹ de variedades Típica, Catimor y Caturra, reportando 2.8 ± 0.6 Mg ha⁻¹ para el carbono aéreo del café, 1.7 ± 1.1 para el carbono de las hojarascas, 57.5 ± 4.5 de carbono aéreo para los árboles y 13.7 ± 1.1 de carbono en las raíces de los árboles; en contraste, en esta investigación se obtuvo 9.97 ± 0.92 para el C-BA café con 5555 plantas ha⁻¹ de 5 años de la variedad Villa Sarchí, lo que indica que el stock de carbono en las plantas de café están influenciadas por su variedad y la edad que presenten, lo que involucra su manejo agronómico mediante las podas, se tiene 1.23 ± 0.37 para el C-Bh (cantidad aproximada a lo obtenido por el autor en mención), respecto a este componente tiene mucho que ver la asociación de los árboles de sombra con el café teniendo en cuenta su edad y densidad, se obtuvo también 29.00 ± 4.23 para el C-BA árbol y 6.22 ± 0.81 para C-BR árbol con 125 árboles ha⁻¹ de 10 años, se observa que las densidades de los árboles son similares para ambas investigaciones, esto señala que el carbono almacenado asciende en función al incremento de la edad de los árboles de sombra.

Paz et al. (2022) registraron $74.6 \pm 19.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono orgánico del suelo (COS) para un sistema de café denominado como monocultivo bajo sombra, asimismo, 23.1 ± 12.0 de COS para un bosque de encino pino; en comparación, con la presente investigación se obtuvo 109.94 ± 8.67 de C-suelo, siendo un valor elevado respecto a lo reportado por el autor en mención, lo que podría indicar que la asociación del cultivo de café y árboles de sombra almacenan mayor carbono respecto al bosque de encino pino, aun así se debe considerar ciertas características (edad, densidad) que no son mencionadas por dicho autor y que son importantes al estimar el carbono almacenado en un sistema.

Ehrenbergerová et al. (2016), mencionado también por Clemente-Arenas (2021), reportaron $101.8 \pm 13.3 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono en el suelo de un cafetal denominado como sitio *Pinus* de 15 años (café con árboles de pino y otros); en contraste, en el estudio, el C-suelo (edad de 10 años para los árboles y 5 años para el café) es similar a lo obtenido por el autor en mención, indicando que la edad del sistema ha propiciado el incremento del carbono en el suelo, asimismo, también debe haber influenciado en ello la actividad de los microorganismos presentes en este componente evaluado.

La cantidad porcentual de cada componente evaluado (figura 15) para la obtención del carbono total almacenado en el SAF de CP, presenta el mayor valor de 68.37% para el C-suelo, seguido por 18.03% para el C-BA árbol y el menor de 0.29% para el C-Bah.

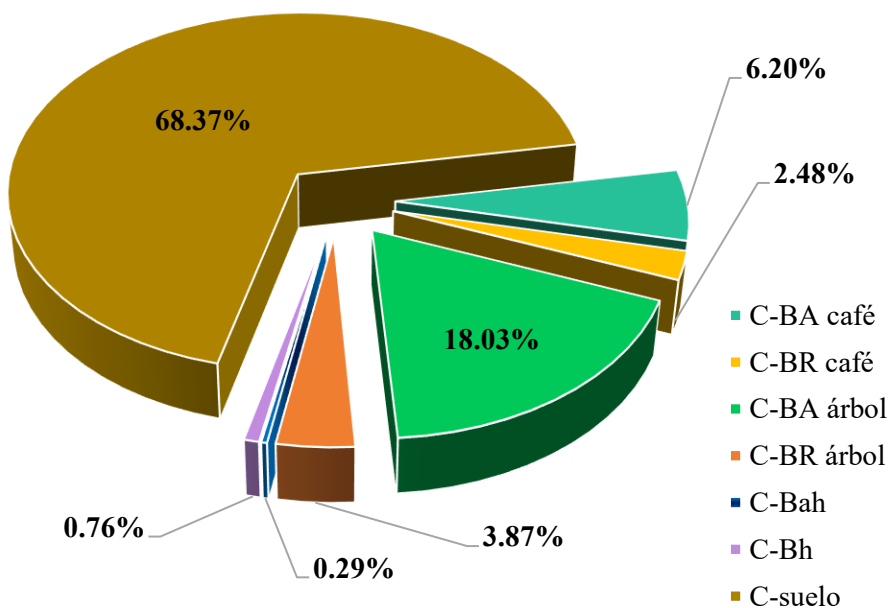


Figura 15. Composición porcentual del carbono total en el sistema de café con pino.

El carbono almacenado en el SAF de CU es descrito mediante las medidas estadísticas para cada variable de estudio (tabla 20), de los cuales los tres valores más altos de almacenamiento son el C-suelo con $145.27 \pm 5.17 \text{ Mg ha}^{-1}$ (CV = 3.56%), el C-BA árbol con 67.53 ± 10.91 (CV = 16.15%) y el carbono en la biomasa radicular del árbol (C-BR árbol) con 13.13 ± 1.87 (CV = 14.24%); la dispersión de los datos para la primera en mención es altamente homogénea y las dos restantes es moderadamente homogénea. El SAF de CU almacenó $241.12 \pm 14.87 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono total (CV de 6.17%, dispersión de datos altamente homogénea).

Tabla 20. Resumen descriptivo del carbono almacenado en el sistema de café con ulcumano.

Variable	n	Media	DE	EE	CV	Mín	Máx	Mediana
C-BA café	3	9.61	2.38	1.37	24.72	7.49	12.18	9.17
C-BR café	3	3.85	0.95	0.55	24.63	3.00	4.87	3.67
C-BA árbol	3	67.53	10.91	6.30	16.15	60.24	80.07	62.28
C-BR árbol	3	13.13	1.87	1.08	14.24	11.88	15.28	12.23
C-Bah	3	0.24	0.16	0.09	67.12	0.14	0.42	0.15
C-Bh	3	1.49	0.53	0.31	35.53	1.15	2.10	1.22
C-suelo	3	145.27	5.17	2.98	3.56	139.35	148.87	147.59
Carbono total	3	241.12	14.87	8.59	6.17	225.95	255.68	241.72

C-BA café (carbono en la biomasa aérea del café), C-BR café (carbono en la biomasa radicular del café), C-BA árbol (carbono en la biomasa aérea del árbol), C-BR árbol (carbono en la biomasa radicular del árbol), C-Bah (carbono en la biomasa arbustiva/herbácea), C-Bh (carbono en la biomasa de la hojarasca) y C-suelo (carbono en el suelo).

García (2019) determinó el stock de carbono para intervalos de DAP de la especie de *R. rospiglosii* en el Bosque de Huamantanga - Jaén, que fueron expresados en unidades de t ha^{-1} y con el fin de realizar comparaciones éstas fueron expresadas en Mg ha^{-1} (unidad equivalente), siendo evaluadas 70 árboles de esta especie y registrándose 2.356 Mg ha^{-1} (fuste), 0.595 (copa), 0.343 (raíz) y $3.294 \pm 1.741 \text{ Mg ha}^{-1}$ (carbono total) correspondientes al intervalo de DAP de $\{0.10 \text{ m}; 0.50 \text{ m}\}$ (población juvenil y la mayoría de los árboles evaluados presentaron un DAP entre 0.30 m a 0.50 m), además, registró 7.314 ± 2.028 y 17.654 ± 0.675 para un DAP de $\{0.50 \text{ m}; 1.00 \text{ m}\}$ y de $\{1.00 \text{ m}; 1.50 \text{ m}\}$ respectivamente; por lo contrario, en la presente investigación se evaluó el carbono almacenado en un SAF de CU, con 208 árboles ha^{-1} de 18 años y un DAP que fluctúa aproximadamente entre 0.25 m y 0.38 m obteniéndose $67.53 \pm 10.91 \text{ Mg ha}^{-1}$ para el C-BA árbol, 13.13 ± 1.87 para el C-BR árbol, siendo la sumatoria de ambas 80.66 Mg ha^{-1} de carbono almacenado para la especie de *R. rospiglosii* (árbol de sombra), este valor es elevado a comparación de lo obtenido por el autor en mención, debido a que se ve influenciada por la gran cantidad de árboles presentes en el sistema evaluado y por su DAP que presenta, considerándose como individuos juveniles de dicha especie.

Paz et al (2022) registraron la media de $74.6 \pm 19.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ para el COS de la tipología de cafetales como monocultivo bajo sombra; comparándolo con lo obtenido en la presente investigación, $145.27 \pm 5.17 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C-suelo, es un valor mayor a lo mencionado por el autor, esta diferencia podría estar influenciada por las especies de árboles de sombra que se asocian al cultivo de café y su sinergia entra ambas, ya que estas contribuyen en la producción de la biomasa y mediante la fotosíntesis propician el almacenamiento del carbono hacia el suelo y aportan la materia orgánica para ser descompuesta y transformada en carbono orgánico del suelo.

El almacenamiento de carbono en cada componente evaluado representa una cantidad porcentual (figura 16) del carbono total en el SAF de CU, teniéndose como mayor valor de 60.248% para el C-suelo, seguido por 28.007% para el C-BA árbol y como los menores valores de 0.618% y 0.099% para el carbono en la biomasa de la hojarasca (C-Bh) y C-Bah respectivamente.

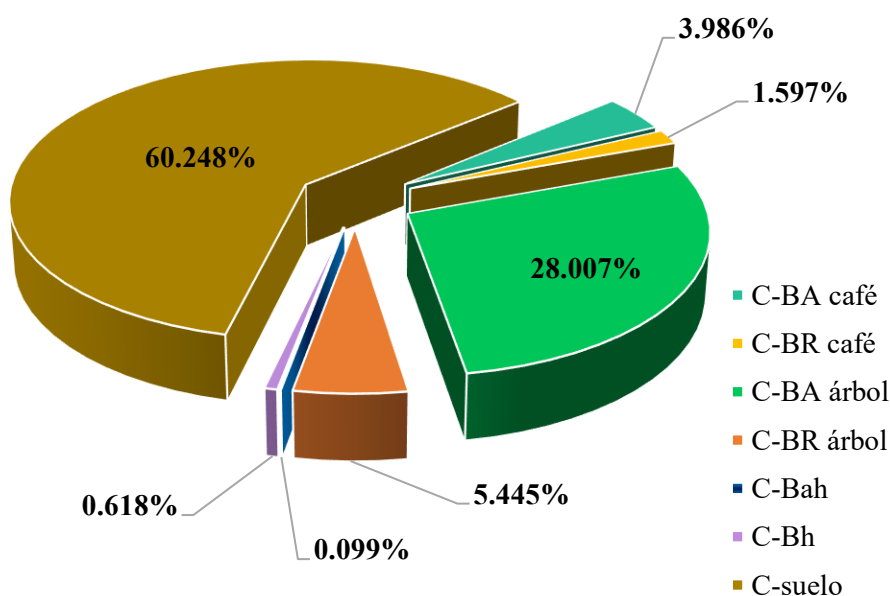


Figura 16. Composición porcentual del carbono total en el sistema de café con ulcumano.

En la tabla 21 se presenta la estadística descriptiva de cada variable estudiada de carbono almacenado para el sistema de control, café sin sombra (Cs). Teniéndose valores de $138.35 \pm 12.53 \text{ Mg ha}^{-1}$ con un CV de 9.06% (dispersión altamente homogénea) para el C-suelo, de $7.32 \pm 1.30 \text{ Mg ha}^{-1}$ con un CV de 17.72% y $2.93 \pm 0.52 \text{ Mg ha}^{-1}$ con un CV de 17.78% para el C-BA café y C-BR café respectivamente, para ambas variables presentan una dispersión moderadamente homogénea.

Además, se tienen valores para el C-Bah con $0.78 \pm 0.29 \text{ Mg ha}^{-1}$ y un CV de 37.20% indicando dispersión heterogénea en sus datos, asimismo, con una mediana (valor medio) de 0.69 y para el C-Bh con $0.65 \pm 0.05 \text{ Mg ha}^{-1}$ y un CV de 7.69% (distribución altamente homogénea).

El carbono total almacenado en el sistema de Cs es de $150.03 \pm 10.75 \text{ Mg ha}^{-1}$ con un CV de 7.17% indicando alta homogeneidad en la dispersión de los datos.

Tabla 21. Resumen descriptivo del carbono almacenado en el sistema de café sin sombra.

Variable	n	Media	DE	EE	CV	Mín	Máx	Mediana
C-BA café	3	7.32	1.30	0.75	17.72	6.29	8.78	6.90
C-BR café	3	2.93	0.52	0.30	17.78	2.51	3.51	2.76
C-BA árbol	3	0.00	0.00	0.00	sd	0.00	0.00	0.00
C-BR árbol	3	0.00	0.00	0.00	sd	0.00	0.00	0.00
C-Bah	3	0.78	0.29	0.17	37.20	0.55	1.11	0.69
C-Bh	3	0.65	0.05	0.03	7.69	0.60	0.70	0.65
C-suelo	3	138.35	12.53	7.23	9.06	124.68	149.29	141.08
Carbono total	3	150.03	10.75	6.21	7.17	138.26	159.34	152.50

C-BA café (carbono en la biomasa aérea del café), C-BR café (carbono en la biomasa radicular del café), C-BA árbol (carbono en la biomasa aérea del árbol), C-BR árbol (carbono en la biomasa radicular del árbol), C-Bah (carbono en la biomasa arbustiva/herbácea), C-Bh (carbono en la biomasa de la hojarasca) y C-suelo (carbono en el suelo).

Clemente-Arenas (2021) citó a Ehrenbergerová et al. (2016), quienes evaluaron un sistema de café (variedades de Típica, Catimor, Caturra y Catuai) expuesto al sol, donde registraron el carbono almacenado en la biomasa aérea del café con $0.2 \pm 0.03 \text{ Mg ha}^{-1}$, a comparación con el valor obtenido en la presente investigación de 7.32 ± 1.30 (C-BA café) con 3787 plantas ha^{-1} de 2 años (podado) y variedades de Caturra y Borbón, señala que la variedad del café y su densidad pueden haber influenciado en el elevado stock de carbono; Soto (2022) reporta el carbono almacenado en las raíces de diferentes variedades del café (en unidades de t ha^{-1} , que se expresan en Mg ha^{-1}), teniéndose para Catimor con 0.029, Bourbón con 0.024 y Typica con 0.022, las cuales son menores a lo obtenido en este estudio ($2.93 \pm 0.52 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C-BR café), esto puede deberse a la edad que presentan, siendo un factor importante en los estudios de estimaciones del stock de carbono en el cultivo de café.

Manchabajoy et al. (2022) evaluaron el sistema de café libre de 6 años con 6804 plantas ha^{-1} con la variedad Castillo a una altitud menor a los 1550 msnm en la que reportaron, el carbono aéreo del café con 11.42 Mg ha^{-1} , el carbono radicular del café con 3.40 ; estos valores en mención son mayores a lo obtenido en esta investigación, 7.32 Mg ha^{-1} para el C-BA café y 2.93 para el C-BR café (3787 plantas ha^{-1} de la variedad de Caturra y Borbón de 2 años con poda), esto indica que para este tipo de sistema lo define su densidad ya que éstas contribuirán en el depósito de carbono en la planta y por ende en el sistema. Asimismo, Jurado et al. (2020) evaluaron el sistema de café a libre exposición (6828 plantas ha^{-1} de la variedad Castillo de 4 años) a diferentes altitudes, estimando 6.64 para el carbono aéreo del café y 1.37 para el carbono radicular del café, son valores menores en comparación a esta investigación, esta ligera diferencia puede deberse a la poda de las plantas de café en el sistema de Cs.

Soto (2022) reporta el stock de carbono en la hojarasca de distintas variedades de café, con $0.05369 \text{ Mg ha}^{-1}$ para Catimor, 0.05018 para Bourbón y 0.04892 para Typica, estas son menores a lo estimado en esta investigación, $0.65 \pm 0.05 \text{ Mg ha}^{-1}$ (C-Bh) con 3787 plantas ha^{-1} de las variedades de Caturra y Borbón, lo que indica que la densidad y edad del café influye en el stock de carbono para este componente; Ehrenbergerová et al. (2016), estimaron el carbono de la hojarasca con $0.7 \pm 0.1 \text{ Mg ha}^{-1}$, este valor es similar a lo obtenido en este estudio ($0.65 \pm 0.05 \text{ Mg ha}^{-1}$), lo que indica que la hojarasca aportada por el café fue similar en ambos estudios, sin embargo, cabe mencionarse que el C-BA café para este estudio es de 7.32 ± 1.30 y por el autor en mención es de 0.2 ± 0.03 , lo que podría señalar que en este último se presentó una defoliación alta del cafeto ya sea por aspectos fitopatológicos o de manejo agronómico.

Respecto al carbono orgánico en el suelo, Ehrenbergerová et al. (2016), citado por Clemente-Arenas (2021), registraron $98.7 \pm 17.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ (sistema de café expuesto al sol) con variedades de Típica, Catimor, Caturra y Catuai; asimismo, Paz et al. (2022) reportaron $112.7 \pm 18.6 \text{ Mg ha}^{-1}$ de COS (cafetales a pleno sol); además, Soto (2022) determinó el COS de tres variedades de café (en unidades de t ha^{-1} y expresadas en Mg ha^{-1}), siendo 166.513 para Catimor, 89.047 para Bourbón y 87.026 para Typica; en comparación con lo obtenido en la presente investigación ($138.35 \pm 2.53 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C-suelo) para el sistema Cs con variedades de Caturra y Borbón, este valor es mayor frente a la mayoría de los mencionados por los autores, exceptuando el $166.513 \text{ Mg ha}^{-1}$ de COS para Catimor (Soto, 2022), lo que podría indicar que la variedad influye en el stock de carbono para este componente, asimismo, cabe mencionarse que la edad del sistema, el manejo agronómico, son factores que también pueden repercutir en la conservación y variabilidad del stock de carbono en el suelo.

En la figura 17 se observa la cantidad porcentual del carbono almacenado en cada componente estudiado en el sistema de Cs, teniéndose los valores de 92.22%, 4.88%, 1.95%, 0.52% y 0.43% correspondientes al C-suelo, C-BA café, C-BR café, C-Bah y C-Bh respectivamente.

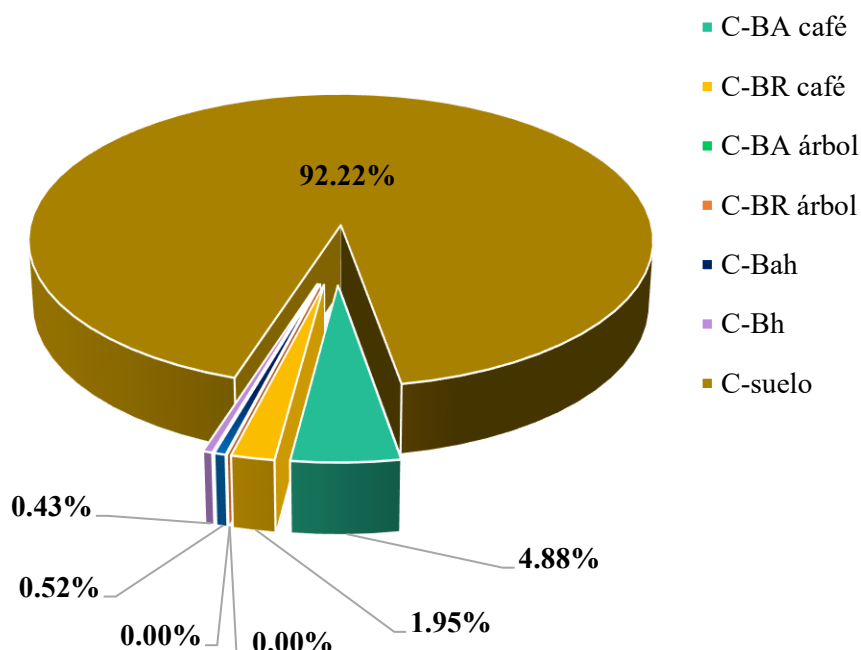


Figura 17. Composición porcentual del carbono total en el sistema de café sin sombra.

- Estimación de la tasa de fijación de carbono

En la tabla 22 se presenta la estadística descriptiva de las variables estudiadas para la tasa de fijación de carbono por cada sistema evaluado. Observándose que la tasa de fijación de carbono del café (TF-C café) es mayor en el SAF de CU con $6.73 \pm 1.66 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (CV de 24.69%, distribución relativamente homogénea), seguido por el sistema de Cs con $5.13 \pm 0.91 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (CV de 17.79%, dispersión moderadamente homogénea). Asimismo, la tasa de fijación de carbono del árbol (TF-C árbol) es superior en el SAF de CU con $4.48 \pm 0.71 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (CV de 15.84%, variabilidad moderadamente homogénea), seguido por el SAF de CG con $3.97 \pm 1.05 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (CV de 26.34%, variabilidad relativamente homogénea).

