



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Potencial de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en el  
carbono y calidad del suelo en San Martín

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

Ingeniera Ambiental

**AUTORAS:**

Davila Arias, Rosa Fiorela ([orcid.org/0000-0003-4584-7881](https://orcid.org/0000-0003-4584-7881))

Garcia Villegas, Reina ([orcid.org/0000-0002-9085-2914](https://orcid.org/0000-0002-9085-2914))

**ASESOR:**

Dr. Vallejos Torres, Geomar ([orcid.org/0000-0001-7084-977X](https://orcid.org/0000-0001-7084-977X))

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Sistemas de Gestión Ambiental

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

**TARAPOTO - PERÚ**

**2024**



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, VALLEJOS TORRES GEOMAR, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TARAPOTO, asesor de Tesis titulada: "Potencial de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en el carbono y calidad del suelo en San Martín.", cuyos autores son DAVILA ARIAS ROSA FIORELA, GARCIA VILLEGAS REYNA, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 15%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TARAPOTO, 22 de Julio del 2024

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
VALLEJOS TORRES GEOMAR DNI: 01162440 ORCID: 0000-0001-7084-977X	Firmado electrónicamente por: GVALLEJOST el 22- 07-2024 19:40:59

Código documento Trilce: TRI - 0830764



**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Declaratoria de Originalidad de los Autores**

Nosotros, DAVILA ARIAS ROSA FIORELA, GARCIA VILLEGAS REYNA estudiantes de la de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TARAPOTO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Potencial de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en el carbono y calidad del suelo en San Martín.", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Firma</b>
DAVILA ARIAS ROSA FIORELA <b>DNI:</b> 71690007 <b>ORCID:</b> 0000-0003-4584-7881	Firmado electrónicamente por: RDAVILAA el 23-07-2024 06:15:06
GARCIA VILLEGAS REYNA <b>DNI:</b> 71111255 <b>ORCID:</b> 0000-0002-9085-2914	Firmado electrónicamente por: GGARCI96 el 23-07-2024 07:01:04

Código documento Trilce: INV - 1710346

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Jesús Arias Araujo y Carlomagno Dávila Rivera por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante en cada etapa de mi vida. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mis amadas hijas, Briana y Cristhina, por ser mi mayor fuente de inspiración y alegría. Sus sonrisas y abrazos me dieron la fuerza necesaria para seguir adelante en los momentos más difíciles.

A mi esposo, José Ayala Santisteban por su amor, paciencia y apoyo Incondicional permaneciendo siempre a mi lado, brindándome el ánimo y la fortaleza para superar cada desafío.

A mis hermanos, Daniel y Onur por su constante apoyo y palabras de aliento. Su cariño y confianza han sido fundamentales en este camino.

**Rosa Fiorela Dávila Arias.**

A Dios y a mis amados padres, Azucena Villegas Guevara y Celso García Campos por su apoyo incondicional en este proceso de mi carrera profesional.

A mi pareja (Abg.) Gregorio Chamaya Copia por su amor incondicional y apoyo constante en el transcurso de mi carrera y a su vez ha sabido por darme una estabilidad emocional, por grandiosos consejos y guía profesional.

**Reina García Villegas.**

## **AGRADECIMIENTO**

Mi más profundo agradecimiento a Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este viaje académico. Su presencia constante me ha dado la sabiduría y el valor necesarios para enfrentar y superar cada desafío.

A mis amados padres, Jesús Arias Araujo y Carlomagno Dávila Rivera, gracias por su amor incondicional, por su sacrificio y por su apoyo constante en cada etapa de mi vida. Sin su aliento y su fe inquebrantable en mí, este logro no habría sido posible.

Al Dr. Geomar Vallejos Torres, por su invaluable guía y apoyo a lo largo de esta investigación. Su conocimiento y experiencia han sido fundamentales para el desarrollo y éxito de este trabajo.

Agradezco también a la Universidad Cesar Vallejo y docentes por su retroalimentación y motivación constante.

### **Rosa Fiorela Dávila Arias.**

A Dios por guiarme por el camino de la sabiduría en momentos difíciles y brindarme salud. A mis queridos padres, Azucena Villegas Guevara y Celso García Campos por su apoyo y sus consejos que me han ayudado afrontar los retos que se me han presentado en transcurso del camino.