Respecto a la tasa de fijación de carbono total (TF-C total) es mayor en el SAF de CU ($11.22 \pm 1.26 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ con un CV de 11.23%) y como subsiguiente en el SAF de CP ($6.31 \pm 0.32 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ con un CV de 5.02%), además, el menor valor para esta variable en estudio es para el sistema de Cs que presenta $5.13 \pm 0.91 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ con un CV de 17.79%.

Tabla 22. Resumen descriptivo de la tasa de fijación de carbono por sistema evaluado.

SAF	Variable	n	Media	DE	EE	CV	Mín	Máx	Mediana
CG	TF-C café	3	1.81	0.21	0.12	11.33	1.68	2.05	1.71
CG	TF-C árbol	3	3.97	1.05	0.6	26.34	2.8	4.81	4.31
CG	TF-C total	3	5.79	1.11	0.64	19.14	4.51	6.49	6.36
CP	TF-C café	3	2.79	0.26	0.15	9.23	2.56	3.07	2.75
CP	TF-C árbol	3	3.52	0.5	0.29	14.28	2.95	3.9	3.71
CP	TF-C total	3	6.31	0.32	0.18	5.02	6.02	6.65	6.27
CU	TF-C café	3	6.73	1.66	0.96	24.69	5.25	8.53	6.42
CU	TF-C árbol	3	4.48	0.71	0.41	15.84	4.01	5.3	4.14
CU	TF-C total	3	11.22	1.26	0.73	11.23	10.43	12.67	10.55
Cs	TF-C café	3	5.13	0.91	0.53	17.79	4.4	6.15	4.83
Cs	TF-C árbol	3	0	0	0	sd	0	0	0
Cs	TF-C total	3	5.13	0.91	0.53	17.79	4.4	6.15	4.83

TF-C café (tasa de fijación de carbono del café), TF-C árbol (tasa de fijación de carbono del árbol) y TF-C total (tasa de fijación de carbono total).

Lara et al. (2023) reportan el secuestro bruto de carbono para un sistema agroforestal de café, ubicado en el municipio de Compostela, Nayarit (en t año⁻¹, siendo expresado en Mg año⁻¹), conformada por diferentes especies de árboles de sombra, teniéndose 15.83 Mg año⁻¹ para la especie de *Inga sp.*, proporcionando un dato referencial para esta especie, ya que no se menciona su densidad y edad.

Odar (2018), mencionado también por Clemente-Arenas (2021), registra datos (carbono aéreo para la guaba y café, densidades y edad) para un sistema de café con guaba de 4.5 años, en base a ello se calculó la tasa de fijación de carbono (TF-C) aéreo para la guaba (2.56 Mg ha⁻¹ año⁻¹, 7.78 Kg árbol⁻¹ año⁻¹) y café (0.76 Mg ha⁻¹ año⁻¹, 0.13 Kg planta⁻¹ año⁻¹); en contraste con esta investigación para el SAF de CG se obtuvo la TF-C para la guaba, parte aérea con 3.32 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y 33.25 Kg árbol⁻¹ año⁻¹ (valor diferenciado a lo mencionado por el autor, debido a la edad de la guaba), radicular con 0.65 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y 6.47 Kg árbol⁻¹ año⁻¹, siendo la TF-C árbol de 3.97 ± 1.05 Mg ha⁻¹ año⁻¹; para la TF-C del café, parte aérea con 1.30 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y 0.28 Kg planta⁻¹ año⁻¹ (valor mayor a lo mencionado por el autor, que puede ser debido a las altas densidades que presenta el sistema evaluado por dicho autor, generando una disminución en su TF-C), zona radicular con 0.52 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y 0.11 Kg planta⁻¹ año⁻¹, teniéndose a la TF-C café con 1.81 ± 0.21 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

Ehrenbergerová et al. (2016), citado por Clemente-Arenas (2021), registra datos de edad, densidad y carbono aéreo para un sistema denominado como sitio *Pinus* (pino y otros árboles) de 15 años, calculándose la TF-C de los árboles, en la zona aérea con $3.83 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $30.91 \text{ Kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y la parte radicular con $0.91 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $7.37 \text{ Kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$; en comparación con la investigación para el SAF de CP de 10 años, se tiene como TF-C para el pino, en la zona aérea con $2.90 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $23.20 \text{ Kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en la zona radicular con $0.62 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $4.98 \text{ Kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$, siendo la TF-C árbol de 3.52 ± 0.5 , estos valores son menores a lo mencionado por el autor, debido a la diferencia de edad de los árboles de sombra, indicando que el carbono se incrementa en relación al tiempo transcurrido. Cabe mencionarse que para este estudio se obtuvo la TF-C del café, siendo para la zona aérea de $1.99 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $0.36 \text{ Kg planta}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en lo radicular de $0.80 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $0.14 \text{ Kg planta}^{-1} \text{ año}^{-1}$, siendo la TF-C café de $2.79 \pm 0.26 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Para el SAF de CU se tiene la TF-C para el árbol, la parte aérea con $3.75 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $18.04 \text{ Kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$, la zona radicular con $0.73 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $3.51 \text{ Kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$, siendo la TF-C árbol de $4.48 \pm 0.71 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; para la TF-C del café, la zona aérea con $4.81 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $1.15 \text{ Kg planta}^{-1} \text{ año}^{-1}$, la parte radicular con $1.93 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $0.46 \text{ Kg planta}^{-1} \text{ año}^{-1}$, teniéndose como TF-C café con $6.73 \pm 1.66 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Jurado et al. (2020) evaluó el café a libre exposición a diferentes altitudes, registrando datos de densidad ($6828 \text{ plantas ha}^{-1}$) y edad (4 años) y en base a ello se calculó la TF-C del café, siendo $1.66 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $0.24 \text{ Kg planta}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para la zona aérea, para lo radicular con $0.34 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $0.05 \text{ Kg planta}^{-1} \text{ año}^{-1}$; en comparación con este estudio en la que se evaluó el sistema de Cs ($3787 \text{ plantas ha}^{-1}$ de 2 años de podado), se registra para la zona aérea $3.66 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $0.97 \text{ Kg planta}^{-1} \text{ año}^{-1}$, para lo radicular $1.47 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $0.39 \text{ Kg planta}^{-1} \text{ año}^{-1}$, siendo la TF-C café de $5.13 \pm 0.91 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, cantidades mayores a lo mencionado por el autor, esto puede deberse a las características topográficas del terreno, al manejo agronómico del cultivo de café y la conservación de la fertilidad del suelo que propician el almacenamiento del carbono en el cafeto respecto al tiempo. Lara et al. (2023) reportan el secuestro bruto de carbono para un sistema agroforestal de café, ubicado en el municipio de Compostela, Nayarit (en t año^{-1} , siendo expresado en Mg año^{-1}), conformada por diferentes especies de árboles de sombra, teniéndose 0.17 Mg año^{-1} para la especie de *Coffea sp.*, proporcionando un dato referencial, ya que no se menciona datos de su densidad y edad.

Se observa el gráfico de barras apiladas de la composición porcentual de la tasa de fijación de carbono por cada sistema evaluado comprendiendo así su TF-C total (figura 18), teniéndose que, en el SAF de CU la TF-C café representa un 60.04% y la TF-C árbol un 39.96%, asimismo, para el CP la TF-C café es 44.22% y la TF-C árbol es 55.78%, además para el CG la TF-C café es de 31.31% y la TF-C árbol es de 68.69%.

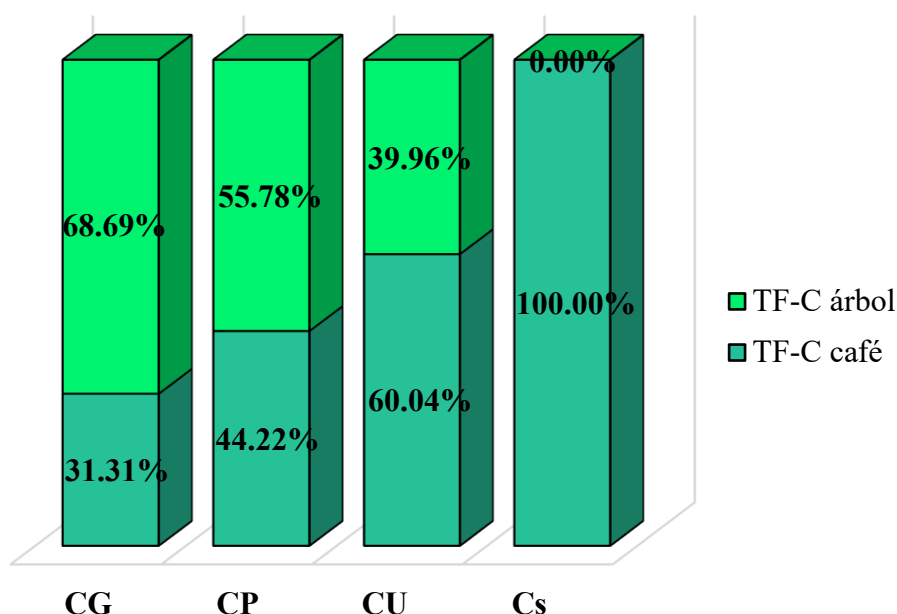


Figura 18. Composición porcentual de la tasa de fijación de carbono por sistema evaluado mediante barras apiladas.

- Estimación del aporte de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente

Los componentes evaluados para la estimación de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente por cada sistema son descritos mediante las medidas estadísticas (tabla 23); observándose que la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente del café (TF-CO₂e café) es superior en el SAF de CU con $24.71 \pm 6.10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (CV de 24.69%), seguido por el sistema de Cs con $18.82 \pm 3.35 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (CV de 17.78%).

Además, la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente del árbol (TF-CO₂e árbol) es alto en el SAF de CU con $16.45 \pm 2.61 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (CV de 15.84%), seguido por el SAF de CG con $14.58 \pm 3.84 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (CV de 26.31%).

La estimación de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente total (TF-CO₂e total) es superior en el SAF de CU (41.17 ± 4.62 Mg ha⁻¹ año⁻¹ con un CV de 11.23%), seguido por el SAF de CP (23.17 ± 1.16 Mg ha⁻¹ año⁻¹ con un CV de 5.00%), luego el SAF CG (21.24 ± 4.06 Mg ha⁻¹ año⁻¹ con un CV de 19.12%) y como valor inferior para esta variable en estudio se tiene al sistema de Cs con 18.82 ± 3.35 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (CV de 17.78%); respecto a la dispersión de los datos, la segunda en mención presenta una alta homogeneidad y las tres restantes son moderadamente homogéneas.

Tabla 23. Resumen descriptivo de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente por sistema evaluado.

SAF	Variable	n	Media	DE	EE	CV	Mín	Máx	Mediana
CG	TF-CO ₂ e café	3	6.66	0.75	0.43	11.26	6.17	7.52	6.28
CG	TF-CO ₂ e árbol	3	14.58	3.84	2.22	26.31	10.28	17.65	15.82
CG	TF-CO ₂ e total	3	21.24	4.06	2.34	19.12	16.56	23.82	23.34
CP	TF-CO ₂ e café	3	10.25	0.95	0.55	9.22	9.4	11.27	10.09
CP	TF-CO ₂ e árbol	3	12.92	1.84	1.06	14.26	10.83	14.31	13.62
CP	TF-CO ₂ e total	3	23.17	1.16	0.67	5.00	22.1	24.4	23.02
CU	TF-CO ₂ e café	3	24.71	6.10	3.52	24.69	19.27	31.31	23.56
CU	TF-CO ₂ e árbol	3	16.45	2.61	1.5	15.84	14.72	19.45	15.19
CU	TF-CO ₂ e total	3	41.17	4.62	2.67	11.23	38.28	46.5	38.72
Cs	TF-CO ₂ e café	3	18.82	3.35	1.93	17.78	16.15	22.57	17.73
Cs	TF-CO ₂ e árbol	3	0	0	0	sd	0	0	0
Cs	TF-CO ₂ e total	3	18.82	3.35	1.93	17.78	16.15	22.57	17.73

TF-CO₂e café (tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente del café), TF-CO₂e árbol (tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente del árbol) y TF-CO₂e total (tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente total).

En la figura 19 se observa el gráfico de barras apiladas con la cantidad porcentual de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente por cada sistema evaluado comprendiendo así la TF-CO₂e total. Para el SAF de CU la TF-CO₂e café representa un 60.03% y la TF-CO₂e árbol un 39.97%, asimismo, para el CP la TF-CO₂e café es 44.24% y la TF-CO₂e árbol es 55.76%, además se tiene para el CG la TF-CO₂e café un valor de 31.36% y la TF-CO₂e árbol con un valor de 68.64%.

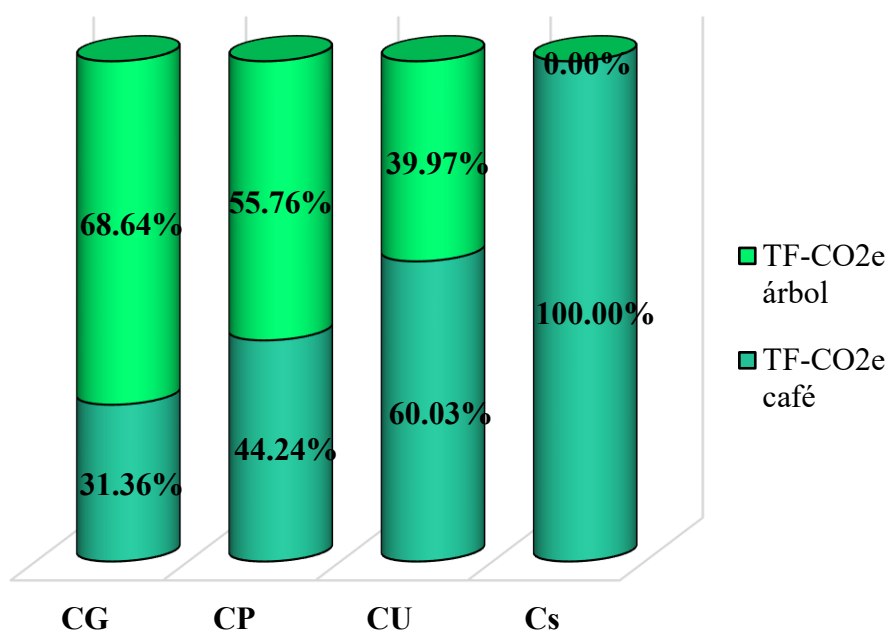


Figura 19. Composición porcentual de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente por sistema evaluado mediante barras apiladas.

- Inferencia estadística

En base a los valores de media totales obtenidos de biomasa, carbono, tasa de fijación de carbono y de dióxido de carbono equivalente para cada sistema evaluado, se infiere hacia la población. Cabe mencionarse que para el distrito de San Luis de Shuaro se cuenta con una media de 4375.5 ha de cultivo de café en producción, las cuales están asociadas a diferentes árboles de sombra, en su mayoría por la guaba y de forma minoritaria por el pino, ulcumano y entre otros, asimismo, también están conformadas por las parcelas de café sin árboles de sombra. Por lo tanto, el almacenamiento de carbono obtenido por los sistemas es promediado (tabla 24) y luego es estimado para el distrito (tabla 25) mediante un análisis inductivo, teniéndose en cuenta que la edad, la densidad de siembra, el manejo agronómico y las características climáticas influyen en su estimación.

Tabla 24. Promedio de los totales de biomasa, carbono, TF-C y TF-CO₂e por sistema evaluado.

SAF	Biomasa total (Mg ha ⁻¹)	Carbono total (Mg ha ⁻¹)	TF-C total (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	TF-CO ₂ e total (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
CG	192.29	206.48	5.79	21.24
CP	108.92	160.82	6.31	23.17
CU	204.72	241.12	11.22	41.17
Cs	25.26	150.03	5.13	18.82
Promedio	132.80	189.61	7.11	26.10

Para el distrito de San Luis de Shuaro se estimó una biomasa total de 581066.40 Mg que comprende los componentes de árboles de sombra, plantas de café, arbustos/herbáceas y hojarascas, asimismo, como carbono total 829638.56 Mg que comprende los componentes anteriormente mencionados y sumado a ello el suelo, como TF-C total con 31109.81 Mg año⁻¹ y como TF-CO₂e total con 114200.55 Mg año⁻¹, ambas tasas comprenden los componentes de plantas de café y árboles de sombra.

Tabla 25. Estimación del almacenamiento de carbono para el distrito de San Luis de Shuaro.

Distrito	Biomasa total (Mg)	Carbono total (Mg)	TF-C total (Mg año⁻¹)	TF-CO₂e total (Mg año⁻¹)
San Luis de Shuaro	581066.40	829638.56	31109.81	114200.55

c) Comparación del almacenamiento de carbono de los sistemas agroforestales

La evaluación del almacenamiento de carbono se realizó mediante el procesamiento de los datos de biomasa (aérea, radicular, arbustiva/herbácea y de la hojarasca), carbono almacenado (biomasa y suelo), la tasa de fijación de carbono (café y árboles de sombra) y la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente (café y árboles de sombra). Para la comparación entre los SAF se realizaron las pruebas estadísticas de Shapiro-Wilks (modificado) para la prueba de normalidad de los datos y la prueba de Levene para conocer la homogeneidad de varianzas entre los sistemas.

- Biomasa

En la tabla 26 se observa los resultados estadísticos del valor de “p” obtenido para cada variable estudiada de la biomasa, mostrándose la interpretación que refleja dicho valor al compararla con el nivel de significancia del 5%, tanto para la prueba de normalidad de los datos y para la prueba de homogeneidad de varianzas entre los SAF, que permiten aceptar o rechazar la hipótesis nula (H₀).

En base a las pruebas estadísticas antes mencionadas, para la BA café, BR café y Bh se aplicó la prueba paramétrica de análisis de la varianza (ANOVA) con la prueba de Tukey al 5% y para la BA árbol, BR árbol, Bah y biomasa total se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis al 5%.

Tabla 26. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos de biomasa.

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilks modificado)			Prueba de homogeneidad de varianzas (Levene)			Comparación entre SAF
Variable	p-valor	Interpretación	Variable	p-valor	Interpretación	
RDUO	0.8186	Se acepta la H_0	RABS	0.1827	Se acepta la H_0	Prueba paramétrica
BA café			BA café			Prueba paramétrica
RDUO	0.8216	Se acepta la H_0	RABS	0.1841	Se acepta la H_0	Prueba paramétrica
BR café			BR café			Prueba no paramétrica
RDUO	0.7822	Se acepta la H_0	RABS	0.0189	Se rechaza la H_0	Prueba no paramétrica
BA árbol			BA árbol			Prueba no paramétrica
RDUO	0.7906	Se acepta la H_0	RABS	0.0195	Se rechaza la H_0	Prueba no paramétrica
BR árbol			BR árbol			Prueba no paramétrica
RDUO	0.3819	Se acepta la H_0	RABS	0.0418	Se rechaza la H_0	Prueba no paramétrica
Bah			Bah			Prueba paramétrica
RDUO	0.6596	Se acepta la H_0	RABS	0.0689	Se acepta la H_0	Prueba paramétrica
Bh			Bh			Prueba no paramétrica
RDUO	0.8042	Se acepta la H_0	RABS	0.0211	Se rechaza la H_0	Prueba no paramétrica
Biomasa total			Biomasa total			Prueba no paramétrica

Pruebas estadísticas realizadas con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$). RDUO: residuo. RABS: residuo absoluto. H_0 : Hipótesis nula.

Al aplicar la prueba estadística para la comparación de los datos de biomasa entre los SAF se obtiene el valor de “p” para cada variable de estudio, los cuales son mostrados en la tabla 27. Estos valores reflejan que en todas las variables de biomasa existen diferencias significativas entre los sistemas, teniéndose a la Bh con diferencias altamente significativas.

Tabla 27. Valor de “p” obtenido en la comparación de datos de la biomasa entre los sistemas.

Variable	BA café (*)	BR café (*)	BA árbol (**)	BR árbol (**)	Bah (**)	Bh (*)	Biomasa total (**)
p-valor	0.0126	0.0126	0.0234	0.0234	0.0269	0.0005	0.0249

(*) ANOVA con prueba de Tukey al 5%, (**) Kruskal Wallis al 5%.

En la tabla 28 se presenta los valores de las medias y medianas de biomasa en base a la prueba paramétrica o no paramétrica aplicada; teniéndose a los SAF de CP con 21.14 y 8.46 Mg ha⁻¹ y CU con 20.38 y 8.15 Mg ha⁻¹ que sobresalen en la BA café y BR café respectivamente; asimismo, para la BA árbol y BR árbol sobresalen CG (153.65 y 29.66 Mg ha⁻¹ respectivamente) y CU (132.51 y 26.03 Mg ha⁻¹ respectivamente); para la Bah se observa que el sistema de Cs sobresale frente a las demás con 1.56 Mg ha⁻¹, esto se debe a que dicho sistema presentó una gran cantidad de herbáceas distribuidas en toda la parcela; para la Bh se tiene al SAF de CG con 7.84 Mg ha⁻¹, cantidad mayor y representativa frente a las demás, esto se debe al gran aporte de hojarasca por los árboles de sombra (guaba) de 20 años, sumándose a ello lo contribuido por el cafeto.

Respecto a la biomasa total sobresalen los SAF de CG con 209.32 y CU con 198.12 Mg ha⁻¹, al presentar los mayores valores frente a las demás, en cambio el sistema de Cs (24.75 Mg ha⁻¹) presenta el menor valor, debido a que el cultivo de café se encuentra expuesto al sol sin la presencia de árboles de sombra. Estos resultados evidencian que la composición y estructura del sistema evaluado influyen de manera determinante en el aporte de biomasa.

Tabla 28. Comparación de los datos de biomasa entre los sistemas evaluados.

SAF	Variables de biomasa (Mg ha ⁻¹)											Biomasa total (**)		
	BA café (*)		BR café (*)		BA árbol (**)		BR árbol (**)		Bah (**)		Bh (*)			
CG	10.98	b	4.39	b	153.65	a	29.66	a	0.08	b	7.84	a	209.32	a
CP	21.14	a	8.46	a	65.13	ab	13.90	ab	0.89	ab	3.33	b	111.20	ab
CU	20.38	a	8.15	a	132.51	a	26.03	a	0.34	ab	4.03	b	198.12	a
Cs	15.52	ab	6.21	ab	0.00	b	0.00	b	1.56	a	1.75	b	24.75	b

(*) ANOVA con prueba de Tukey al 5%, (**) Kruskal Wallis al 5%. Valores que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sistemas por variable o componente evaluado.

Sánchez et al. (2023) evaluaron la biomasa (en t ha⁻¹, las cuales son expresadas en Mg ha⁻¹ como unidad equivalente) de un SAF comprendida de laurel + café a una altitud de 1324 msnm, en la que reportaron la biomasa viva (árboles y cafeto) con 94.522 Mg ha⁻¹ y la biomasa de la hojarasca con 136.000 Mg ha⁻¹, obteniéndose la sumatoria de ambas de 230.522 Mg ha⁻¹ de biomasa acumulada para dicho sistema; Zavala et al. (2018a) determinaron la cantidad de biomasa de un SAF con café a una altitud de 1500 msnm, registrando 219.43 Mg ha⁻¹ como biomasa total (comprendida por la biomasa, aérea de árboles vivos, del café, de la hojarasca y arbustiva); Hurtado (2019) determinó la biomasa de un SAF conformado por las especies de *Coffea arabica* L. y *Eucalyptus saligna* (a una altitud mayor a 2200 msnm), registrando un promedio de 428.55 Mg ha⁻¹ (comprendido por la biomasa, aérea del café y árbol, arbustiva/herbácea y de la hojarasca); en contraste con esta investigación, los valores obtenidos de biomasa total por sistema evaluado (a 1387 msnm aproximadamente), son menores a los reportados por estos autores, esto señala que las características topográficas como la altitud influye en la biomasa generada por los árboles de sombra y el café, asimismo, que a altitudes mayores, como lo reportado por Hurtado (2019), el aporte de biomasa se incrementa en el SAF.

Además, Silva y Olaya (2019) cuantificaron la biomasa en un SAF (café asociado con guaba) a una altitud de 1145 msnm, registrando un promedio de 58.28 Mg ha⁻¹ (comprendiendo la biomasa aérea del café y guaba, biomasa de la hojarasca) con densidades de 3703 plantas ha⁻¹ de café y 70 árboles ha⁻¹ de guaba; esta cantidad de biomasa es considerablemente menor a lo obtenido en los SAF evaluados en este estudio, para el CG con 209.32 (4545 plantas ha⁻¹ de café y 100 árboles ha⁻¹), para CP con 111.20 (5555 plantas ha⁻¹ de café y 125 árboles ha⁻¹) y para CU con 198.12 (4166 plantas ha⁻¹ de café y 208 árboles ha⁻¹), exceptuando al sistema de Cs (24.75 Mg ha⁻¹), esto señala la importancia de la densidad de siembra del café y de las especies de árboles de sombra, concordando con Hurtado (2019) quién menciona que la biomasa aérea, estimada a partir de un indicador importante como el DAP, está relacionada con la especie del árbol de sombra y la densidad que presenta, sumándose a ello también el cafeto.

En la figura 20 se observa el gráfico de caja (box-plot) de la biomasa total por cada sistema evaluado, observándose el valor de las medianas y las diferencias estadísticas que presentan (mediante letras). Comprendiéndose que el CG y CU sobresalen significativamente como mayores aportes de biomasa total, sin embargo, el CP presenta una similitud estadística con ambos sistemas mencionados anteriormente.

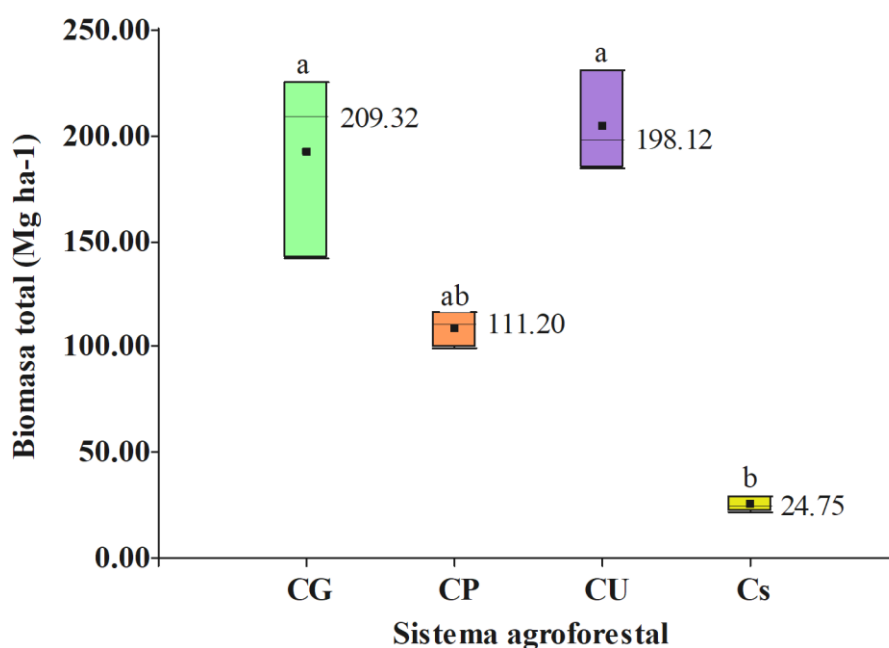


Figura 20. Comparación de medianas de la biomasa total entre los sistemas estudiados.

- Carbono almacenado

La prueba de normalidad de los datos y la prueba de homogeneidad de varianzas entre los sistemas evaluados fueron aplicados a las variables de carbono almacenado con un nivel de significancia del 5%, obteniéndose el valor de “p” que permite su interpretación para aceptar o rechazar la H_0 (tabla 29). En base a ello para el C-BA café, C-BR café, C-Bh, C-suelo y carbono total se aplicó la prueba paramétrica de ANOVA con la prueba de Tukey al 5% y para el C-BA árbol, C-BR árbol y C-Bah se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis al 5%.

Tabla 29. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas del carbono almacenado.

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilks modificado)			Prueba de homogeneidad de varianzas (Levene)			Comparación entre SAF
Variable	p-valor	Interpretación	Variable	p-valor	Interpretación	
RDUO C-BA café	0.8230	Se acepta la H_0	RABS C-BA café	0.1814	Se acepta la H_0	Prueba paramétrica
RDUO C-BR café	0.8236	Se acepta la H_0	RABS C-BR café	0.1841	Se acepta la H_0	Prueba paramétrica
RDUO C-BA árbol	0.7821	Se acepta la H_0	RABS C-BA árbol	0.0188	Se rechaza la H_0	Prueba no paramétrica
RDUO C-BR árbol	0.7872	Se acepta la H_0	RABS C-BR árbol	0.0194	Se rechaza la H_0	Prueba no paramétrica
RDUO C-Bah	0.3680	Se acepta la H_0	RABS C-Bah	0.0400	Se rechaza la H_0	Prueba no paramétrica
RDUO C-Bh	0.6590	Se acepta la H_0	RABS C-Bh	0.0676	Se acepta la H_0	Prueba paramétrica
RDUO C-suelo	0.8825	Se acepta la H_0	RABS C-suelo	0.2907	Se acepta la H_0	Prueba paramétrica
RDUO Carbono total	0.8217	Se acepta la H_0	RABS Carbono total	0.3517	Se acepta la H_0	Prueba paramétrica

Pruebas estadísticas realizadas con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$). RDUO: residuo. RABS: residuo absoluto. H_0 : Hipótesis nula.

Al realizar la comparación de los datos de carbono almacenado entre los SAF mediante la aplicación de la prueba estadística, se obtiene el valor de “p” para cada variable de estudio (tabla 30). Estos valores demuestran que para todas las variables de carbono almacenado existen diferencias estadísticas significativas entre los sistemas, resaltando que estas diferencias para el C-Bh, C-suelo y carbono total son altamente significativas.

Tabla 30. Valor de “p” obtenido en la comparación de datos del carbono almacenado entre los sistemas.

Variable	C-BA café (*)	C-BR café (*)	C-BA árbol (**)	C-BR árbol (**)	C-Bah (**)	C-Bh (*)	C-suelo (*)	Carbono total (*)
p-valor	0.0126	0.0123	0.0234	0.0234	0.0269	0.0005	0.0022	0.0002

(*) ANOVA con prueba de Tukey al 5%, (**) Kruskal Wallis al 5%.

Se tiene los valores de las medias y medianas de carbono almacenado con sus respectivas diferencias significativas (tabla 31); teniéndose que para las variables de C-BA café y el C-BR café destacan los SAF de CP (9.97 y 3.99 Mg ha⁻¹ respectivamente) y CU (9.61 y 3.85 Mg ha⁻¹ respectivamente); además, para el C-BA árbol y C-BR árbol sobresalen los SAF de CG con 72.22 y 13.94 Mg ha⁻¹ respectivamente y CU con 62.28 y 12.23 Mg ha⁻¹ respectivamente; para el C-Bah se tiene al sistema de Cs como el mayor depósito de carbono (0.69 Mg ha⁻¹) frente a las demás, esto se debe al manejo agronómico del sistema, como la poca frecuencia de deshierbo de la parcela; para el C-Bh destaca el SAF de CG con 2.90 Mg ha⁻¹, este depósito de carbono es mayor frente a las demás debido a que los árboles de sombra para este sistema son de mayor edad respecto a las otras, por lo tanto su contribución de hojarasca respecto al tiempo es mayor.

El SAF de CU es mayor y representativo respecto al C-suelo con 145.27 Mg ha⁻¹, esto puede deberse a la alta densidad (208 árboles ha⁻¹) frente a las demás y por la edad (18 años) que tienen los árboles sombra para este sistema, tiempo en la que se ha incrementado el carbono orgánico en el suelo, y con menor valor para esta variable se tiene al CP con 109.94 Mg ha⁻¹, esto puede deberse a la menor edad de los árboles de pino (10 años) respecto a las demás; cabe mencionarse que para que se incremente el carbono orgánico en este depósito depende primordialmente de la actividad microbiana que descompone la materia orgánica presente y que éste sea de fácil degradación (Ehrenbergerová et al., 2016 y Rüginitz et al., 2009).

En cuanto al carbono total, sobresalen el SAF de CU con 241.12 y CG con 206.48 Mg ha⁻¹, cabe mencionarse que esta estimación se ve influenciada por las densidades y edad que presenten tanto el árbol y el cafeto; asimismo, el manejo agronómico condiciona la conservación y el incremento del carbono orgánico en el suelo y por lo tanto en el sistema (Ehrenbergerová et al., 2016).

Tabla 31. Comparación de los datos de carbono almacenado entre los sistemas evaluados.

SAF	Variables de carbono (Mg ha ⁻¹)														Carbono total (*)	
	C-BA café (*)		C-BR café (*)		C-BA árbol (**)		C-BR árbol (**)		C-Bah (**)		C-Bh (*)		C-suelo (*)			
CG	5.18	b	2.07	b	72.22	a	13.94	a	0.04	b	2.90	a	116.87	bc	206.48	a
CP	9.97	a	3.99	a	30.61	ab	6.53	ab	0.39	ab	1.23	b	109.94	c	160.82	b
CU	9.61	a	3.85	a	62.28	a	12.23	a	0.15	ab	1.49	b	145.27	a	241.12	a
Cs	7.32	ab	2.93	ab	0.00	b	0.00	b	0.69	a	0.65	b	138.35	ab	150.03	b

(*) ANOVA con prueba de Tukey al 5%, (**) Kruskal Wallis al 5%. Valores que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sistemas por variable o componente evaluado.

Sánchez et al. (2023), citaron a CATIE (2008), en la que reporta (en t ha⁻¹, siendo expresada en Mg ha⁻¹ como unidad equivalente) que los SAF almacenan carbono entre 12 y 228 Mg ha⁻¹; en contraste, los valores obtenidos de carbono total para cada sistema evaluado en este estudio, el CG (206.48) y CP (160.82) se encuentran dentro de este intervalo mencionado por el autor, con excepción del CU (241.12 Mg ha⁻¹) que supera dicho intervalo, esto puede deberse a los componentes evaluados que conforman el sistema, ya que en muchos estudios no consideran la biomasa radicular de los árboles de sombra y del cafeto, en cambio en esta investigación están consideradas como componentes que contribuyen en el almacenamiento de carbono para dicho sistema.

Silva y Olaya (2019) registraron un promedio de 133.27 Mg ha⁻¹ de carbono almacenado para un SAF, conformado por café con *Inga edulis* ubicada a una altitud de 1145 msnm de 15 años con densidades de 3703 plantas ha⁻¹ de café y 70 árboles ha⁻¹ de guaba, dicho valor de carbono almacenado es menor en comparación a lo obtenido por los SAF de CG, CP y CU (ubicados a 1387 msnm aproximadamente) de este estudio e incluso menor al Cs (150.03 Mg ha⁻¹) y de manera específica comparándolo con el CG con 206.48 Mg ha⁻¹ (*Inga lineata* de 20 años y el cafeto de 4 años a una altitud de 1369 msnm) es considerablemente mayor a lo mencionado por el autor, esto puede deberse a la altitud que presenta la zona estudiada, considerándose como un factor importante que influye en el carbono almacenado para este sistema, asimismo, la diferenciación de la especie de guaba indica que también juega un papel importante en el stock de carbono.

Además, se tiene a Zavala et al. (2018a) quiénes reportaron el carbono total almacenado de 184.68 Mg ha⁻¹ para un SAF (café con guaba y otras especies forestales) a una altitud de 1500 msnm, cantidad que comprende el carbono almacenado en los componentes de la biomasa aérea viva de los árboles, café, arbustos, hojarasca y suelo; en comparación con este estudio, esta cantidad es superada por los SAF de CG y CU, con excepción de CP e incluso Cs al ser menores a lo mencionado por dicho autor, con esto se confirma la importancia de estandarizar los componentes de estudio para los SAF con café ya que son determinantes en el stock de carbono.

También Paz et al. (2022) registraron el promedio de 136.88 Mg ha⁻¹ como carbono total para el sistema de café denominado como “monocultivo bajo sombra” comprendida por lo componentes de biomasa aérea del café, biomasa aérea y radicular del árbol, arbustos/herbáceas, árboles muertos en pie y tocones, mantillo, material leñoso muerto; esta cantidad es menor a comparación con esta investigación, a pesar de que se evaluaron más componentes del sistema en el estudio del autor en mención; esto podría indicar que la variabilidad de los árboles de sombra condiciona el stock del carbono para el sistema.

Manchabajoy et al. (2022) evaluaron el carbono almacenado en la biomasa aérea (café, árbol y hojarasca) y bajo el suelo (raíces y suelo) para cuatro sistemas productivos de café a una altitud menor a 1550 msnm, registrando (en unidades de t ha⁻¹, las cuales se expresan en Mg ha⁻¹ como unidad equivalente) para el café-limón (densidades de 6625 plantas ha⁻¹ de café y 179 árboles ha⁻¹) con 86.0 Mg ha⁻¹, café-guamo (densidades de 6663 plantas ha⁻¹ y 141 árboles ha⁻¹) con 88.4, café-carbonero (6725 plantas ha⁻¹ y 79 árboles ha⁻¹) con 330.4 y para el café libre (6804 plantas ha⁻¹) con 68.4 Mg ha⁻¹, las cuales son menores a comparación con esta investigación, con excepción del café-carbonero reportado por el autor en mención, que es considerablemente mayor a lo obtenido en los SAF evaluados, esto indica la importancia de las densidades de siembra, ya que la cantidad de árboles por hectárea tiene que estar relacionada con la del café, para un mejor manejo de la sinergia entre estos componentes dentro del sistema (Villarreyna et al., 2020), asimismo, es por ello que el Cenicafe (2021) e INIA (2022) recomiendan que la densidad de siembra de los árboles de sombra no supere los 70 árboles ha⁻¹ mientras el café presente densidades mayores a 5000 plantas ha⁻¹.

Vallejos-Torres et al. (2024) estimaron el stock de carbono para los tipos de sistemas agroforestales con café, reportando la reserva total de carbono (en unidades de $t\ ha^{-1}$, el cual se expresa en $Mg\ ha^{-1}$, unidad equivalente) con 117.13 $Mg\ ha^{-1}$ para el “café con árboles de sombra *Inga sp.*”, con 75.83 para el “café con policultivo” y 2.16 para el “café sin árboles de sombra”, con características de densidad del café de 1500, 1450 y 2000 respectivamente, esta cantidad comprende el carbono almacenado en la biomasa aérea del café y árboles de sombra, de la biomasa de la raíz, del material herbáceo, la hojarasca, de la madera muerta y el carbono orgánico del suelo; el estudio se llevó a cabo en los Anexos del distrito de Tabalosos (con altitudes que varía entre los 500 y 1000 msnm), provincia de Lamas, región de San Martín; estos valores de carbono total son menores al compararlos con lo obtenido en esta investigación (CG con 206.48, CP con 160.82, CU con 241.12 y Cs con 150.03), teniéndose en cuenta que los sistemas fueron evaluados alrededor de una altitud de 1387 msnm y presentan mayores densidades de café a lo estudiado por los autores; esto señala que la densidad influye en el carbono almacenado por hectárea y la diferencia de altitud también puede haber influenciado en ello.

Valdés-Velarde et al. (2022) reportaron un promedio de 245.08 $Mg\ ha^{-1}$ para los SAF basados en el cultivo del café para altitudes mayores a 2200 msnm, los componentes que comprenden este carbono almacenado son los árboles, café, herbáceas, mantillo, troncos caídos, raíces y suelo, cantidad que es mayor a lo obtenido como carbono total en este estudio, sin embargo, el CU (241.12 $Mg\ ha^{-1}$) es relativamente menor a lo mencionado por el autor. También se tiene a Hurtado (2019) quién determinó el promedio de la captura de carbono con 279.83 $Mg\ ha^{-1}$ para un SAF de café con *Eucalyptus saligna* de 4 años con densidades de siembra de 4200 y 600 respectivamente, a una altitud mayor a 2200 msnm, esta cantidad comprende el carbono almacenado en la biomasa aérea del café y árbol, arbustos/herbácea, hojarasca y suelo; de igual manera este valor reportado por el autor en mención, es mayor a lo reportado en esta investigación; esto indica que la densidad de siembra influye en el carbono almacenado por el sistema.

En la figura 21 se presenta el gráfico de barras del carbono total con su error estándar al 95% de confianza y las letras comparativas de significancia estadística para los sistemas evaluados, comprendiéndose que el CG y CU, no presentan diferencias estadísticas significativas al compartir la misma letra, asimismo estos SAF sobresalen respecto a las demás por presentar mayor carbono almacenado.