A mi pareja (Abg.) Gregorio Chamaya Copia que durante esta etapa de mi carrera ha sabido apoyarme para continuar y nunca renunciar, gracias por su amor incondicional y por su ayuda en este trayecto hacia mi formación profesional.

A los docentes que estuvieron presentes a lo largo de mi formación profesional y brindaron sus sugerencias para desarrollar el proyecto de la mejor manera.

A mi asesor de la Universidad Cesar Vallejo, por el acompañamiento y guía durante todo el proceso de esta tesis.

**Reina García Villegas.**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula .....	i
Declaratoria de autenticidad del asesor .....	ii
Declaratoria de originalidad del autor .....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento.....	v
Índice de Contenidos.....	vi
Índice de Tablas .....	vii
Índice de Figuras.....	viii
Resumen .....	ix
Abstract .....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. METODOLOGÍA.....	8
III. RESULTADOS.....	15
IV. DISCUSIÓN.....	28
V. CONCLUSIONES .....	34
VI. RECOMENDACIONES.....	35
REFERENCIAS.....	36
ANEXOS.....	42

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de varianza para el contenido de carbono .....	15
Tabla 2. Análisis de varianza para el contenido de DA .....	16
Tabla 3. Análisis de varianza para el contenido de MO .....	18
Tabla 4. Análisis de varianza para el contenido de P (ppm) .....	19
Tabla 5. Análisis de varianza para el contenido de pH.....	21
Tabla 6. Análisis de varianza para el contenido de humedad (%). .....	22
Tabla 7. Análisis de varianza para el porcentaje de colonización micorrízica.....	23
Tabla 8. Análisis de varianza para el contenido de lombrices en el suelo (m2)....	25

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contenido de carbono orgánico en suelos de ecosistemas con cacao .	16
Figura 2. Contenido de densidad aparente en suelos de ecosistemas con cacao	17
Figura 3. Contenido de materia organica en suelos de ecosistemas con cacao ..	19
Figura 4. Contenido de fosforo en suelos de ecosistemas con cacao .....	20
Figura 5. pH en suelos de ecosistemas con cacao .....	21
Figura 6. Humedad en suelos de ecosistemas con cacao .....	23
Figura 7. Colonización micorrizica en suelos de ecosistemas con cacao.....	24
Figura 8. Número de lombrices en suelos de ecosistemas con cacao .....	25
Figura 9. Principales variables estudiadas en la investigación en suelos de ecosistemas con cacao .....	27

## RESUMEN

Se evaluó el potencial de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en el carbono y calidad del suelo en San Martín. La selección se realizó en dos ecosistemas de cacao siendo estas, (monocultivo-MON y sistema agroforestal-SAF) en dos niveles altitudinales (300-500 y 800-1 000 msnm). La muestra estuvo conformada por 12 subparcelas de 100 m<sup>2</sup> en un área de cuatro hectáreas (dos ecosistemas de cacao como monocultivo y dos ecosistemas con árboles de sombra) en dos niveles altitudinales. Esta investigación fue de carácter básica, descriptivo y correlacional con un enfoque cuantitativo. Se estudiaron el COS, materia orgánica, humedad, contenido de lombrices y colonización micorrícica. Los análisis fueron medidos por el software R Studio para tener mayor precisión y calidad científica. Al mismo tiempo pruebas de ANOVA y Tukey a un nivel de 0.05. El mayor contenido de COS se presentó en suelos con altitudes entre 800 a 1 000 msnm con 119.79 t C ha<sup>-1</sup>, mientras que mayor densidad aparente entre 300 a 500 msnm con 1.35 g cm<sup>-3</sup>. El mayor contenido de fósforo se presentó en entre 800 a 1 000 msnm con 10.67 ppm y humedad relativa de 0.59%; en tanto, se encontró mayor colonización micorrícica (61.66%) y 12 lombrices por m<sup>2</sup>. Se concluyó que las plantaciones de cacao secuestrarían más carbono si se intercalaran con árboles de sombra; encontrándose una correlación positiva entre el carbono con densidad aparente y materia orgánica en suelos.