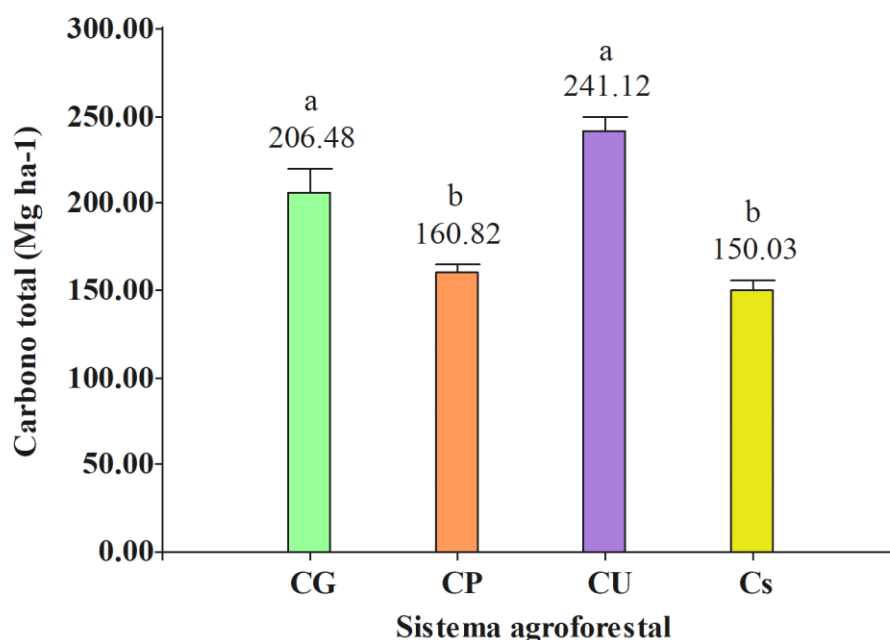


Figura 21. Comparación de medias y el error estándar al 95% de confianza del carbono total entre los sistemas.

- Tasa de fijación de carbono

Para cada variable de la tasa de fijación de carbono se observa el valor de “p” y su interpretación de aceptar o rechazar la H_0 tanto para la prueba de normalidad de los datos y de homogeneidad de varianzas entre los sistemas evaluados con un nivel de significancia del 5% (tabla 32). En base a ello se aplicó la prueba paramétrica de ANOVA con la prueba de Tukey al 5% para la TF-C café y la TF-C total, asimismo, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis al 5% para la TF-C árbol.

Tabla 32. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos de la tasa de fijación de carbono.

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilks modificado)			Prueba de homogeneidad de varianzas (Levene)			Comparación entre SAF
Variable	p-valor	Interpretación	Variable	p-valor	Interpretación	
RDUO			RABS			
TF-C café	0.7073	Se acepta la H_0	TF-C café	0.0586	Se acepta la H_0	Prueba paramétrica
RDUO			RABS			
TF-C árbol	0.7648	Se acepta la H_0	TF-C árbol	0.0346	Se rechaza la H_0	Prueba no paramétrica
RDUO			RABS			
TF-C total	0.7583	Se acepta la H_0	TF-C total	0.1179	Se acepta la H_0	Prueba paramétrica

Pruebas estadísticas realizadas con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$). RDUO: residuo. RABS: residuo absoluto. H_0 : Hipótesis nula.

Mediante la aplicación de la prueba estadística, ya sea la paramétrica o no paramétrica, se realizó la comparación de los datos de la tasa de fijación de carbono entre los SAF, obteniéndose el valor de “p” para cada variable estudiada (tabla 33). Estos valores son menores que el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$), por lo tanto, presentan diferencias estadísticas significativas entre los sistemas, siendo altamente significativas para la TF-C café y TF-C total.

Tabla 33. Valor de “p” obtenido en la comparación de datos de la tasa de fijación de carbono entre los sistemas.

Variable	TF-C café (*)	TF-C árbol (**)	TF-C total (*)
p-valor	0.0009	0.0475	0.0002

(*) ANOVA con prueba de Tukey al 5%, (**) Kruskal Wallis al 5%.

En la tabla 34 se tiene los valores de medias y medianas de la tasa de fijación de carbono (TF-C) con sus respectivas diferencias estadísticas, en cuanto a la TF-C café el CU presenta la mayor tasa con $6.73 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, esto puede deberse al manejo agronómico del cafeto, ya que estas se encuentran podadas y en la estimación de su biomasa, la ecuación alométrica aplicada es específicamente para el café podado a diferencia del café no podado del sistema de CG, esta presenta la menor tasa con $1.81 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y la ecuación alométrica aplicada es específicamente para el café no podado, lo cual puede haber influenciado en las diferencias de la TF-C, esto puede deberse también a la asociación de los árboles de sombra con el café, ya que se genera una sinergia entre ambas al coexistir dentro de un mismo ecosistema (José, 2009 y Cerda et al., 2016, citados por Villarreyna et al., 2020).

Para la TF-C árbol sobresalen los SAF de CG con $4.31 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y CU con $4.14 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, esto se debe primordialmente a la edad de este componente (árbol de sombra) con 20 y 18 años respectivamente, sin embargo, el SAF de CP tiene cierta similitud con lo obtenido por los SAF anteriormente mencionados, con un valor de $3.71 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Respecto a la TF-C total resalta el SAF de CU con un mayor valor de $11.22 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; esto podría reflejar que la sinergia entre el ulcumano y el café presenta una asociación sustentable y sostenible respecto al tiempo, ya que este árbol de sombra no perjudica en la producción de biomasa y el almacenamiento de carbono en el cultivo de café, claro que con un manejo de densidades adecuadas para ambos componentes.

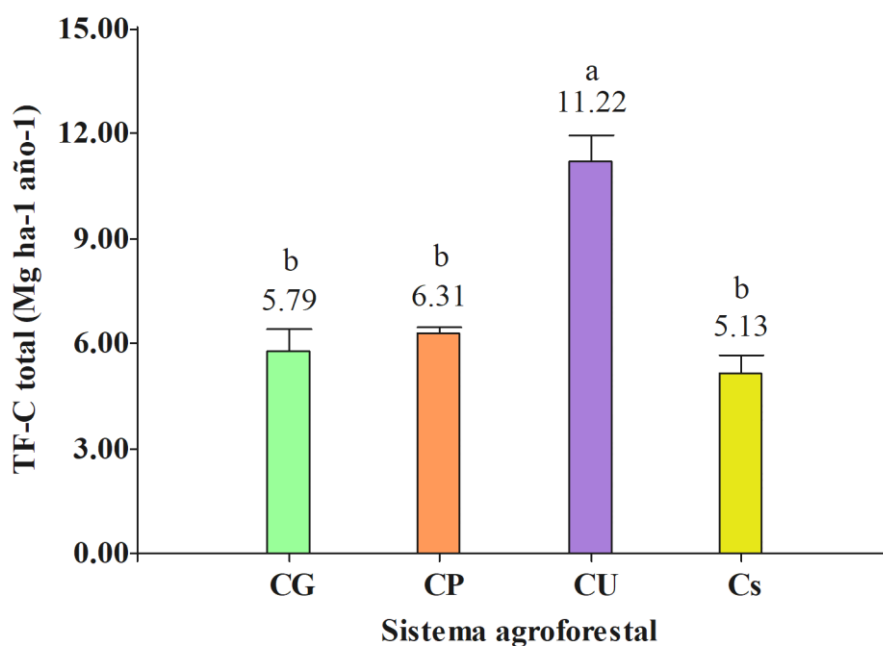
Tabla 34. Comparación de los datos de la tasa de fijación de carbono entre los sistemas.

SAF	Variables de la TF-C ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)					
	TF-C café (*)		TF-C árbol (**)		TF-C total (*)	
CG	1.81	c	4.31	a	5.79	b
CP	2.79	bc	3.71	ab	6.31	b
CU	6.73	a	4.14	a	11.22	a
Cs	5.13	ab	0.00	b	5.13	b

(*) ANOVA con prueba de Tukey al 5%, (**) Kruskal Wallis al 5%. Valores que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sistemas por variable o componente evaluado.

Ehrenbergerová et al. (2016), mencionado también por Clemente-Arenas (2021), reportaron la TF-C para el “sitio *Pinus*” (café con pino y otros árboles) con $3.8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y para el “sitio *Inga*” (café con guaba y otros árboles) con 1.8; ambas son menores a comparación de lo registrado en este estudio, siendo específicamente el CG y CP altamente mayores respecto a lo mencionado por el autor. Asimismo, Andrade et al. (2014) registraron la TF-C para sistemas de producción de café, para el SAF con nogal con $4.37 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, SAF con plátano con 0.63, SAF con caucho con 1.57 y el monocultivo con 0.63; en contraste, estos valores son menores a lo obtenido en este estudio, estas diferencias pueden estar influenciadas por las densidades de siembra y edad que presentan, ya que son factores importantes en la cuantificación de la TF-C.

Se visualiza las medias y el error estándar mediante el gráfico de barras (figura 22) respecto a la TF-C total y se muestran las comparaciones significativas entre los sistemas.

**Figura 22.** Comparación de medias y error estándar al 95% de confianza de la tasa de fijación de carbono total entre los sistemas.

- Tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente

En la tabla 35 se observa el valor de “p” y su interpretación de aceptar o rechazar la H_0 , al compararla con el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$), tanto para la prueba de Shapiro-Wilks modificado y la prueba de Levene aplicados a los datos de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente (TF-CO₂e). En base a ello, la TF-CO₂e café y TF-CO₂e total presentaron datos que siguen una distribución normal y con varianzas homogéneas entre los sistemas evaluados, por lo tanto se aplicó la prueba paramétrica de ANOVA con la prueba de Tukey al 5%, en cambio, para la TF-CO₂e árbol se aceptó la H_0 en la prueba de normalidad (datos que siguen una distribución normal), sin embargo, en la prueba de homogeneidad de varianzas se rechaza la H_0 , es decir, presenta varianzas heterogéneas entre los sistemas (se acepta la H_1), por consiguiente para esta variable se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis al 5%.

Tabla 35. Prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente.

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilks modificado)			Prueba de homogeneidad de varianzas (Levene)			Comparación entre SAF
Variable	p-valor	Interpretación	Variable	p-valor	Interpretación	
RDUO			RABS			
TF-CO ₂ e café	0.7068	Se acepta la H_0	TF-CO ₂ e café	0.0583	Se acepta la H_0	Prueba paramétrica
RDUO			RABS			
TF-CO ₂ e árbol	0.7636	Se acepta la H_0	TF-CO ₂ e árbol	0.0345	Se rechaza la H_0	Prueba no paramétrica
RDUO			RABS			
TF-CO ₂ e total	0.7596	Se acepta la H_0	TF-CO ₂ e total	0.1170	Se acepta la H_0	Prueba paramétrica

Pruebas estadísticas realizadas con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$). RDUO: residuo. RABS: residuo absoluto. H_0 : Hipótesis nula.

Se presenta los valores de “p” para cada variable de la TF-CO₂e, los cuales fueron obtenidos a partir de la aplicación de la prueba estadística paramétrica o no paramétrica al comparar los datos entre los SAF (tabla 36). Estos valores son menores que el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$), por lo tanto, presentan diferencias estadísticas significativas entre los sistemas, siendo altamente significativas para la TF-CO₂e café y TF-CO₂e total.

Tabla 36. Valor de “p” obtenido en la comparación de datos de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente entre los sistemas.

Variable	TF-CO ₂ e café (*)	TF-CO ₂ e árbol (**)	TF-CO ₂ e total (*)
p-valor	0.0009	0.0475	0.0002

(*) ANOVA con prueba de Tukey al 5%, (**) Kruskal Wallis al 5%.

En la tabla 37 se observa los valores de medias y medianas de la TF-CO₂e con su respectiva diferencia estadística; respecto a la TF-CO₂e café sobresale el CU con un mayor valor de 24.71 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y como menor valor se tiene al CG con 6.66 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Para la TF-CO₂e árbol destacan los SAF de CG (15.82 Mg ha⁻¹ año⁻¹) y CU (15.19 Mg ha⁻¹ año⁻¹). Finalmente, para la TF-CO₂e total sobresale el SAF de CU aportando con una tasa de 41.17 Mg ha⁻¹ año⁻¹; señalando que este sistema sería una buena opción como SAF para disminuir el CO₂ y otros gases de efecto invernadero (Lara et al., 2023) mitigando así el cambio climático y siendo una alternativa sostenible tanto para el agricultor como para el ambiente.

Tabla 37. Comparación de los datos de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente entre los sistemas evaluados.

SAF	Variables de la TF-CO ₂ e (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)					
	TF-CO ₂ e café (*)		TF-CO ₂ e árbol (**)		TF-CO ₂ e total (*)	
CG	6.66	c	15.82	a	21.24	b
CP	10.25	bc	13.62	ab	23.17	b
CU	24.71	a	15.19	a	41.17	a
Cs	18.82	ab	0.00	b	18.82	b

(*) ANOVA con prueba de Tukey al 5%, (**) Kruskal Wallis al 5%. Valores que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sistemas por variable o componente evaluado.

Ehrenbergerová et al. (2016), mencionado también por Clemente-Arenas (2021), reportaron valores de la tasa de fijación de carbono para los sistemas denominados como “sitio *Pinus*” (café con pino y otros árboles) y “sitio *Inga*” (café con guaba y otros árboles), en base a ello se calculó la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente, multiplicándolo por la constante de 3.67 proporcionado por el IPCC (2006), esta estimación se presenta con fines comparativos, obteniéndose una TF-CO₂e de 13.95 y 6.61 Mg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente para los sistemas mencionados; en contraste con este estudio, se observa que los valores obtenidos en los SAF evaluados son mayores a lo estimado en base al autor en mención, esto puede deberse a las especies de árboles de sombra que se asocie al cultivo de café.

Andrade et al. (2014) registraron datos de la tasa de fijación de carbono para diferentes sistemas de producción de café y en base a ello se calculó la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente, obteniéndose 16.04 para el SAF con nogal, 2.31 para el SAF con plátano, 5.76 para el SAF con caucho y 2.31 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para el monocultivo, esta estimación se presenta únicamente con fines comparativos, observándose que son menores a lo obtenido para los sistemas evaluados en esta investigación, esta diferencia puede estar influenciada primordialmente por las edades que presenten los componentes estudiados en el sistema.

Se tiene a Vallejos-Torres et al. (2024) quiénes reportan el sumidero de CO₂ equivalente (en unidades de t ha⁻¹, los cuales se expresan en Mg ha⁻¹, unidad equivalente) con 429.87 Mg ha⁻¹ para el “café con árboles de sombra *Inga sp.*”, con 278.30 para el “café con policultivo” y 7.93 para el “café sin árboles de sombra”, estas cantidades se presentan de forma referencial ya que los autores no registran datos de edad para los componentes estudiados del sistema.

Se visualiza las medias y el error estándar al 95% de confianza mediante un gráfico de barras (figura 23) correspondiente a tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente total, asimismo, se muestran las letras comparativas de significancia estadística entre los sistemas evaluados, comprendiéndose que el CU destaca en la TF-CO₂e total respecto a los demás sistemas evaluados y entre el CG, CP y Cs no presentan diferencias estadísticas significativas al compartir la misma letra.

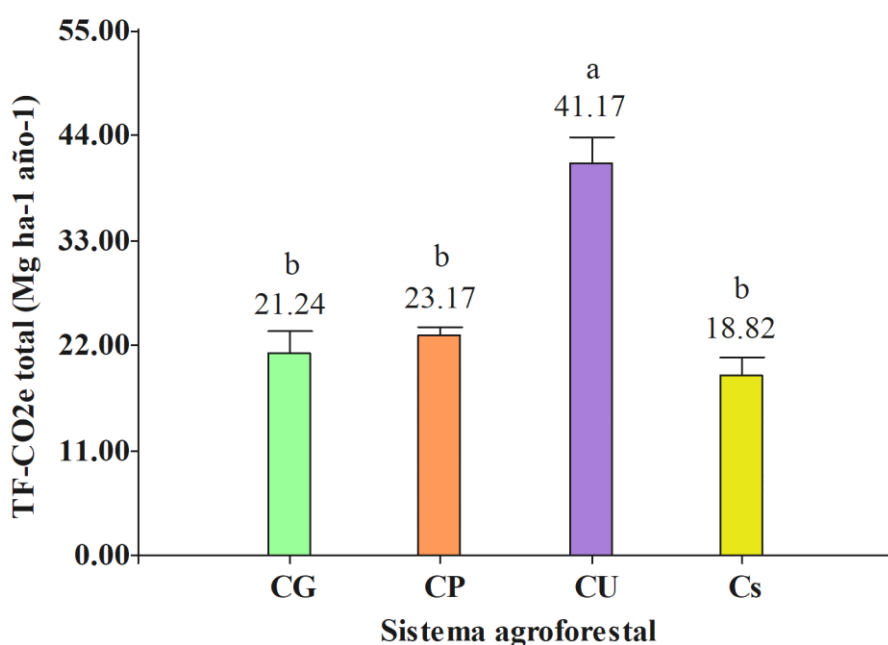


Figura 23. Comparación de medias y error estándar al 95% de confianza de la tasa de fijación de dióxido de carbono equivalente total entre los sistemas.

d) Contrastación final de hipótesis de investigación

En la tabla 38 se observa la contrastación de la hipótesis de investigación, señalando los resultados totales, de carbono almacenado, tasa de fijación de carbono y de dióxido de carbono equivalente y en base a ello se rechaza la hipótesis planteada.

Tabla 38. Contrastación de la hipótesis de investigación.

Objetivo	Hipótesis	Resultado	Contrastación
Evaluar el almacenamiento de carbono en tres sistemas agroforestales con <i>Coffea arabica</i> (café) en el distrito San Luis de Shuaro - Junín.	El sistema agroforestal conformada por café con guaba presentará mayor almacenamiento de carbono respecto a los demás sistemas de evaluación en el distrito de San Luis de Shuaro, Junín.	El carbono total almacenado es mayor significativamente en los SAF de CG (206.48 Mg ha ⁻¹) y CU (241.12 Mg ha ⁻¹). En la TF-C y TF-CO ₂ e totales destaca el CU con 11.22 y 41.17 Mg ha ⁻¹ año ⁻¹ .	Se rechaza la hipótesis de investigación.

V. CONCLUSIONES

Se caracterizó los tres SAF evaluados en el distrito de San Luis de Shuaro, siendo el café con guaba (CG) conformada por *C. arabica* (4545 plantas ha⁻¹ de 4 años y no podado) con *I. lineata* (100 árboles ha⁻¹ de 20 años), el café con pino (CP) por *C. arabica* (5555 plantas ha⁻¹, 5 años y no podado) con *P. patula* (125 árboles ha⁻¹, 10 años), el café con ulcumano (CU) por *C. arabica* (4166 plantas ha⁻¹, 7 a 14 años de plantación y 2 años de podado) con *R. rospiglosii* (208 árboles ha⁻¹, 18 años) y como sistema de control el café sin sombra (Cs) por *C. arabica* con 3787 plantas ha⁻¹ de 6 a 13 años de plantación y 2 años de podado. Estos sistemas se ubican a una altitud media de 1387 msnm presentando suelos francos.

Se evaluó el almacenamiento de carbono en los SAF, estimándose en primer lugar la biomasa total (Mg ha⁻¹), siendo los valores de media para el CG con 192.29, para CP con 108.92, CU con 204.72 y el Cs con 25.26; en segundo lugar, se cuantificó el carbono almacenado total (Mg ha⁻¹) con valores de media de 206.48, 160.82, 241.12 y 150.03 respectivamente para cada sistema mencionado. Asimismo, se estimó para el distrito de San Luis de Shuaro (con 4375.5 ha de cultivo de café en producción) los valores totales de biomasa con 581066.40 Mg, de carbono con 829638.56 Mg, de TF-C con 31109.81 Mg año⁻¹ y TF-CO₂e con 114200.55 Mg año⁻¹.

Se realizó las comparaciones del almacenamiento de carbono de los SAF, registrándose al CG (209.32 y 206.48) y CU (198.12 y 241.12) como los sobresalientes al presentar valores mayores de biomasa y carbono totales (Mg ha⁻¹) respectivamente; en la TF-C total y la TF-CO₂e total resalta significativamente el SAF de CU con 11.22 y 41.17 Mg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente. Estos resultados indican que el almacenamiento de carbono es mayor en los SAF, especialmente el CU y CG; asimismo, la asociación café-ulcumano presenta beneficios al agricultor, dado que el árbol de sombra no perjudica la producción de biomasa ni la captura de carbono en el cafeto y podría considerarse como una alternativa sostenible que contribuye a la mitigación del cambio climático.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

Se sugiere a la academia e Institutos Públicos de Investigación que realicen investigaciones en la que se generen ecuaciones alométricas locales para las especies de árboles de sombra que conforman los sistemas agroforestales con café, para disminuir la brecha en la estimación de su biomasa y carbono almacenado.

Se sugiere a la academia e Institutos Públicos de Investigación que realicen investigaciones en la que se generen ecuaciones alométricas locales para la especie de *C. arabica* teniéndose en cuenta la condición de podado y no podado, con la finalidad de reducir la brecha en la estimación de su biomasa y carbono almacenado.

Se sugiere a la academia dar continuidad al presente estudio, abarcando periodos de tiempo anual, para generar una base de datos en la estimación de biomasa y carbono almacenado en diferentes componentes del sistema agroforestal con café y de esta forma enriquecer y actualizar la información del stock de carbono para zonas cafetaleras.

Se sugiere a la academia dar continuidad, realizando investigaciones en la que se evalúen la actividad microbiana en el suelo, la interacción específica entre el ulcumano (*Retrophyllum rospigliosi*) y el café (*C. arabica*), para profundizar así los beneficios de este SAF.

Se sugiere a la academia realizar investigaciones en este campo, en la que se evalúen otras especies de sombra asociadas al cultivo de café, de esta forma permitirá la selección de estas al comprender el impacto de los árboles de sombra en el cafeto y con el manejo adecuado se maximizará su complementariedad con el uso de los recursos (los nutrientes, el agua) y el control de plagas o enfermedades.

Se sugiere a la Municipalidad Provincial de Chanchamayo promover políticas públicas en la agricultura, para la adopción de medidas como la promoción de los sistemas agroforestales con café, articulando con las instituciones de extensión agropecuaria (transferencia de tecnología) que involucre la asistencia técnica e instalación de árboles de sombra que beneficien tanto al ambiente como al cultivo de café (SAF sostenibles), favoreciendo así en la conservación del carbono orgánico en el suelo y de la biodiversidad, fomentando la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático.

VII.REFERENCIAS

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (s.f.). *Descripción general de los gases de efecto invernadero*. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- Alvarez, A. Y. (2023). *Efecto de tres especies de sombra en las propiedades fisicoquímicas del suelo y rendimiento de café (Coffea arabica) Oxapampa – Pasco* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrion]. Repositorio UNDAC. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/3536>
- Andrade, H. J., Marín, L. M., y Pachón, D. P. (2014). Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia. *Bioagro*, 26(2), 127–132. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612014000200008&lng=en&tlng=
- Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A., Salazar, L. F., Hincapié, E. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia, Capítulo 2, Crecimiento y desarrollo de la planta de café*. Cenicafe. https://www.academia.edu/8300629/crecimiento_y_desarrollo
- Arevalo, L. A., Alegre, J.C. y Montoya, L. J. (2002). *Documentos 73. Metodología para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra*. Embrapa Florestas. <https://core.ac.uk/download/15427982.pdf>
- Benavides, H. O. y León, G. E. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Subdirección de Meteorología. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>
- Burkhart, H. E., Avery, T. E. & Bullock, B. P. (2019). *Forest Measurements*. 6th ed. https://openlibrary.org/works/OL1485802W/Forest_measurements?edition=key%3A/books/OL3496150M&mode=all#editions-list
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H. and Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s004420050201>

- Callo, D., Krishnamurthy, L. y Alegre, J. (2002). Secuestro de carbono por sistemas agroforestales amazónicos. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(2), 101-106. https://www.researchgate.net/publication/261401430_Secuestro_de_Carbono_por_Sistemas_Agroforestales_Amazonicos#fullTextFileContent
- Carranza-Patiño, M., Aragundi-Sabando, L., Macias-Barrera, K., Paredes-Sarabia, E. & Villegas-Ramírez, A. (2024). Conservación y Manejo Sostenible del Suelo en la Agricultura: Una Revisión Sistemática de Prácticas Tradicionales y Modernas. *Código Científico Revista de Investigación*, 5(E3), 1–28. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/nE3/303>
- Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covalada-Ocon, S., y Aryal, D. R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24, e2401894. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401894>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2021). *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3.ª ed.). Centro Nacional de Investigaciones de Café. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0014>
- Clemente-Arenas, E. R. (2021). Captura de carbono en sistemas agroforestales en el Perú. *Revista Forestal del Perú*, 36(2), 180-196. <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v36i2.1797>
- Clemente-Arenas, E. R. (2022). Carbono almacenado en la biomasa aérea y su valoración económica en los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo, Madre de Dios – Perú. *Revista Forestal del Perú*, 37(1), 54-68. <https://doi.org/10.21704/rfp.v37i1.1593>
- Cuellar, J. y Salazar, E. (2016). *Dinámica del carbono almacenado en los diferentes sistemas de uso de la tierra en el Perú*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/490>
- Ehrenbergerová, L., Cienciala, E., Kučera, A. Guy, L. and Habrová, H. (2016). Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforest Syst*, 90, 433-445. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9865-z>
- Espinoza, W., Krishnamurthy, L., Vázquez, A. y Torres, A. (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 57 - 70. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.04.030>

- Eyherabide, M., Saínz, H., Barbieri, P. y Eduardo, H. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del Suelo*, 32(1), 13-19. <https://www.ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/112>
- García, L. M. (2019). *Estimación del stock de carbono en las especies: Retrophyllum rospigliosii y Prumnopitys harmsiana, en el Bosque de Huamantanga, Jaén – 2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio UPN. <https://repositorio.upn.edu.pe/item/deeb653b-d280-4ab8-80e3-2899b3a12dbf>
- González, I. J., Díaz, J., Limón, R. García, H., Quiahua, E. y Briones, G. (2022). *Costos de producción en tres agroecosistemas cafetaleros de la Sierra de Zongolica, Veracruz*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. https://www.researchgate.net/publication/372366011_COSTOS_DE_PRODUCCION_EN_TRES_AGROECOSISTEMAS_CAFETALEROS_DE_LA_SIERRA_DE_ZONGOLICA_VERACRUZ
- Gonzales, J. F. (2018). *Carbono almacenado en sistemas agroforestales de Coffea arábica l. “café” de 4 y 7 años en relación a la gradiente altitudinal, Huánuco* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/e3b65da8-966a-4ec6-bb6a-e45ec718e2ad>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación* (5.ª ed.). McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V. <https://www.smujerescoahuila.gob.mx/wp-content/uploads/2020/05/Sampieri.Met.Inv.pdf>
- Hurtado, P. J. (2019). *Reserva de biomasa y captura del carbono de un sistema agroforestal de Coffea arabica L. y Eucalyptus saligna, Naranjillo, 2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio UNSM. <https://repositorio.unsm.edu.pe/item/cd128836-41aa-4f61-955a-36cbae0de8e5>
- Iglesias, D. J., Quiñones, A., Martínez, B., Legaz, F., Forner, M. A. y Primo, E. (15 de octubre de 2012). Cálculo de la fijación neta de carbono en las plantaciones de cítricos en la Comunidad Valenciana, la huella de carbono de las plantaciones de cítricos. *Vida Rural*. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_vrural%2Fvrural_2012_352_30_35.pdf

- Instituto Nacional de Innovación Agraria. (s.f.). *Laboratorio de análisis de muestreo de suelos*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://www.inia.gob.pe/laboratorio-de-analisis-de-muestreo-de-suelos/>
- Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2022). *Manual del cultivo de café en el VRAEM*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/1208/1/Manual%20del%20cultivo%20de%20caf%C3%A9%20en%20el%20VRAEM%20%281%29.pdf>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (1995). *Mapa ecológico del Perú, guía explicativa*. Instituto Nacional de Recursos Naturales. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Lib-215.pdf>
- Jácono, S., Gonzales, F., Perez, E. y Rojas, R. (2013). *Fundamentos teóricos y metodológicos para la investigación científica en ciencias agrarias*. Mercurio, Marketing, Publicidad y Negocios.
- Jurado, M. A., Ordóñez, H. R. y Lagos, T. C. (2020). Evaluación de la captura de carbono en sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.), Consacá, Nariño, Colombia. *Revista Luna Azul*, (51), 166-181. <https://doi.org/10.17151/luaz.2020.51.9>
- Lara, J. M., Marceleno, S. M. L., Bojórquez, J. I., Nájera, O., De Haro, R. y Nájera, A. (22-25 de marzo de 2023). *Captura de carbono en cafetales del ejido Cumbres de Huicicila, Compostela, Nayarit* [Conferencia]. Memorias del V Congreso Internacional Abanico Veterinario, Agroforestal, Pesquero y Acuicola, 2023, Clave 2023-11AF, México. <https://www.researchgate.net/publication/370837703>
- Manchabajoy, J. P., Andrade, D. & Castillo, A. J. (2022). Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café en el departamento de Nariño. *Revista Ciencia y Agricultura*, 19(1), 28-44. <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358>
- Marín, M. P., Andrade, H. J. y Sandoval, A. P. (2016). Fijación de carbono atmosférico en la biomasa total de sistemas de producción de cacao en el departamento del Tolima, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 19(2), 351-360. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262016000200012

- Marroquín, P., Jiménez, J., Yerena, J. I., & Sandoval, R. (2024). Almacenamiento de carbono en *Coffea arabica* L. en la Sierra Madre de Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(2), e3315. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i2.3315>
- Maturana, J. y Salazar, A. (2008). *Análisis económico de la conversión de suelos de vocación forestal a plantación para biocombustible*. <https://app.mapfre.com/ccm/content/documentos/fundacion/prev-ma/ANALISIS-ECONOMICO-CONVERSION-SUELOS.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2015). *Decreto Supremo N° 020-2015-MINAGRI, Reglamento para la Gestión de las Plantaciones Forestales y los Sistemas Agroforestales*. Diario Oficial El Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/317548-020-2015-minagri>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2019). *Ficha técnica N°11: requerimientos agroclimáticos del cultivo de café*. Ministerio de Agricultura y Riego. <https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/237/1/ficha-tecnica-11-cultivo-cafe%20%281%29.pdf>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2023). *Perfil productivo regional*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiN2U3NTdkYTktOTk5Ny00NjQ5LTg0ZjEtMmIzYzlmZWlWMDhliwidCI6IjdmMDg0NjI3LTdmNDAtNDg3OS04OTE3LTk0Yjg2ZmQzNWYzZiJ9&disablecdnExpiration=1743542573>
- Ministerio del Ambiente. (2011). *Guía de evaluación de la flora silvestre*. https://www.minam.gob.pe/direccion/wp-content/uploads/sites/6/2013/09/guia_evaluacion_flora.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Zonificación Ecológica y Económica - ZEE Aprobada; Junín*. Ministerio del Ambiente. <https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/junin/>
- Ministerio del Ambiente. (2025). *Documento de Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2000-2021; Primer informe bienal de transparencia de Perú ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Ministerio del Ambiente. https://nuestrodesafioclimatico.minam.gob.pe/infocarbono/?utm_source=

- Municipalidad Distrital de San Luis de Shuaro. (2022). *Programa Municipal de Educación, Cultura y Ciudadanía Ambiental de la Municipalidad Distrital de San Luis de Shuaro 2022*. Municipalidad Distrital de San Luis de Shuaro. https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/dt-md_san_luis_de_shuaro_2022_junin.pdf
- Municipalidad Provincial de Chanchamayo. (2013). *Plan de Desarrollo Concertado 2013 - 2021*. Municipalidad Provincial de Chanchamayo. <http://www.munichanchamayo.gob.pe/documentos/pdc-2014.pdf>
- Odar, B. (2018). *Evaluación de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café (Coffea spp.) en el Anexo de Vilaya, distrito de Colcamar, provincia de Luya, Amazonas, 2017-2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio UNTRM. <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/1384>
- Organización de las Naciones Unidas. (2022). *Report, Sexto informe de evaluación del IPCC: Cambio Climático 2022*. Organización de las Naciones Unidas programa para el medio ambiente. <https://www.unep.org/es/resources/informe/sexta-informe-de-evaluacion-del-ipcc-cambio-climatico-2022>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2004). *Inventario forestal nacional: Manual de campo*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/items/f9a1a828-cfe5-41ad-8dfb-c16c11269934>
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2005). *Guía de buenas prácticas para el uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura. Inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Métodos complementarios y orientación sobre las buenas prácticas derivados del Protocolo de Kyoto. Capítulo 4*. Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf/spanish/ch4.pdf>
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Volumen 4*. Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol4.html>

- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2020). *El cambio climático y la tierra; informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres*. Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf
- Paz, F., Salas, V., Sánchez, C., Libert, A. y Bolaños, M. A. (2022). Caracterización de los almacenes de carbono, estructura y diversidad de los cafetales bajo sombra y vegetación natural en la sierra Madre de Chiapas, México. *Programa Mexicano del Carbono, A.C.*, 6(2), 101-121. <https://www.elementospolipub.org/ojs/index.php/epp/issue/view/14/13>
- Prialé, C. A. (2016). *Laboratorio de Análisis de Aguas y Suelos, muestreo de suelos*. Instituto Nacional de Innovación Agraria, Estación Experimental Agraria Pichanaki. <https://repositorio.inia.gob.pe/server/api/core/bitstreams/e45a30c0-d2f5-4a41-872e-79425b3d752a/content>
- Razo, R., Gordillo, A. J., Rodríguez, R., Maycotte, C. C., y Acevedo, O. A. (2018). Coeficientes de carbono para arbustos y herbáceas del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(31), 58-67. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i31.195>
- Rodríguez-Delgado, I., Martín-Martín, G. J., Pérez-Iglesias, H. I. & García-Batista, R. M. (2025). Comportamiento de propiedades físicas, químicas y biológica del suelo en sistemas de producción agrícola. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 8(S1), 184-196. <https://remca.umet.edu.ec/index.php/REMCA/article/view/865/832>
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Treviño-Garza, E. J. y Razo-Zárate, R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México. *Revista Ra Ximhai*, 5(3), 317-327. <https://doi.org/10.35197/rx.05.03.2009.06.rr>
- Rojas, F., De Jong, B. H. J., Martínez, P. y Paz, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72(6), 835-864. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0456-y>

- Rügnitz, M., Chacón, M. y Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. World Agroforestry Centre (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/B16293.pdf>
- Salgado, N. y Ottos, E. (2025). *Manual técnico: interpretación de análisis de suelos, cálculos de encalado y fertilización para los cultivos de café y cacao*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). <https://repositorio.inia.gob.pe/items/23143ee9-b964-4d9f-ac33-21f83f832384>
- Sánchez, I., Flores, Y. M. y León, J. A. (2023). Captura de carbono en plantación forestal de laurel y sistema agroforestal laurel – café en la Provincia de San Ignacio. *Revista Pakamuros*, 9(4), 160-173. <https://doi.org/10.37787/7k96a777>
- Silva, J. y Olaya, L. (2019). *Cuantificación de carbono almacenado en un sistema agroforestal de café (Coffea arabica L.), asociado con guaba (Inga edulis sp.), distrito Jaén – Cajamarca* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio UNJ. <https://repositorio.unj.edu.pe/items/cab58838-1a05-4e65-97fd-38608d6952b3>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021). *Ficha técnica agroclimática - Café*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://www.gob.pe/institucion/senamhi/informes-publicaciones/2209758-ficha-tecnica-agroclimatica-cafe>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2024). *Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2023). *Manual para la identificación botánica de especies forestales de la Amazonía peruana. Volumen II*. Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. <https://repositorio.midagri.gob.pe/handle/20.500.13036/1764>
- Soil Science Division Staff. (2017). *Soil Survey Manual*. United States Department of Agriculture. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/The-Soil-Survey-Manual.pdf>

- Soto, S. (2022). *Carbono almacenado en el suelo de plantaciones de Coffea arabica establecidas en diferentes variedades en el distrito de Monzón* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/ce331e69-779b-4d29-af14-68d51915dfb3>
- Valdés-Velarde, E., Vázquez-Domínguez, L. P., Tinoco-Rueda, J. Á., Sánchez-Hernández, R., Salcedo-Pérez, E. y Lagunes-Fortiz, E. (2022). Servicio ecosistémico de carbono almacenado en cafetales bajo sombra en sistema agroforestal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(28), 287-297. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3283>
- Valencia-Aristizábal, G. y Carrillo-Pachón, I. F. (1983). *Interpretación de Análisis de Suelos para Café*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/887/1/avt0115.pdf>
- Vallejos-Torres, G., Gaona-Jimenez, N., Pichis-García, R., Ordoñez, L., García-Gonzales, P., Quinteros, A., Lozano, A., Saavedra-Ramírez, J., Tuesta-Hidalgo, J. C., Reategui, K., Macedo-Córdova, W., Baselly-Villanueva, J. R. and Marín, C. (2024). Carbon reserves in coffee agroforestry in the Peruvian Amazon. *Front. Plant Sci.*, 15,1410418. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1410418>
- Van Bemmelen, J. M. (1890). Über die bestimmung des wassers, des humus, des schwefels, der in den colloïdalen silikaten gebundenen kieselsäure, des mangans u. s. w. im ackerboden. *Die Landwirthschaftlichen Versuchs-Stationen*, 37, 279-290. <https://edepot.wur.nl/211282>
- Van Noordwijk, M., Rahayu, S., Hairiah, K.; Wulan, Y. C., Farida, A. y Verbist, B. (2002). Carbon stock assessment for a forest-to-coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Science in China Series C*, 45(supp), 75-86. https://www.globalcarbonproject.org/global/pdf/landuse_Canadell_Zhou_Noble2003/Noordwijk_yc0075.pdf
- Villarreyana, R. A., Avelino, J. y Cerdá, R. (2020). Ecosystem-based adaptation: effect of shade trees on ecosystem services in coffee plantations. *Agronomía Mesoamericana*, 31(2), 499-516. <https://dx.doi.org/10.15517/am.v31i2.37591>

- Walkley, A. y Black, I. A. (1934) An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, 37, 29-38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- World Coffee Research. (2019). *Las variedades del café arábica*. World Coffee Research. https://juntadelcafe.org.pe/wp-content/uploads/2020/02/Cata%CC%81logo-de-variedades-2019-Espan%CC%83ol_OK.pdf
- Zavala J. W., Zavala S. L. y Mansilla L. G. (2018a). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un sistema agroforestal del cafetal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. *Revista Investigación y Amazonía*, 8(5), 1-8. <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/200/183>
- Zavala, W., Merino, E., & Peláez, P. (2018b). Influencia de tres sistemas agroforestales del cultivo de cacao en la captura y almacenamiento de carbono. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 493-501. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.04>
- Zavala, J. W. y Vega, L. (2021). *Captura y almacenamiento de carbono en distintas edades del cultivo de cacao bajo sistemas agroforestales de Tingo María*. Editado por Liliana Vega Jara. <https://isbn.bnpgob.pe/catalogo.php?mode=detalle&nt=123045>

ANEXOS

Anexo A. Resultado del análisis fisicoquímico del suelo por sistema evaluado



ANÁLISIS DE SUELO

Cliente : Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA
 Propietario (Productor) : Wuiner Zevallos Rivera
 Procedencia de muestra : Yapaz bajo
 Departamento : Junin
 Provincia : Chanchamayo
 Distrito : San Luis de Shuaro

Fecha de recepción de muestra : 02.10.2023
 Fecha(s) de análisis : del 02/10/2023 al 23/10/2023
 Fecha de emisión : 27/10/2023
 Reporte de resultado : 577-23/SU/LABSAF-PICHANAQUI

Código		Análisis Mecánico			Clase Textural	C.E. dS/m (1:1)	pH (1:1)	MO %	N %	P ppm	K ppm	CIC	Cationes Cambiables (meq/100 g)						CICe	% Base Cambiable	% Acidez Cambiable	% Sat Al
		Arena	Limo	Arcilla									Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺				
Lab.	Campo	(%)											(meq/100 g)									
SU577-PI-23	Guaba	63,20	24,50	12,30									1,15	0,29	0,11	0,00	0,61	0,18				

TABLAS DE INTERPRETACIÓN

Salinidad	
Clasificación del suelo	CE (dS/m)
* Muy ligeramente salino	< 2
* Ligeramente salino	2 - 4
* Moderadamente salino	4 - 8
* Fuertemente salino	> 8

CLASIFICACIÓN	Materia orgánica %	Nitrógeno Total %	Fósforo Disponible ppm P	Potasio Disponible ppm K
*Bajo	< 2.0	< 0.1	< 7.0	< 100
*Medio	2.0 - 4.0	0.1 - 0.2	7 - 14.0	100 - 240
*Alto	> 4	> 0.2	> 14.0	> 240

Relaciones Catiónicas				
Clasificación	K/Mg	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
*Normal	0.2 - 0.3	5 - 8	14 - 16	1.8 - 2.2
*Defc. Mg	> 0.5			
*Defc. K	< 0.2			
*Defc. Mg		> 10		

Reacción o pH	
Clasificación del suelo	pH
* Extremadamente ácido	< 4.5
* Muy Fuertemente ácido	4.5 - 5.0
* Fuertemente ácido	5.1 - 5.5
* Moderadamente ácido	5.6 - 6.0
* Ligeramente ácido	6.1 - 6.5
* Neutro	6.6 - 7.0
* Ligeramente alcalino	7.1 - 7.8
* Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4

Clases Texturales			
A	= arena	Fr.Ar.A	= franco arcillo arenoso
A.Fr	= arena franca	Fr.Ar.	= franco arcilloso
Fr.A	= franco arenoso	Fr.Ar.L	= franco arcillo limoso
Fr.	= franco	Ar.A	= arcillo arenoso
Fr.L.	= franco limoso	Ar.L.	= arcillo limoso
L	= limoso	Ar.	= arcilloso

Distribución de Cationes	
Ca ²⁺	= 60 - 75
Mg ²⁺	= 15 - 20
K ⁺	= 3 - 7
Na ⁺	= < 15



El presente reporte de resultado ha sido autorizado por: Ing. M.Sc. Elvis Ottos Díaz especialista responsable del laboratorio del LABSAF PICHANAQUI.

INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA
 EEA - PICHANAQUI
 Ing. Itata Flores Torres
 DIRECTORA

Directora de la Estacion Experimental Agraria Pichanaki

Figura 24. Resultado del análisis fisicoquímico de suelo del sistema café con guaba.



ANÁLISIS DE SUELO

Cliente : Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA
 Propietario (Productor) : Nolberto Meza Lopez
 Procedencia de muestra : Unión Palomar
 Departamento : Junin
 Provincia : Chanchamayo
 Distrito : San Luis de Shuaro

Fecha de recepción de muestra : 02.10.2023
 Fecha(s) de análisis : del 02/10/2023 al 23/10/2023
 Fecha de emisión : 27/10/2023
 Reporte de resultado : 580-23/SU/LABSAF-PICHANAQUI

Código		Análisis Mecánico			Clase Textural	C.E. dS/m (1:1)	pH (1:1)	MO %	N %	P ppm	K ppm	CIC	Cationes Cambiables (meq/100 g)						CICe	% Base Cambiable	% Acidez Cambiable	% Sat Al
		Arena	Limo	Arcilla									Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³	H ⁺				
Lab.	Campo	(%)											(meq/100 g)									
SU580-PI-23	Los Claveles - Pino	43,10	42,60	14,30	Franco	0,14	5,00	2,0	0,10	3,17	80,40	4,08	1,58	0,79	0,11	0,00	0,21	0,10		88,89	11,11	7,53

TABLAS DE INTERPRETACIÓN

Salinidad		Materia orgánica		Nitrógeno Total		Fósforo Disponible		Potasio Disponible		Relaciones Catiónicas			
Clasificación del suelo	CE (dS/m)	CLASIFICACIÓN	%	%	ppm P	ppm K	Clasificación	K/Mg	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K		
* Muy ligeramente salino	< 2	*Bajo	< 2.0	< 0.1	< 7.0	< 100	*Normal	0.2 - 0.3	5 - 8	14 - 16	1.8 - 2.2		
* Ligeramente salino	2 - 4	*Medio	2.0 - 4.0	0.1 - 0.2	7 - 14.0	100 - 240	*Defc. Mg	> 0.5					
* Moderadamente salino	4 - 8	*Alto	> 4	> 0.2	> 14.0	> 240	*Defc. K	< 0.2					
* Fuertemente salino	> 8						*Defc. Mg		> 10				

Reacción o pH		Clases Texturales				Distribución de Cationes	
Clasificación del suelo	pH	A	=	arena	Fr.Ar.A	=	franco arcillo arenoso
* Extremadamente ácido	<4.5	A.Fr	=	arena franca	Fr.Ar.	=	franco arcilloso
* Muy Fuertemente ácido	4.5 - 5.0	Fr.A	=	franco arenoso	Fr.Ar.L	=	franco arcillo limoso
* Fuertemente ácido	5.1 - 5.5	Fr.	=	franco	Ar.A	=	arcillo arenoso
* Moderadamente ácido	5.6 - 6.0	Fr.L.	=	franco limoso	Ar.L.	=	arcillo limoso
* Ligeramente ácido	6.1 - 6.5	L	=	limoso	Ar.	=	arcilloso
* Neutro	6.6 - 7.0						
* Ligeramente alcalino	7.1 - 7.8						
* Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4						

INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA
EEA - PICHINACHA

Ing. Itala Torres Torres
DIRECTORA

El presente reporte de resultado ha sido autorizado por: Ing. M.Sc. Elvis Ottos Diaz especialista responsable del laboratorio del LABSAF PICHANAQUI.

INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA
 EEA - PICHANAQUI
 Ing. Itata Torres Torres
 DIRECTORA

Directora de la Estacion Experimental Agraria Pichanaki

Figura 25. Resultado del análisis fisicoquímico de suelo del sistema café con pino.



ANÁLISIS DE SUELO

Cliente : Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA
 Propietario (Productor) : Andreas Woernle
 Procedencia de muestra : Yapaz Bajo
 Departamento : Junin
 Provincia : Chanchamayo
 Distrito : San Luis de Shuaro

Fecha de recepción de muestra : 02.10.2023
 Fecha(s) de análisis : del 02/10/2023 al 23/10/2023
 Fecha de emisión : 27/10/2023
 Reporte de resultado : 579-23/SU/LABSAF-PICHANAKI

Código		Análisis Mecánico			Clase Textural	C.E. dS/m (1:1)	pH (1:1)	MO %	N %	P ppm	K ppm	CIC	Cationes Cambiables (meq/100 g)						CICe	% Base Cambiable	% Acidez Cambiable	% Sat Al
		Arena	Limo	Arcilla									Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³	H ⁺				
Lab.	Campo	(%)			Franco Arenoso	0,06	4,90	8,5	0,43	6,21	50,70	4,69	(meq/100 g)							81,63	18,37	14,49
SU579-PI-23	Mata Palo - Ulcumano	69,10	18,60	12,30									1,29	0,89	0,13	0,00	0,41	0,11				

TABLAS DE INTERPRETACIÓN

Salinidad		Materia orgánica		Nitrógeno Total		Fósforo Disponible		Potasio Disponible		Relaciones Catiónicas			
Clasificación del suelo	CE (dS/m)	CLASIFICACIÓN	%	%	ppm P	ppm K	Clasificación	K/Mg	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K		
* Muy ligeramente salino	< 2	*Bajo	< 2.0	< 0.1	< 7.0	< 100	*Normal	0.2 - 0.3	5 - 8	14 - 16	1.8 - 2.2		
* Ligeramente salino	2 - 4	*Medio	2.0 - 4.0	0.1 - 0.2	7 - 14.0	100 - 240	*Defc. Mg	> 0.5					
* Moderadamente salino	4 - 8	*Alto	> 4	> 0.2	> 14.0	> 240	*Defc. K	< 0.2					
* Fuertemente salino	> 8						*Defc. Mg	> 10					

Reacción o pH		Clases Texturales				Distribución de Cationes	
Clasificación del suelo	pH	A	Fr	Ar	L	Ca ⁺²	Mg ⁺²
* Extremadamente ácido	<4.5	= arena	= arena franca	= franco arcillo arenoso	= franco arcillo arenoso	= 60 - 75	= 15 - 20
* Muy fuertemente ácido	4.5 - 5.0						
* Fuertemente ácido	5.1 - 5.5						
* Moderadamente ácido	5.6 - 6.0						
* Ligeramente ácido	6.1 - 6.5						
* Neutro	6.6 - 7.0						
* Ligeramente alcalino	7.1 - 7.8						
* Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4						

El presente reporte de resultado ha sido autorizado por: Ing. M.Sc. Elvis Ottos Díaz especialista responsable del laboratorio del LABSAF PICHANAKI.

INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGRARIA
 EEA - PICHANAKI
 Ing. Hilda Torres Torres
 DIRECTORA

Directora de la Estación Experimental Agraria Pichanaki

Figura 26. Resultado del análisis fisicoquímico de suelo del sistema café con ulcumano.



ANÁLISIS DE SUELO

Cliente : Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA
 Propietario (Productor) : Andres Woernle
 Procedencia de muestra : Yapaz bajo
 Departamento : Junin
 Provincia : Chanchamayo
 Distrito : San Luis de Shuaro

Fecha de recepción de muestra : 02.10.2023
 Fecha(s) de análisis : del 02/10/2023 al 23/10/2023
 Fecha de emisión : 27/10/2023
 Reporte de resultado : 573-23/SU/LABSAF-PICHANAKI

Código		Análisis Mecánico			Clase Textural	C.E.	pH (1:1)	MO	N	P	K	CIC	Cationes Cambiables (meq/100 g)						CICe	% Base Cambiable	% Acidez Cambiable	% Sat
		Arena	Limo	Arcilla									Ca ⁺	Mg ⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺	H ⁺				
Lab.	Campo	(%)						%	%	ppm	ppm		(meq/100 g)									
SU573-PI-23	Matapala - Sin sombra	53,10	20,70	26,20	Franco Arcillo Arenoso	0,14	4,20	7,9	0,40	6,34	35,10	2,21	1,03	0,45	0,09	0,00	0,29	0,18		76,96	23,04	14,22

TABLAS DE INTERPRETACIÓN

Salinidad		Materia orgánica		Nitrógeno Total		Fósforo Disponible		Potasio Disponible		Relaciones Catiónicas			
Clasificación del suelo	CE (dS/m)	CLASIFICACIÓN	%	%	ppm P	ppm K	Clasificación	K/Mg	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K		
* Muy ligeramente salino	< 2	*Bajo	< 2.0	< 0.1	< 7.0	< 100	*Normal	0.2 - 0.3	5 - 8	14 - 16	1.8 - 2.2		
* Ligeramente salino	2 - 4	*Medio	2.0 - 4.0	0.1 - 0.2	7 - 14.0	100 - 240	*Defc. Mg	> 0.5					
* Moderadamente salino	4 - 8	*Alto	> 4	> 0.2	> 14.0	> 240	*Defc. K	< 0.2					
* Fuertemente salino	> 8						*Defc. Mg	> 10					

Reacción o pH		Clases Texturales		Distribución de Cationes	
Clasificación del suelo	pH	A = arena	Fr.Ar.A = franco arcillo arenoso	Ca ⁺⁺	= 60 - 75
* Extremadamente ácido	<4.5	A.Fr = arena franca	Fr.Ar. = franco arcilloso	Mg ⁺⁺	= 15 - 20
* Muy Fuertemente ácido	4.5 - 5.0	Fr.A = franco arenoso	Fr.Ar.L = franco arcillo limoso	K ⁺	= 3 - 7
* Fuertemente ácido	5.1 - 5.5	Fr. = franco	Ar.A = arcillo arenoso	Na ⁺	= < 15
* Moderadamente ácido	5.6 - 6.0	Fr.L. = franco limoso	Ar.L. = arcillo limoso		
* Ligeramente ácido	6.1 - 6.5	L = limoso	Ar. = arcilloso		
* Neutro	6.6 - 7.0				
* Ligeramente alcalino	7.1 - 7.8				
* Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4				

El presente reporte de resultado ha sido autorizado por: Ing. M.Sc. Elvis Ottos Diaz especialista responsable del laboratorio del LABSAF PICHANAKI.

INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA
 EEA - PICHANAKI
 Ing. Itata Flores Torres
 DIRECTORA

Directora de la Estacion Experimental Agraria Pichanaki

Figura 27. Resultado del análisis fisicoquímico de suelo del sistema café sin sombra.

Anexo B. Resultado del análisis de carbono orgánico del suelo por sistema evaluado



REPORTE DE RESULTADO N° 121089-23/SU/ LABSAF - PICHANAKI

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: Investigación Proyecto Suelos y Aguas
Propietario / Productor	: Varios
Solicitado por	: Eldhy Sianina Huerto Pajuelo
Muestreado por	: Cliente
Número de muestra(s)	: 06 muestras
Producto declarado	: Suelo (***)
Presentación de las muestras(s)	: Bolsas de plástico
Referencia del muestreo	: Reservado por el cliente
Procedencia de muestra(s)	: Distrito de San Luis de Shuaro - Provincia de Chanchamayo - Junín
Fecha(s) de muestreo	: 07.12.2023 (***)
Fecha de recepción de muestra(s)	: 07.12.2023
Lugar de ensayo	: Laboratorio de Suelos, Agua y Foliare - LABSAF Pichanaki
Fecha(s) de análisis	: Del 07.12.2023 al 15.12.2023
Fecha de emisión	: 21.12.2023

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	2	3	4	5	6		
Código de Laboratorio	SU1083-PI-23	SU1084-PI-23	SU1085-PI-23	SU1086-PI-23	SU1087-PI-23	SU1088-PI-23		
Matriz Analizada	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo		
Fecha de Muestreo	07.12.2023	07.12.2023	07.12.2023	07.12.2023	07.12.2023	07.12.2023		
Hora de Inicio de Muestreo (h)	...	...	...	...	...	...		
Condición de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada		
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente	CU - R1	CU - R2	CU - R3	Cs - R1	Cs - R2	Cs - R3		
Ensayo	Unidad	LC	Resultados					
Carbono orgánico	%	...	6.55	6.61	7.71	6.15	6.73	5.22

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
Carbono orgánico (**)	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.7 AS-07. Determinación de Materia Orgánica (AS-07 Walkley y Black).

Figura 28. Carbono orgánico (%) de los sistemas de café con ulcumano y café sin sombra.

REPORTE DE RESULTADO

N° 121089-23/SU/ LABSAF - PICHANAKI

IV. CONSIDERACIONES

- Estado en las que ingreso la Muestras: Buenas Condiciones de almacenamiento.
 - Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
 - Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
 - Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron.
 - Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
 - El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- (***) Este dato ha sido proporcionado por el cliente, por lo que el laboratorio no es responsable de dicha información.
- (**) El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) a métodos de ensayo que no han sido acreditados por el INACAL-DA.

V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Elvis Ottos Diaz - Responsable del laboratorio LABSAF Pichanaki.

INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA
EEA - PICHANAKI



Ing. Itala Victor Torres
DIRECTORA

Directora de la Estación Experimental Agraria Pichanaki

FIN DE REPORTE DE RESULTADO

Figura 29. Carbono orgánico (%) de los sistemas de café con ulcumano y café sin sombra (continuación).

REPORTE DE RESULTADO

N° 121090-23/SU/ LABSAF - PICHANAKI

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente : Investigación Proyecto Suelos y Aguas
 Propietario / Productor : Varios
 Solicitado por : Eldhy Sianina Huerto Pajuelo
 Muestreado por : Cliente
 Número de muestra(s) : 06 muestras
 Producto declarado : Suelo (***)
 Presentación de las muestras(s) : Bolsas de plástico
 Referencia del muestreo : Reservado por el cliente
 Procedencia de muestra(s) : Distrito de San Luis de Shuaro - Provincia de Chanchamayo - Junín
 Fecha(s) de muestreo : 11.12.2023 (***)
 Fecha de recepción de muestra(s) : 11.12.2023
 Lugar de ensayo : Laboratorio de Suelos, Agua y Foliare - LABSAF Pichanaki
 Fecha(s) de análisis : Del 11.12.2023 al 15.12.2023
 Fecha de emisión : 21.12.2023

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM			1	2	3	4	5	6	
Código de Laboratorio			SU1089-PI-23	SU1090-PI-23	SU1091-PI-23	SU1092-PI-23	SU1093-PI-23	SU1094-PI-23	
Matriz Analizada			Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	
Fecha de Muestreo			11.12.2023	11.12.2023	11.12.2023	11.12.2023	11.12.2023	11.12.2023	
Hora de Inicio de Muestreo (h)			...	...	...	...	...	...	
Condición de la muestra			Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente			CG - R1	CG - R2	CG - R3	CP - R1	CP - R2	CP - R3	
Ensayo		Unidad	LC	Resultados					
Carbono orgánico		%	...	3.02	3.83	3.60	2.44	3.25	3.02

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
Carbono orgánico (**)	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.7 AS-07. Determinación de Materia Orgánica (AS-07 Walkley y Black).

Figura 30. Carbono orgánico (%) de los sistemas de café con guaba y café con pino.

REPORTE DE RESULTADO

N° 121090-23/SU/ LABSAF - PICHANAKI

IV. CONSIDERACIONES

- Estado en las que ingreso la Muestras: Buenas Condiciones de almacenamiento.
 - Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
 - Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
 - Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron.
 - Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
 - El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- (***) Este dato ha sido proporcionado por el cliente, por lo que el laboratorio no es responsable de dicha información.
- (**) El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) a métodos de ensayo que no han sido acreditados por el INACAL-DA.

V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: *Elvis Ottos Diaz* - Responsable del laboratorio LABSAF Pichanaki.

INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA
EEA - PICHANAKI


Ing. Itala Motos Torres
DIRECTORA

Directora de la Estación Experimental Agraria Pichanaki

FIN DE REPORTE DE RESULTADO

Figura 31. Carbono orgánico (%) de los sistemas de café con guaba y café con pino (continuación).

Anexo C. Resultado de la determinación taxonómica de los árboles de sombra



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE CIENCIAS
Departamento Académico de Biología



La Molina, 15 de julio de 2024

CONSTANCIA DE DETERMINACIÓN TAXONÓMICA 008-2024-HM-UNALM

Mediante la presente se informa que las tres (3) muestras de árboles forestales asociados al cultivo de café provenientes del distrito San Luis de Shuaro (provincia de Chanchamayo, departamento de Junín), colectadas y remitidas por la Bach. Eldhy Sianina Huerto Pajuelo (DNI 76832722), quien viene desarrollando la tesis «Almacenamiento de carbono en tres sistemas agroforestales con *Coffea arabica* (café) en el distrito San Luis de Shuaro - Junín» en la Estación Experimental Agraria Pichanaki —en el marco del proyecto de inversión con CUI 2487112 ejecutado por el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)—, fueron estudiadas en el Herbario del Departamento de Biología de la Universidad Nacional Agraria La Molina (MOL) para su determinación taxonómica. El examen y reconocimiento de los caracteres morfológicos de orden cualitativo y cuantitativo en tales especímenes (ramas foliosas y estructuras reproductivas), complementados con el análisis de imágenes fotográficas obtenidas en campo, permitió concluir que corresponden a las especies que se anotan a continuación en un cuadro. Las especies se ordenaron en familias botánicas de acuerdo al sistema de clasificación de las Angiospermas APG IV (Angiosperm Phylogeny Group, 2016) y según Christenhusz et al. (2011)¹ y Yang et al. (2022)² para las Gimnospermas.

CÓDIGO	ESPECIE	FAMILIA
AF 1 - SLS	<i>Retrophyllum rospigliosii</i> (Pilg.) C. N. Page	Podocarpaceae
AF 2 - SLS	<i>Inga lineata</i> Benth.	Fabaceae
AF 3 - SLS	<i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham.	Pinaceae

La clasificación taxonómica de las especies se incluye como un anexo en hojas adjuntas.

Atentamente,

Ph.D. Aldo Ceroni Stuva
Director
Herbario del Dpto. de Biología (MOL)
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Agraria La Molina



Arturo Granda Paucar
Investigador Adjunto
Herbario del Dpto. de Biología (MOL)
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Agraria La Molina

¹Christenhusz M.J.M., Reveal J.L., Farjon A., Gardner M.F. & Mill R.R. 2011. A new classification and linear sequence of extant gymnosperms. *Phytotaxa* 19: 55–70.

²Yang Y., Ferguson D.K., Liu B., Mao K., Gao L., Zhang S., Wan T., Rushforth K. & Zhang Z. 2022. Recent advances on phylogenomics of gymnosperms and a new classification. *Plant Diversity* 44: 340–350.

Figura 32. Constancia de determinación taxonómica de los árboles de sombra.

**CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE LAS ESPECIES ARBÓREAS
IDENTIFICADAS ASOCIADAS AL CULTIVO DEL CAFÉ, SAN LUIS DE
SHUARO, CHANCHAMAYO, JUNÍN**

Muestra AF 1 - SLS : *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C. N. Page

Clado	: gimnospermas ($\equiv$ Gymnospermae)
Clase	: Pinopsida
Subclase	: Cupressidae
Orden	: Araucariales
Familia	: Podocarpaceae
Género	: <i>Retrophyllum</i> C. N. Page
Especie	: <i>Retrophyllum rospigliosii</i> (Pilg.) C. N. Page

Muestra AF 2 - SLS : *Inga lineata* Benth.