**Palabras Clave:** Altitudes, ecosistema forestal, lombrices, colonización, humedad.

## ABSTRACT

The potential of ecosystems with cocoa and altitudinal levels in carbon and soil quality in San Martín was evaluated. The selection was carried out in two cocoa ecosystems, these being (monoculture-MON and agroforestry system-SAF) at two altitudinal levels (300-500 and 800-1 000 meters above sea level). The sample was made up of 12 subplots of 100 m<sup>2</sup> in an area of four hectares (two cocoa ecosystems as monoculture and two ecosystems with shade trees) at two altitudinal levels. This research was basic, descriptive and correlational in nature with a quantitative approach. SOC, organic matter, humidity, worm content and mycorrhizal colonization were studied. The analyzes were measured by R Studio software to have greater precision and scientific quality. At the same time ANOVA and Tukey tests at a level of 0.05. The highest SOC content occurred in soils with altitudes between 800 and 1,000 meters above sea level with 119.79 t C ha<sup>-1</sup>, while the highest apparent density was between 300 and 500 meters above sea level with 1.35 g cm<sup>-3</sup>. The highest phosphorus content occurred between 800 to 1 000 meters above sea level with 10.67 ppm and relative humidity of 0.59%; Meanwhile, greater mycorrhizal colonization was found (61.66%) and 12 worms per m<sup>2</sup>. It was concluded that cocoa plantations would sequester more carbon if they were interspersed with shade trees; finding a positive correlation between carbon with apparent density and organic matter in soils.

**Keywords:** Altitudes, forest ecosystem, worms, colonization, humidity.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroforestales (SAF) de cacao desempeñan una función esencial en la salud ecosistémica. Las variaciones en la diversidad florística y cobertura vegetal de los ecosistemas agroforestales con cacao varían enormemente entre las provincias y sectores donde se cultivan; esto debido a que no existe un diseño específico para tal zona ni para el cultivo; en razón de ello los productores cacaoteros diseñan las plantaciones a su manera incluyendo diferentes árboles de sombra en su asociación con el cultivo. Otro de los factores es la densidad de las plantas de cacao y los árboles (Saavedra et al. 2020).

La copa de los árboles de sombra de los SAF de cacao modifica y regula las condiciones microclimáticas al amortiguar la luz, el déficit de presión de vapor (VPD), la temperatura, la humedad y la lluvia (Armengot et al. 2016). Un diseño agroforestal con cacao bien establecido con árboles apropiados generará una producción alta de cacao libre de plagas y enfermedades; para ello los agricultores deben mantener limpio y podados de tal manera existe mejora y cuidados (Niether et al. 2018).

Es necesario comprender el potencial de un diseño de plantaciones de cacao con árboles de sombra de tal manera sea sostenible con el tiempo; para ello se deben considerar otros aspectos relevantes como los ecosistemas, niveles altitudinales, clones de cacao, variaciones climáticas, etc (Lahive et al. 2019). Hay que entender que cada clon de cacao tiene respuestas distintas a las condiciones edafoclimáticas en función a su adaptabilidad a la zona; asimismo, en función a su plasticidad (Pérez-Ramos et al. 2019).

Por consiguiente, se plantea como problema de investigación, ¿Cuál es el efecto de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en el carbono y calidad del suelo en Lamas, San Martín?; además de los problemas específicos: ¿Cuál es la relación de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales con cacao en el contenido de carbono en Lamas, San Martín?; ¿Cuál es la relación de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en el estado nutricional del suelo

(MO, P, humedad) en Lamas, San Martín?, además de: ¿Cuál es la relación de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en la colonización micorrícica y contenido de lombrices en Lamas, San Martín?

Esta investigación se **justifica teóricamente** ya que el *T. cacao* producido en condiciones apropiadas con un sistema adecuado puede generar muchas divisas en su producción como “cultivo verde” (Sdrolia y Zarotiadis, 2019). Un cultivo asociado a árboles de sombra promueve un ecosistema saludable y ecológico promoviendo no solo grandes rendimientos del cultivo sino productos sanos y amigables al medio ambiente (Schroth et al., 2016). Asimismo, promueve la formación y sostenibilidad de la biodiversidad con un segundo producto que se podría generar como es la producción de maderas (Castle et al., 2022). **Justificación metodológica**, este estudio se ha tenido en cuenta metodologías validadas y publicadas en revistas de alto nivel de impacto sean estas Cuartiles 3, 2 y 1; al mismo tiempo, se cuenta con el asesor especialista en el tema. Cuenta con una publicación en la revista *The Journal of Agricultural Science*, asimismo se busca. **Justificación económica**, se dispone de los recursos económicos para invertir en el desarrollo de las actividades durante la ejecución de la tesis mediante el autofinanciamiento y se cuenta con los materiales, insumos para el desarrollo del proyecto.