Clado	: angiospermas ($\equiv$ Angiospermae)
Clado	: mesangiospermas ($\equiv$ Mesangiospermae)
Clado	: eudicotiledóneas ($\equiv$ Eudicotyledoneae)
Clado	: gunnéridas ($\equiv$ Gunneridae)
Clado	: pentapétalas ($\equiv$ Pentapetalae)
Clado	: superrósidas
Clado	: rósidas
Clado	: eurrósidas
Clado	: fábias
Orden	: Fabales
Familia	: Fabaceae
Género	: <i>Inga</i> Mill.
Especie	: <i>Inga lineata</i> Benth.

Figura 33. Clasificación taxonómica de la especie *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C. N. Page e *Inga lineata* Benth.

Muestra AF 3 - SLS : *Pinus patula* Schltdl. & Cham.

Clado	:	gimnospermas ($\equiv$ Gymnospermae)
Clase	:	Pinopsida
Subclase	:	Pinidae
Orden	:	Pinales
Familia	:	Pinaceae
Género	:	<i>Pinus</i> L.
Especie	:	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.

Figura 34. Clasificación taxonómica de la especie *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Anexo D. Capturas fotográficas de las especies de árboles de sombra



Figura 35. Captura fotográfica de la especie *Inga lineata* Benth.



Figura 36. Captura fotográfica de la especie *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.



Figura 37. Captura fotográfica de la especie *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C. N. Page

Anexo E. Fichas de la recopilación de datos en campo

FICHA DE MEDICIÓN DEL DIÁMETRO - CAFÉ NO PODADO														
Sistema de evaluación:			Café con guaba			Distancia de siembra:			2.20 m * 1.00 m (café)					
N° de planta	Repetición 1				N° de planta	Repetición 2				N° de planta	Repetición 3			
	Diámetro (mm) con vernier					Diámetro (mm) con vernier					Diámetro (mm) con vernier			
	Ramas (D en 15 cm)		D ($\bar{X}$ o Σ)			Ramas (D en 15 cm)		D ($\bar{X}$ o Σ)			Ramas (D en 15 cm)		D ($\bar{X}$ o Σ)	
1	46.09	44.84	$\bar{X}$	Σ	1	38.94	38.76	$\bar{X}$	Σ	1	38.83	41.15	$\bar{X}$	Σ
2	34.93	33.77	$\bar{X}$	Σ	2	36.17	36.59	$\bar{X}$	Σ	2	36.35	38.43	$\bar{X}$	Σ
3	43.29	42.01	$\bar{X}$	Σ	3	35.99	33.80	$\bar{X}$	Σ	3	32.85	35.57	$\bar{X}$	Σ
4	35.61	36.43	$\bar{X}$	Σ	4	37.05	35.58	$\bar{X}$	Σ	4	40.82	37.67	$\bar{X}$	Σ
5	39.44	39.27	$\bar{X}$	Σ	5	38.57	40.69	$\bar{X}$	Σ	5	32.48	34.47	$\bar{X}$	Σ
6	38.35	38.74	$\bar{X}$	Σ	6	30.70	31.07	$\bar{X}$	Σ	6	39.09	40.38	$\bar{X}$	Σ
7	38.68	38.42	$\bar{X}$	Σ	7	33.54	35.46	$\bar{X}$	Σ	7	38.06	40.92	$\bar{X}$	Σ
8	32.33	28.55	$\bar{X}$	Σ	8	38.53	37.80	$\bar{X}$	Σ	8	43.80	42.61	$\bar{X}$	Σ
9	21.62	41.35	$\bar{X}$	Σ	9	33.98	35.44	$\bar{X}$	Σ	9	34.02	37.07	$\bar{X}$	Σ
10	24.11	24.56	$\bar{X}$	Σ	10	32.47	34.49	$\bar{X}$	Σ	10	32.52	31.66	$\bar{X}$	Σ
11	31.19	30.64	$\bar{X}$	Σ	11	41.95	42.24	$\bar{X}$	Σ	11	37.10	38.78	$\bar{X}$	Σ
12	33.91	32.53	$\bar{X}$	Σ	12	30.72	23.44	$\bar{X}$	Σ	12	40.20	38.93	$\bar{X}$	Σ
13	36.56	39.6	$\bar{X}$	Σ	13	42.52	40.81	$\bar{X}$	Σ	13	42.98	41.39	$\bar{X}$	Σ

Figura 38. Ficha de medición del diámetro para café no podado (a 15 cm del suelo) para el SAF de CG.

FICHA DE MEDICIÓN DEL DIÁMETRO - CAFÉ NO PODADO														
Sistema de evaluación:			Café con pino			Distancia de siembra:			1.80 m * 1.00 m (café)					
N° de planta	Repetición 1				N° de planta	Repetición 2				N° de planta	Repetición 3			
	Diámetro (mm) con vernier			Ramas (D en 15 cm)		D ($\bar{X}$ o Σ)	Diámetro (mm) con vernier				Ramas (D en 15 cm)	D ($\bar{X}$ o Σ)		
1	51.19		$\bar{X}$	Σ	1	44.23	47.74	$\bar{X}$	Σ	1	47.95	45.24	$\bar{X}$	Σ
2	51.96	57.63	$\bar{X}$	Σ	2	48.45	23.88	$\bar{X}$	Σ	2	51.47	50.38	$\bar{X}$	Σ
3	47.86	53.22	$\bar{X}$	Σ	3	51.24	47.57	$\bar{X}$	Σ	3	59.44	58.48	$\bar{X}$	Σ
4	56.91	59.70	$\bar{X}$	Σ	4	44.13	41.53	$\bar{X}$	Σ	4	39.99	40.40	$\bar{X}$	Σ
5	50.69	48.37	$\bar{X}$	Σ	5	33.78	29.31	$\bar{X}$	Σ	5	27.18	40.36	$\bar{X}$	Σ
6	37.95	39.56	$\bar{X}$	Σ	6	43.54	45.02	$\bar{X}$	Σ	6	48.87	46.83	$\bar{X}$	Σ
7	49.28	44.50	$\bar{X}$	Σ	7	20.99	33.66	$\bar{X}$	Σ	7	50.26	48.32	$\bar{X}$	Σ
8	52.84	54.14	$\bar{X}$	Σ	8	50.68	51.54	$\bar{X}$	Σ	8	33.26	33.86	$\bar{X}$	Σ
9	48.19	51.74	$\bar{X}$	Σ	9	49.89	50.06	$\bar{X}$	Σ	9	50.87	48.30	$\bar{X}$	Σ
10	46.33	51.48	$\bar{X}$	Σ	10	44.62	44.99	$\bar{X}$	Σ	10	50.94	49.37	$\bar{X}$	Σ
11	57.25	59.77	$\bar{X}$	Σ	11	59.71	56.07	$\bar{X}$	Σ	11	40.09	42.21	$\bar{X}$	Σ
12	52.63	50.12	$\bar{X}$	Σ	12	48.37	20.33	$\bar{X}$	Σ	12	48.60	50.61	$\bar{X}$	Σ
13	46.73	46.60	$\bar{X}$	Σ	13	48.29	47.92	$\bar{X}$	Σ	13	36.45	39.93	$\bar{X}$	Σ
14	44.81	42.66	$\bar{X}$	Σ	14	29.78	47.41	$\bar{X}$	Σ	14	42.37	42.39	$\bar{X}$	Σ
15	41.86		$\bar{X}$	Σ	15	55.34	57.27	$\bar{X}$	Σ	15	55.70	57.01	$\bar{X}$	Σ
16	49.29	50.11	$\bar{X}$	Σ	16	53.06	54.34	$\bar{X}$	Σ	16	41.75	48	$\bar{X}$	Σ

Figura 39. Ficha de medición del diámetro para café no podado (a 15 cm del suelo) para el SAF de CP.

FICHA DE MEDICIÓN DEL DIÁMETRO - CAFÉ PODADO															
Sistema de evaluación:				Café con ulcumano				Distancia de siembra:				2.00 m * 1.20 m (café)			
N° de planta	Repetición 1				N° de planta	Repetición 2				N° de planta	Repetición 3				
	Diámetro (mm) con vernier					Diámetro (mm) con vernier					Diámetro (mm) con vernier				
	Ramas (DAP en 1.3 m)					Ramas (DAP en 1.3 m)					Ramas (DAP en 1.3 m)				
1	22.32	23.08			1	26.44	21.32			1	19.85	25.64			
2	22.50				2	24.24	14.04			2	26.07	19.89			
3	19.99				3	19.15	13.97			3	13.98				
4	17.39	22.75			4	24.44	17.87			4	20.92	19.01			
5	8.26	23.28			5	18.91	12.15			5	23.36	15.56	15.85		
6	21.96	23.28			6	24.20	11.88			6	26.76	16.05			
7	30.14	17.98	10.89		7	15.98	11.43			7	21.61	25.81	7.87		
8	29.25	19.97			8	18.20				8	23.89	28.93			
9	25.25	9.27			9	14.72				9	25.11	23.88			
10	22.02	21.44			10	20.13	21.61			10	19.40	19.49			
11	22.85	12.14			11	25.57	16.66			11	15.98	19.98			
12	18.46				12	23.14	11.94			12	16.07	22.48	7.56		

Figura 40. Ficha de medición del diámetro para café podado (DAP a 1.30 m del suelo) para el SAF de CU.

FICHA DE MEDICIÓN DEL DIÁMETRO - CAFÉ PODADO											
Sistema de evaluación:			Café sin sombra				Distancia de siembra:			2.20 m * 1.20 m (café)	
N° de planta	Repetición 1			N° de planta	Repetición 2			N° de planta	Repetición 3		
	Diámetro (mm) con vernier				Diámetro (mm) con vernier				Diámetro (mm) con vernier		
	Ramas (DAP en 1.3 m)				Ramas (DAP en 1.3 m)				Ramas (DAP en 1.3 m)		
1	23.68	22.65		1	20.16			1	17.27		
2	17.31	9.65		2	21.05	12.03		2	22.09	14.10	15.88
3	12.51	25.02		3	20.47			3	27.44	18.48	
4	24.41	13.82		4	22.05	16.36		4	18.16	23.70	
5	19.53	5.92		5	23.87	20.99		5	21.74	14.78	15.29
6	23.63	17.81		6	15.62	8.54	12.84	6	15.85	26.88	
7	11.46	11.47		7	9.41	19.47	11.78	7	15.25	22.43	
8	17.50	8.32		8	18.11			8	23.72	17.97	
9	25.07	7.72		9	15.70			9	13.19	14.76	
10	16.26	22.15		10	17.70	15.24	7.04	10	21.88	8.47	
11	20.34	8.90		11	13.74	26.02	17.16	11	18.50	17.55	

Figura 41. Ficha de medición del diámetro para café podado (DAP a 1.30 m del suelo) para el Cs.

FICHA DE MEDICIÓN DEL DIÁMETRO - ÁRBOL DE SOMBRA								
Sistema de evaluación:		Café con guaba			Distancia de siembra:		10.00 m * 10.00 m (árbol)	
N° de árbol	Repetición 1		N° de árbol	Repetición 2		N° de árbol	Repetición 3	
	Diámetro (cm) con forcípula			Diámetro (cm) con forcípula			Diámetro (cm) con forcípula	
	DAP 1 a 1.3 m	DAP 2 a 1.3 m		DAP 1 a 1.3 m	DAP 2 a 1.3 m		DAP 1 a 1.3 m	DAP 2 a 1.3 m
1	32.30	38.00	1	34.80	33.40	1	51.40	53.60
2	53.20	46.90	2	44.50	41.60	2	44.40	42.30
3	54.00	47.20	3	37.80	45.70	3	45.50	49.60

Figura 42. Ficha de medición del diámetro para el árbol de sombra con el uso de la forcípula para el SAF de CG.

FICHA DE MEDICIÓN DEL DIÁMETRO - ÁRBOL DE SOMBRA									
Sistema de evaluación:			Café con pino			Distancia de siembra:		10.00 m * 8.00 m (árbol)	
N° de árbol	Repetición 1		N° de árbol	Repetición 2		N° de árbol	Repetición 3		
	Diámetro (cm) con cinta métrica			Diámetro (cm) con cinta métrica			Diámetro (cm) con cinta métrica		
	Longitud de circunferencia (DAP a 1.3 m)			Longitud de circunferencia (DAP a 1.3 m)			Longitud de circunferencia (DAP a 1.3 m)		
1	120.80		1	94.30		1	129.20		
2	97.50		2	79.90		2	105.00		
3	93.70		3	102.20		3	107.70		
4	114.80		4	104.00		4	95.30		

Figura 43. Ficha de medición del diámetro para el árbol de sombra con el uso de la cinta métrica para el SAF de CP.

FICHA DE MEDICIÓN DEL DIÁMETRO - ÁRBOL DE SOMBRA								
Sistema de evaluación:		Café con ulcumano		Distancia de siembra:		6.00 m * 8.00 m (árbol)		
N° de árbol	Repetición 1		N° de árbol	Repetición 2		N° de árbol	Repetición 3	
	Diámetro (cm) con cinta métrica			Diámetro (cm) con cinta métrica			Diámetro (cm) con cinta métrica	
	Longitud de circunferencia (DAP a 1.3 m)			Longitud de circunferencia (DAP a 1.3 m)			Longitud de circunferencia (DAP a 1.3 m)	
1	86.20		1	92.60		1	96.40	
2	93.20		2	119.10		2	82.50	
3	84.60		3	109.00		3	96.00	
4	79.50		4	114.20		4	86.90	
5	88.90		5	100.70		5	88.40	
6	98.00		6	101.90		6	85.50	
7	111.40		7	78.80		7	114.40	

Figura 44. Ficha de medición del diámetro para el árbol de sombra con el uso de la cinta métrica para el SAF de CU.

Anexo F. Panel fotográfico

Figura 45. Propietario de la finca, en la que se evaluó el sistema de café con guaba.



Figura 46. Propietario de la finca, en la que se evaluó el sistema de café con pino.



Figura 47. Encargado de la finca, en la que se evaluó el sistema de café con ulcumano y café sin sombra.



Figura 48. Georreferenciación y delimitación de las subparcelas de muestreo en el sistema de café con guaba.



Figura 49. Recolección de muestras de arbustos/herbáceas y hojarascas en el sistema café con guaba y café con pino respectivamente.



Figura 50. Recolección de muestras de suelo para densidad aparente en el sistema de café con ulcumano y café sin sombra respectivamente.



Figura 51. Recolección de muestras de suelo para materia orgánica en el sistema de café con guaba y café sin sombra respectivamente.



Figura 52. Muestras de arbustos/herbáceas y hojarascas dispuestas en la estufa para obtener el peso seco.



Figura 53. Peso seco de las muestras de suelo para densidad aparente.



Figura 54. Secado de las muestras de suelo para determinar la materia orgánica.



Figura 55. Tamizado de las muestras de suelo para determinar la materia orgánica.



Figura 56. Determinación de la materia orgánica por el método de Walkley y Black.



Figura 57. Recolección de muestras botánicas para su identificación taxonómica.



Figura 58. Capturas fotográficas de árboles de sombra para su identificación taxonómica.



Figura 59. Prensa botánica para la identificación taxonómica de las muestras.



Figura 60. Medición del diámetro de la planta de café y del árbol de sombra en el sistema de café con guaba.



Figura 61. Medición del diámetro de la planta de café y del árbol de sombra en el sistema de café con pino.



Figura 62. Medición del diámetro de la planta de café y del árbol de sombra en el sistema de café con ulcumano.



Figura 63. Medición del diámetro de la planta de café en el sistema de café sin sombra.

Anexo G. Medios probatorios de la ejecución de tesis


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
 Departamento Académico de Ciencias Ambientales





"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

Tingo Maria, 01 de diciembre de 2023

CARTA N° 001-2023-UNAS-FRNR-DACA/ESHP

DR. LUIS EDUARDO, ORE CIERTO *x Ore 10:02 - 11/12/2023*
 ING.MSC. FRANKLIN, DIONISIO MONTALVO *x y 10:02 - 11/12/2023*
 ING.MSC. MARIBEL FLORA, ROCA CAPCHA

JURADOS DE TESIS

Asunto : Invitación para la revisión de ejecución de tesis

De mi especial consideración:

Es grato dirigirme a usted para saludarle cordialmente y hacerle la invitación a la verificación de la ejecución de tesis, titulado "ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN TRES SISTEMAS AGROFORESTALES CON *Coffea arabica* (CAFÉ) EN EL DISTRITO SAN LUIS DE SHUARO - JUNÍN, 2023". Dicha investigación es ejecutada por la testista BACH. ELDHY SIANINA HUERTO PAJUELO en las comunidades Yapaz Bajo y Unión Palomar pertenecientes al distrito San Luis de Shuaro de la provincia Chanchamayo, departamento Junín.

La fecha de verificación será a elección de su persona, según su disponibilidad, teniéndose como fecha tentativa del 08 de diciembre al 29 de diciembre de 2023.

Actividad	Fecha		Lugar
	Desde	Hasta	
Recolección de muestras de arbustos y herbáceas, hojarasca, suelo y recopilación de datos de campo.	24 de noviembre de 2023	28 de diciembre de 2023	Comunidades Yapaz Bajo y Unión Palomar pertenecientes al distrito San Luis de Shuaro.
Procesamiento en laboratorio de las muestras de arbustos y herbáceas, hojarasca, suelo.	24 de noviembre de 2023	21 de diciembre de 2023	Laboratorio de Suelos, Agua y Foliares (LABSAF) de la Estación Experimental Agraria (EEA) Pichanaki.

Nota: Esta invitación está sujeta a sustentar sus gastos de viáticos (pasaje y alimentación); el itinerario estará conformado:

Hora	Actividad
05:00 pm	Viaje (salida) de Tingo Maria a Pichanaki.
08:00 pm	Cena en Huánuco.
06:00 am	Llegada a Pichanaki.
07:00 am	Desayuno en Pichanaki.
08:00 am	Salida a campo (al distrito San Luis de Shuaro).
12:30 pm	Visita a las parcelas de investigación.
02:00 pm	Almuerzo en San Luis de Shuaro.
04:30 pm	Regreso a la ciudad de Pichanaki.
04:30 pm - 05:30 pm	Llegada a la ciudad de Pichanaki.
06:30 pm	Visita al laboratorio de la EEA Pichanaki.
07:00 pm	Cena en la ciudad de Pichanaki.
7:00 pm	Viaje de retorno a la ciudad de Tingo Maria.

El itinerario está sujeto a cambios.

Sin otro en particular, me suscribo de usted, agradeciendo de antemano su pronta respuesta. Para coordinaciones previas se deja el número de celular 901952822.

Atentamente,

Eldhy Sianina
 Eldhy Sianina, Huerto Pajuelo
 Bach. en Ciencias Ambientales
 Testista

Recibido
17/12/2023

Figura 64. Carta de invitación para la revisión de ejecución de tesis.

ELDHY SIANINA HUERTO PAJUELO-Est. POSGRADO: GESTIÓN AMBIENTAL



Para: Luis Ore Cierito - Docente Ambiental; Franklin Dionisio M.-Docente FRNR;

Jue 23/05/2024 17:16

MARIBEL FLORA ROCA CAPCHA-DOCENTE UNAS

CC: Sandra L. Zavala Guerrero - Docente Ing. Ambiental

larcado

atención: sevenyears (10 años) Expira: Dom 21/05/2024 17:16

Buenas tardes estimados miembros del jurado de tesis.

Previa coordinación con cada uno de ustedes mediante la **CARTA N° 001-2023-UNAS-FRNR-DACA/ESH** (01 de diciembre de 2023), remito el **INFORME N° 001-2024-UNAS-FRNR-DACA/ESH** en la que se hace de su conocimiento las actividades realizadas para la ejecución del Proyecto de Tesis "**Almacenamiento de carbono en tres sistemas agroforestales con *Coffea arabica* (café) en el distrito San Luis de Shuaro - Junín 2023**", asimismo, se adjunta un vídeo de los sistemas evaluados en la investigación, a fin de que lo consideren como las evidencias correspondientes a la ejecución de esta investigación.

Gracias por su atención y saludos cordiales.

[Informe 001-2024-UNAS-FRNR-DACA.pdf](#)



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Departamento Académico de Ciencias Ambientales



"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

INFORME N° 001-2024-UNAS-FRNR-DACA/ESH

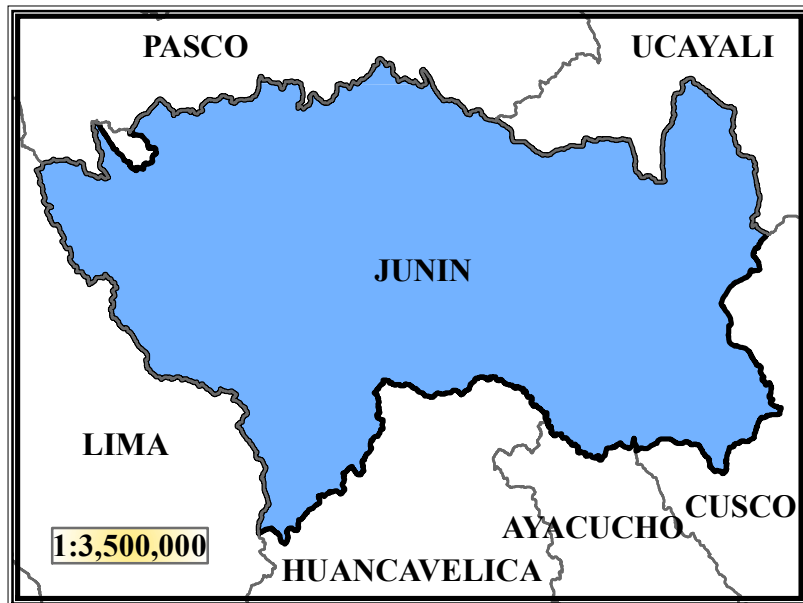
Para	: Dr. Luis Eduardo, Oré Cierito Ing. MSc. Franklin, Dionisio Montalvo Ing. MSc. Maribel Flora, Roca Capcha <i>Jurados de tesis</i>
CC	: Ing. MSc. Sandra Lorena, Zavala Guerrero <i>Asesor de tesis</i>
De	: Bach. Eldhy Sianina, Huerto Pajuelo <i>Testista</i>
Asunto	: Informe de actividades de ejecución del Proyecto de Tesis y video
Referencia	: RESOLUCIÓN N° 733-2023-D-FRNR-UNAS CARTA N° 001-2023-UNAS-FRNR-DACA/ESH
Fecha	: 23 de mayo de 2024

Figura 65. Video e informe con actividades de ejecución de tesis.

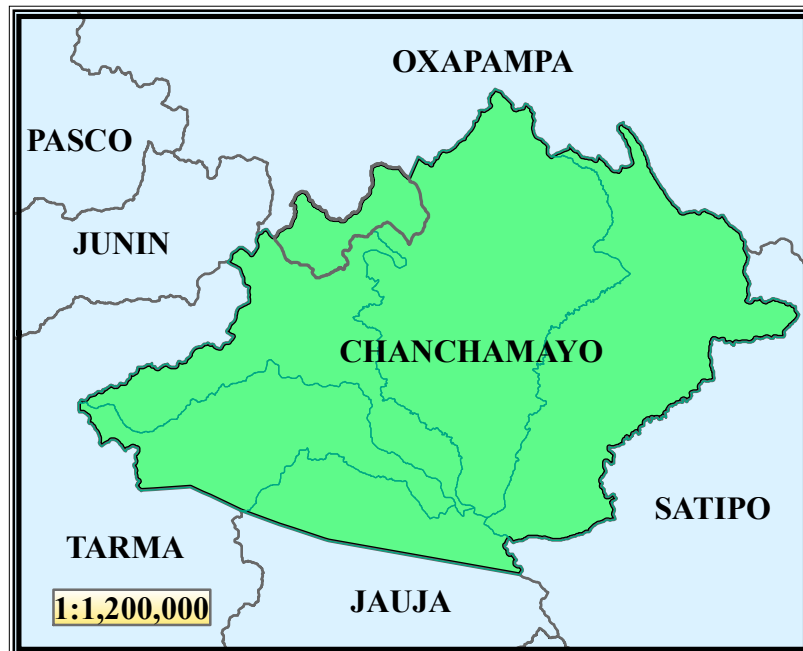
Anexo H. Planos

MAPA DE UBICACIÓN

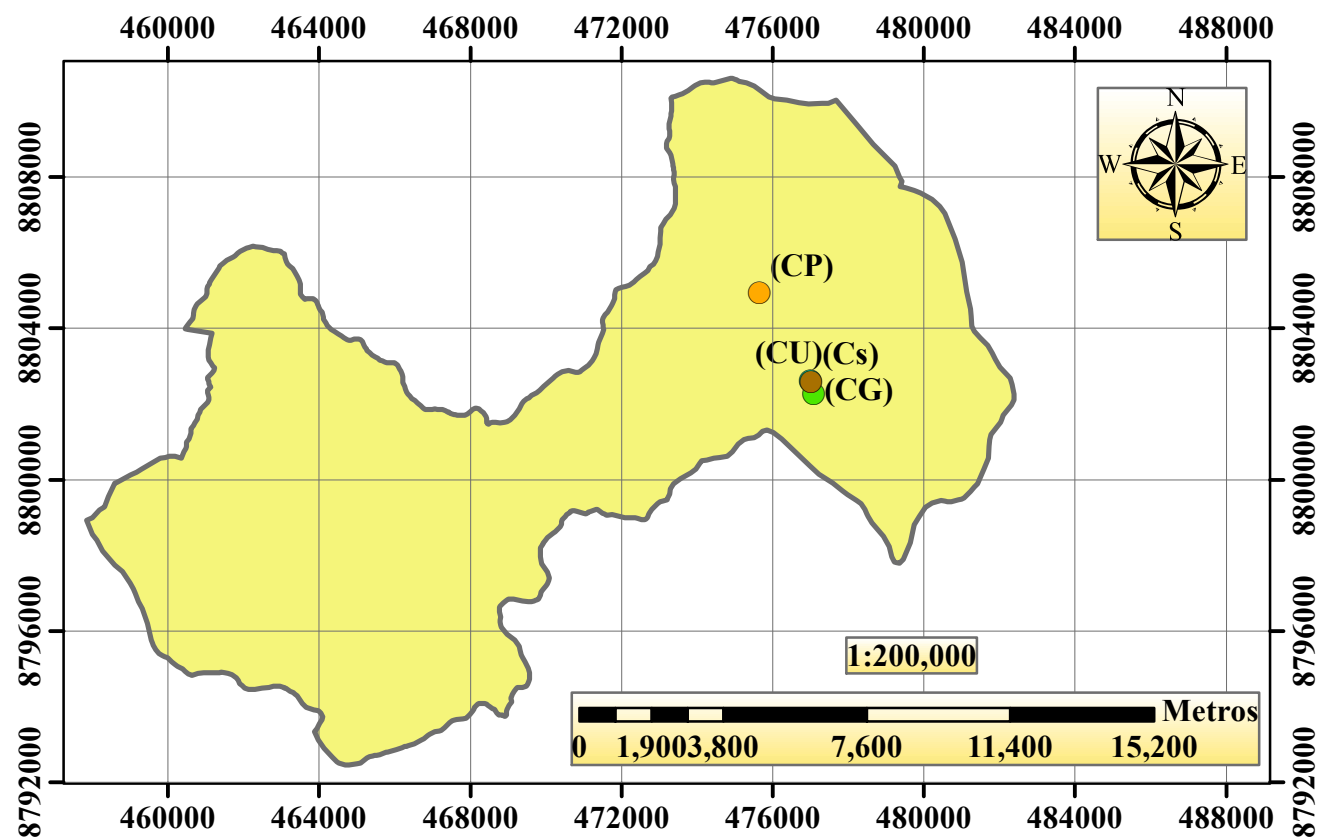
DEPARTAMENTO DE JUNÍN



PROVINCIA DE CHANCHAMAYO



DISTRITO DE SAN LUIS DE SHUARO



LEYENDA

Sistema agroforestal

- Café con guaba (CG)
- Café con pino (CP)
- Café con ulcumano (CU)
- Café sin sombra (Cs) - control

Punto	SAF	Este	Norte	Altitud	Comunidad
1	(CG)	477080	8802257	1369	Yapaz Bajo
2	(CP)	475636	8804918	1392	Unión Palomar
3	(CU)	477006	8802606	1398	Yapaz Bajo
4	(Cs)	477018	8802569	1390	Yapaz Bajo



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

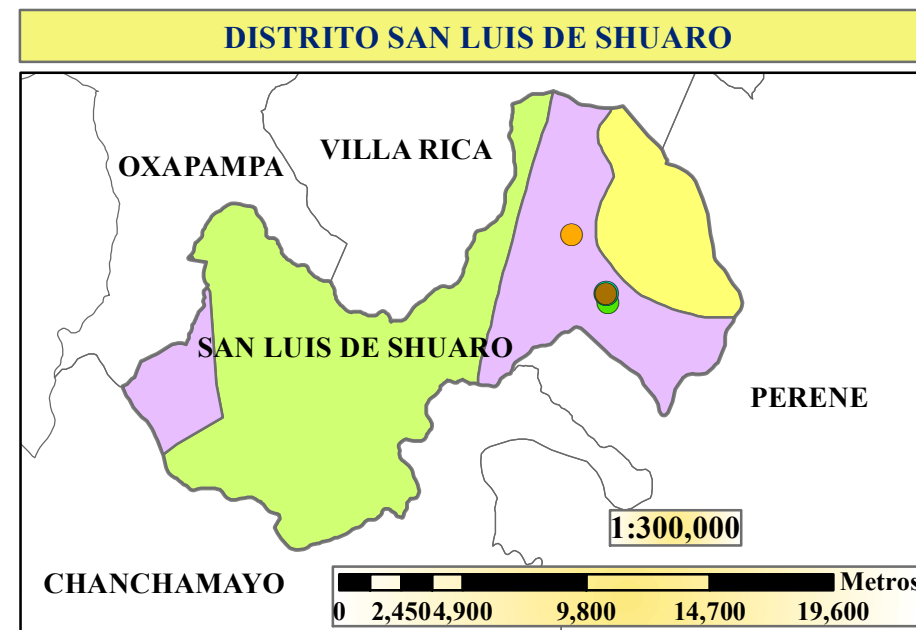
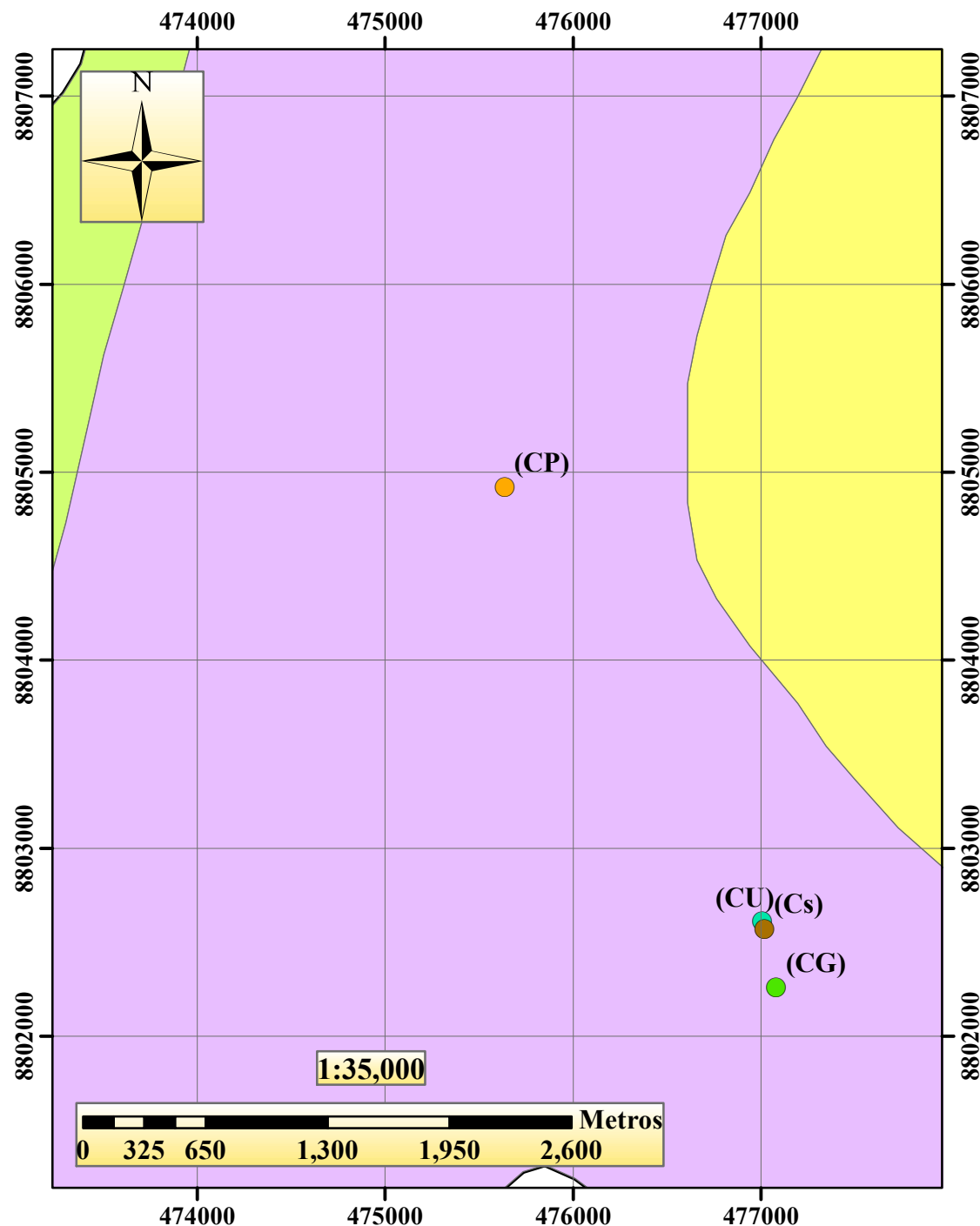
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



MAPA:	ESCALA:	ELABORADO POR:	FECHA:	SISTEMA DE REFERENCIA:
Ubicación de los sistemas agroforestales	Indicada	Bach. Eldhy Sianina, Huerto Pajuelo	Octubre 2023	UTM - Zona 18/DATUM WGS 84

MAPA DE ZONAS DE VIDA



LEYENDA

Zonas de vida

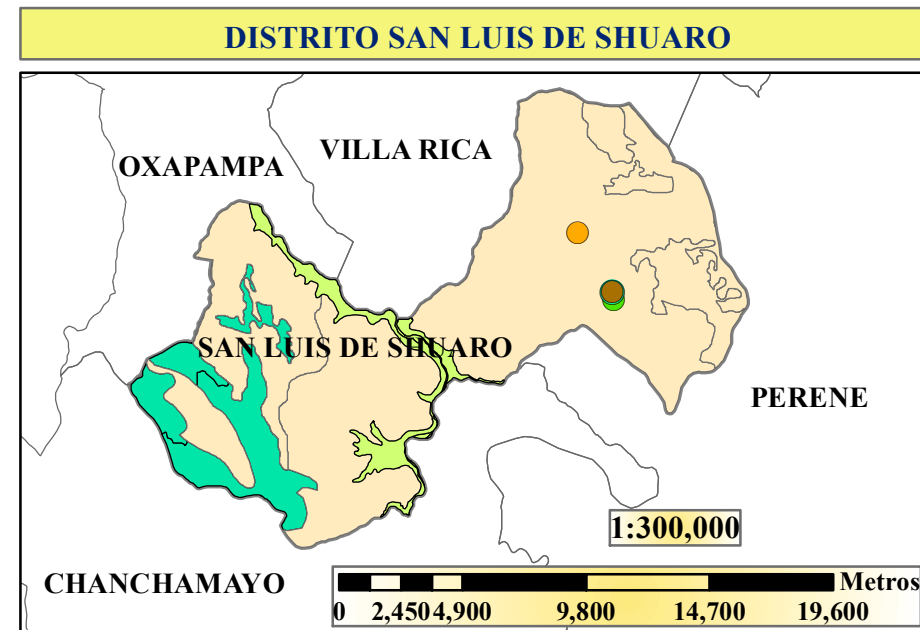
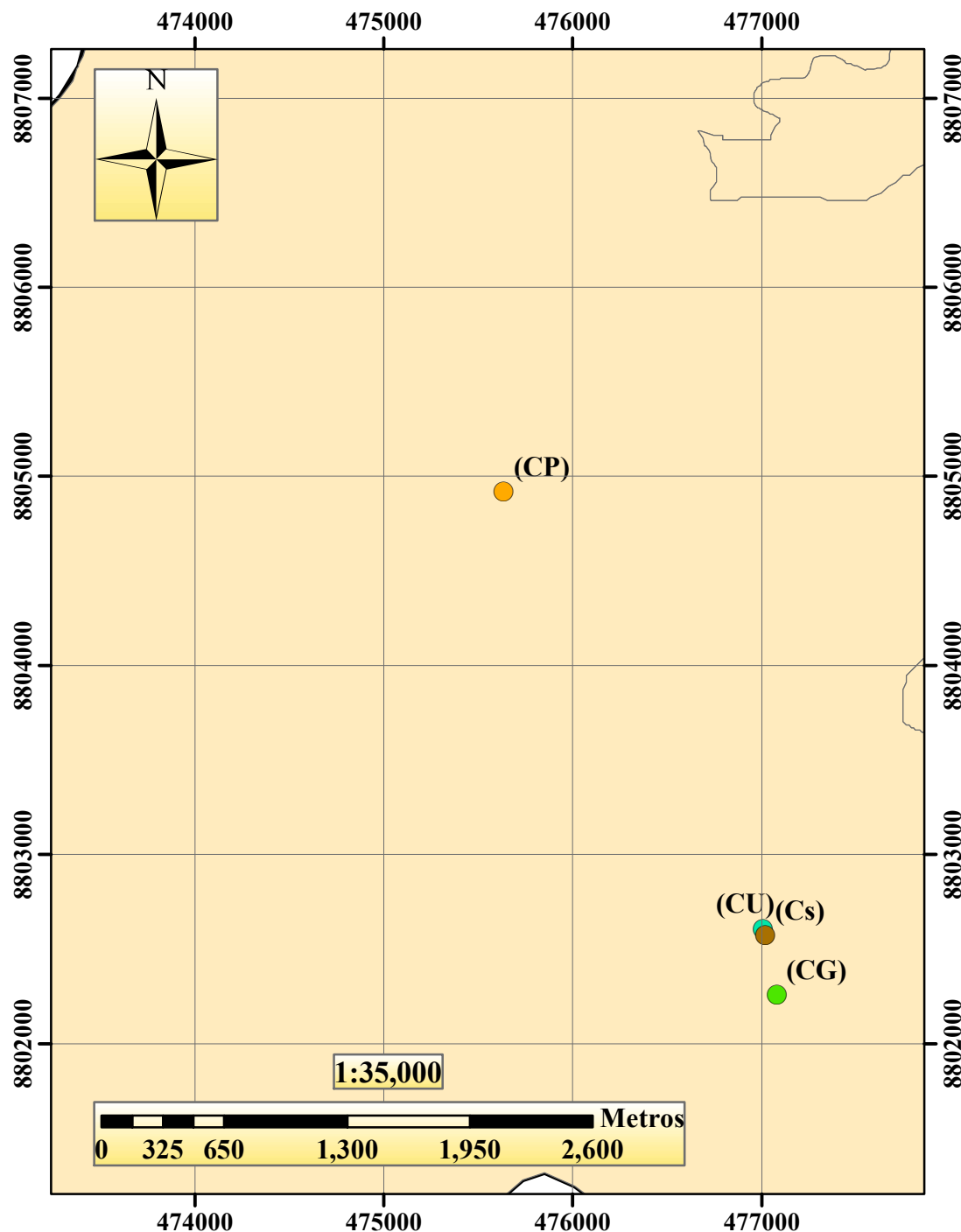
- Bosque húmedo premontano tropical
- Bosque muy húmedo montano bajo tropical
- Bosque muy húmedo premontano tropical

Sistema agroforestal

- Café con guaba (CG)
- Café con pino (CP)
- Café con ulcumano (CU)
- Café sin sombra (Cs) - control

	UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA				
	FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES				
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL				
MAPA:	ESCALA:	ELABORADO POR:	FECHA:	SISTEMA DE REFERENCIA:	
Zonas de vida del distrito San Luis de Shuaro	Indicada	Bach. Eldhy Sianina, Huerto Pajuelo	Octubre 2023	UTM - Zona 18/DATUM WGS 84	

MAPA DE ZONIFICACIÓN ECOLÓGICA Y ECONÓMICA



- LEYENDA**
- Zonificación Ecológica y Económica**
- Zonas de protección y conservación ecológica
 - Zonas de recuperación
 - Zonas productivas
- Sistema agroforestal**
- Café con guaba (CG)
 - Café con pino (CP)
 - Café con ulcumano (CU)
 - Café sin sombra (Cs) - control

	UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA				
	FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES				
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL				
MAPA:	ESCALA:	ELABORADO POR:	FECHA:	SISTEMA DE REFERENCIA:	
ZEE del distrito de San Luis de Shuaro	Indicada	Bach. Eldhy Sianina, Huerto Pajuelo	Octubre 2023	UTM - Zona 18/DATUM WGS 84	