Tal es así que, el objetivo general será: Analizar el efecto de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en el carbono y calidad del suelo en Lamas, San Martín y a la vez se detalla los objetivos específicos siguientes: (1) Medir la relación de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales con cacao en el contenido de carbono en Lamas, San Martín. (2) Explicar la relación de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en el estado nutricional del suelo (MO, P y humedad) en Lamas, San Martín y (3) Analizar la relación de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en la colonización micorrícica y contenido de lombrices en Lamas, San Martín. Por consiguiente, la Hipótesis general: Existe influencia de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en el carbono y calidad del suelo en Lamas, San Martín; por lo cual, se tendrá como Hipótesis específicas: (1) Existe diferencias significativas de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales con cacao en el

contenido de carbono en Lamas, San Martín (2) Existe diferencias significativas en los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en el estado nutricional del suelo (MO, P y humedad) en Lamas, San Martín; y (3) Existe diferencias significativas en los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en la colonización micorrícica y contenido de lombrices en Lamas, San Martín.

Tomando como antecedentes estudios previos, se presenta el estudio en dos niveles:

**Para el dominio Internacional**, según Schmidt et al. (2022) evaluaron los impactos de la presencia e identidad de los árboles de sombra vecinos sobre los rendimientos del cacao y los componentes físicos, químicos y biológicos de la rizosfera del cacao en un sistema agroforestal en el sur de Sulawesi, Indonesia. Asimismo, los sembríos de cacao asociado a árboles de sombra promoverán la microfauna del suelo en función a los microorganismos como micorrizas arbusculares, trichodermas, bacterias, etc; generando hábitats para su desarrollo y propagación generando una salud ecosistémica y calidad de los productos comestibles básicamente del cacao. Asimismo, Niether et al. (2018), evaluaron las condiciones ambientales de crecimiento de los árboles de cacao y encontraron que los sistemas agroforestales amortiguaron eventos climáticos extremos como las fluctuaciones de temperatura en comparación con los monocultivos, pero redujeron drásticamente la luz y la penetración. La variabilidad espacial de la caída y la luz transmitida fueron bajas bajo un dosel de árboles de sombra alto y cerrado. La poda de árboles de sombra resultó en una mayor apertura del dosel, transmisión de luz y caída, mientras que se redujo la función amortiguadora de los sistemas agroforestales con respecto a las fluctuaciones de temperatura y humedad. También Doe et al. (2023) mostraron relaciones intrincadas entre los factores ecológicos y el rendimiento de GC ( $1.07 \text{ t ha}^{-1}$ ), que comprendía frijoles secos de OC ( $1.24 \text{ t C ha}^{-1}$ ) y CC ( $0.89 \text{ t C ha}^{-1}$ ). El rendimiento del cacao verde aumentó en los campos propiedad de agricultoras y en los agricultores nativos que heredaron o poseyeron directamente tierras de cultivo. Los rendimientos del cacao también han sido relacionados con las reservas de carbono en los suelos (0.21 %), el pH (5.8) y contenidos de nitrógeno (40.8 %). Otros factores como la densidad de plantas de

cacao y árboles de sombra también desempeñan un rol fundamental en la calidad del producto. En tanto, Dawoe et al. (2016) encontraron que los índices de diversidad de Shannon y la riqueza de especies fueron bajos en comparación con otros estudios similares; esto probablemente porque no se han identificado especies que tienen compatibilidad con el cultivo en función al tipo de hojas.

Las reservas de carbono de los árboles de sombra difirieron entre sitios, pero fueron similares en los árboles de cacao. La reserva promedio de C en los árboles de cacao fue de  $7.45 \pm 0.41 \text{ Mg C ha}^{-1}$  en comparación con  $8.32 \pm 1.15 \text{ Mg C ha}^{-1}$  en los árboles de sombra. Asimismo, Asitoakor et al. (2024) encontraron que las especies arborea en los sistemas de cacao impactan el fósforo disponible en el suelo de manera diferente y las especies arboreas como el cedro español (*Cedrela odorata*), la limba (*Terminalia superba*) y la caoba (*Swietenia macrophylla*) aumentan el rendimiento del cacao en comparación con los sistemas de cacao sin árboles de sombra. Debido a que los agricultores por desconocimiento requieren árboles que no se asocian correctamente con el cultivo de cacao propiciando así la presencia de plagas y enfermedades que en algunas ocasiones no son controladas a tiempo.

**Como antecedentes en el contexto nacional**, tenemos a Fernández et al. (2022) realizaron una caracterización socio-económica y del medio ambiente en cultivares nativos de *T. cacao* en la provincia de Bagua. Quienes constataron que, ambientalmente los suelos de los ecosistemas de cacao no presentan erosión. Asimismo, constataron que los cacaoteros emplean árboles asociados al cacao para la sostenibilidad de las fincas. Asimismo, Inocencio-Vásquez et al. (2022) estudiaron la calidad de los suelos y los patrones asociados al cacao en Ucayali, Perú. Encontraron diferencias significativas para arena, limo, MO, N, K+. Encontrando una variabilidad en la baja fertilidad de los suelos, no óptimo para el cultivo del cacao.

Zavala et al. (2018) estudiaron el impacto de sistemas agroforestales asociados al cacao teniendo como variables dependientes al stock de carbono, biomasa de árboles, hojarasca y biomasa arbustiva. Encontrando que el ecosistema de 16 años

obtuvo más de 344 t C ha<sup>-1</sup>, en tanto el ecosistema de 8 y 16 años presentó 178 t C ha<sup>-1</sup>, y el SAF menor de 8 años con 154 t C/ha. El análisis económico indicó que el mejor lo mostró el ecosistema de 8 años con S/.2627.66; 23.85 %.

Vallejos-Torres et al. (2023) en sus resultados de plantaciones de cacao con dos clones bajos sistemas agroforestales y monocultivo encontraron un mayor contenido de Cd en suelos con plantaciones del clon CCN bajo sistemas agroforestales. El contenido de Cd en raíces, hojas y granos de cacao fue mayor en el ecosistema de clon CCN como monocultivo. Y llegó a la conclusión que los sembríos de cacao con árboles de sombra cumplen un rol fundamental en la protección de los cultivos clonales.

**Relevancia teórica del estudio**, investigadores mencionaron que el cacao con árboles de sombra tiene un potencial para almacenar carbono orgánico tanto en la biomasa arbórea como en los suelos (Schroth et al., 2015). Asimismo, genera un clima favorable para una amplia gama de biodiversidad de fauna y flora. Hay dos medidas de respeto al medio ambiente que se debaten entre los científicos: las huellas de C y las reservas permanentes de C. La reserva de carbono de un sistema de uso de la tierra se considera un indicador de compatibilidad con el clima, que mitiga el calentamiento global (van Rikxoort et al., 2014).

En tanto, los cultivares de cacao como una tecnología verde es de vital importancia para mejorar las condiciones climáticas y la salud de los ecosistemas (Schroth et al., 2016). Esto se debe a que se cree que el proceso de producción y el producto son ecológicamente amigables, neutrales en carbono o climáticamente inteligentes.

*T. cacao* asociado a árboles de sombra promueve un ecosistema saludable y ecológico promoviendo no solo grandes rendimientos del cultivo sino productos sanos y amigables al medio ambiente (Rajab et al., 2016).

En esta dirección, se ha descubierto que las intervenciones agroforestales tienen un inmenso potencial y han demostrado tener capacidad para reducir la erosión del suelo, conservar la MOS, mejorar las características físicas del suelo y mejorar aún

más el ciclo de nutrientes (Ollinaho y Kröger, 2021). Se cree que los SAF tienen un mayor potencial para secuestrar carbono y opciones de mitigación del cambio climático. Los SAF son uno de los sistemas eficaces de uso de la tierra que garantizan la seguridad alimentaria y nutricional, la resiliencia al cambio climático y la seguridad ambiental y la restauración de paisajes degradantes. Además, los SAF mejoran la calidad del suelo y conservan el ecosistema y la biodiversidad.

La conciencia de un productor de cultivar su cacao con productos orgánicos y árboles de sombra ha puesto en valor la calidad del cacao impactando en un gran potencial en la economía de los pobres y pequeños productores. En cultivos de *T cacao* se investigan cada vez más las compensaciones entre los factores socioeconómicos y ambientales de los diferentes sistemas de producción (Armengot et al. 2021). Si bien es cierto que cultivos de cacao a pleno sol tienen mayores rendimientos; sin embargo, a la larga este cultivo se reduce el tiempo de vida cosechándose cacao en un corto tiempo. Pero también están asociados con impactos ambientales mayores, como la pérdida de biodiversidad, la reducción de las reservas de carbono y el mayor uso de energía procedente de recursos no renovables, así como una reducción de la eficiencia energética (Bennett et al. 2021).

Se conoce del potencial impacto del ecosistema de cacao con árboles de sombra en la generación de diversos productos; por ejemplo, si asociamos cacao con guaba se va a obtener productos de consumo como las guabas y productos de cocina como la leña. Mientras que si asociamos cacao con árboles de caucho se va a existir un doble propósito ya que se puede obtener latex para la fabricación de ponchos, botas, llantas, etc. Muchos de estos ecosistemas contribuyen al amortiguamiento de las condiciones climáticas y por ende a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero como es el caso de dióxido de carbono (Marconi y Armengot, 2020).

Otro de los impactos importantes de asociar árboles en cultivos de cacao es la mejora de la red subterránea; básicamente en la contribución a la microfauna del suelo que permiten la descomposición de la materia orgánica; asimismo, el

amortiguamiento de las gotas de lluvia; contribuyendo a la permanencia del contenido de humedad que muchas veces tienen impacto positivo en el almacenamiento del carbono orgánico en los suelos (Gama-Rodrigues et al., 2011). Asimismo, contribuye a la descomposición de residuos orgánicos que generan la fertilidad de los suelos (Sauvadet et al., 2020).

Los sistemas agroforestales de cacao ofrecen el potencial de mejorar la canasta familiar mediante ingresos por la venta del cacao de los agricultores; asimismo, mejorar la biodiversidad, secuestrar carbono y brindar otros importantes servicios ecosistémicos (Schmidt et al., 2022); al mismo tiempo que los sistemas agroforestales basados en cacao (*Theobroma cacao* L.) pueden desempeñar un rol esencial en la captura de carbono (C) en la superficie y su almacenamiento bajo tierra (suelo) mediante la deposición continua de residuos vegetales (Gama-Rodrigues, et al 2011).

## II. METODOLOGÍA.

### **Tipo y diseño de Investigación.**

#### **Tipo de investigación.**

Esta investigación fue de carácter básica, descriptivo y correlacional, ya que se describió la conducta de las variables estudiadas. El enfoque fue cuantitativo, debido a que se midieron dos ecosistemas de cacao (monocultivo y agroforestal) en dos niveles altitudinales (300-500 msnm y 600-800 msnm); asimismo, se tomaron muestras de suelo al largo de los ecosistemas y se realizaron los análisis correspondientes de carbono, materia orgánica, humedad, contenido de lombrices y colonización micorrícica (Hernández et al., 2014). El propósito fue buscar y establecer nuevos conocimientos en campo que servirán para reestructurar los ecosistemas de cacao climáticamente inteligentes en la región San Martín.

#### **Diseño de investigación.**

El estudio estuvo constituido por un diseño no experimental, dado a que no manipuló variables establecidas (Ato et al., 2013); Asimismo, se midieron indicadores como el contenido de carbono en suelos, materia orgánica (MO), contenido de fósforo (P), Humedad, Número de lombrices por m<sup>2</sup> y colonización de hongos micorrícicos en suelos rizosférico de cacao en la región San Martín. Las muestras fueron colectadas en su forma natural dependiendo de los ecosistemas con cacao y trasladadas al laboratorio de suelos del Instituto de Cultivos Tropicales.

#### **Variables y operacionalización.**

**Variable Independiente:** Ecosistemas de cacao (monocultivo-MON y sistema agroforestal-SAF) en dos niveles altitudinales (300-500 y 800-1 000 msnm). Se adjunta tabla de operacionalización de variables en Anexos 1.

**Definición conceptual:** Generalmente los cultivares de cacao en el Perú y la amazonia están distribuidos y asociados por diseños con árboles forestales como shaina, bolaina, capirona, cedro, etc; especialmente

especies forestales que permiten el ingreso de la luz solar y promuevan la fotosíntesis y este la producción de los granos de cacao distribuidos en mazorcas. Estos diseños contribuyen a las reservas del carbono (Suárez-Venero et al., 2021).

**Definición operacional:** El análisis del estudio ha considerado metodologías e información relevante de fuentes científicas de gran impacto; en tal sentido, se descifrará el potencial de los ecosistemas de cacao en diferentes niveles altitudinales en la calidad del suelo y contenido de carbono en la región San Martín. Este estudio estuvo enmarcado en 12 subparcelas de 100 m<sup>2</sup> en un área de cuatro hectáreas (dos ecosistemas de cacao como monocultivo y dos ecosistemas con árboles de sombra) en dos niveles altitudinales.

**Escala de medición:** Ordinal

**Variable Dependiente:** Contenido de carbono en suelos, materia orgánica (MO), fósforo (P), humedad del suelo, número de lombrices por m<sup>2</sup> y colonización de hongos micorrícicos en dos ecosistemas con cacao ubicados en dos niveles altitudinales.

**Definición conceptual:** Los contenidos de carbono en un ecosistema esta influenciado por la presencia de microorganismos como las micorrizas arbusculares (Moore et al., 2018). Asimismo, los nuevos conocimientos de la calidad del suelo permitirán aplicar estrategias de fertilización en base a la dosificación adecuada.

**Definición operacional:** En las subparcelas estratificadas en los ecosistemas de cacao se consideró indicadores de carbono y calidad del suelo que fueron trasladados y analizados en el Laboratorio del Instituto de Cultivos Tropicales.

**Escala de medición:** Ordinal

## **Población, muestra y muestreo.**

### **Población.**

Para este estudio se consideró dos ecosistemas de cacao siendo estas, (monocultivo-MON y sistema agroforestal-SAF) en dos niveles altitudinales (300-500 y 800-1 000 msnm). Este estudio estuvo enmarcado en cuatro hectáreas (dos ecosistemas de cacao como monocultivo y dos ecosistemas con árboles de sombra) en dos niveles altitudinales.

### **Criterios de inclusión**

Para la toma de muestras se consideró a dos ecosistemas (MON y SAF) dentro de la provincia de Lamas.

### **Criterios de exclusión**

Los otros ecosistemas de cacao que no estuvieron entre los 300-500 y 800-1 000 msnm demás bosques de Lamas.

### **Muestra.**

La muestra estuvo conformada por 12 subparcelas de 100 m<sup>2</sup> en un área de cuatro hectáreas (dos ecosistemas de cacao como monocultivo y dos ecosistemas con árboles de sombra) en dos niveles altitudinales, como lo indica Nautiyal et al. (2019).

### **Muestreo**

Se colectaron 12 muestras de suelo para cada indicador correspondiente a las cuatro parcelas en estudio de los diferentes ecosistemas de cacao. A partir de esas muestras se analizaron los contenidos de carbono, MO, P y humedad: mientras que se analizó el número de lombrices por m<sup>2</sup>; al mismo tiempo que se extrajeron muestras de suelo rizosférico para cuantificar la colonización micorrícica.

## **Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

### **Técnicas de recolección de datos**

Los métodos propuestos correspondieron a fundamentos científicos de revistas indexadas en estudios de carbono, número de lombrices por m<sup>2</sup> (Castillo-Valdez et al., 2021), materia orgánica, fósforo y análisis de la colonización micorrícica (Llanos-Gómez et al., 2023).

### **Instrumentos de recolección de datos**

Para la toma de datos se emplearon formatos realizadas en una hoja de Excel elaborado en base a artículos científicos modelos encontrados para el trópico. Al mismo tiempo que se utilizaron formatos de base de datos para analizar estadísticamente los datos recogidos de campo y de los análisis de laboratorio. Se estimó la retención de COS de Walkley, Black (1934).

### **Validez de los instrumentos**

Los instrumentos que se emplearon en este estudio, fueron revisados y analizados por profesionales con gran conocimiento en el tema; quienes brindaron sus observaciones de validación. Las características del formato se evidencian en el Anexo 2 y 3):

Luego de haber sido validados estos formatos se procedió a procesar y analizar las muestras con las 12 muestras de las subparcelas planteados.

### **Confiabilidad**

Permitió analizar el grado de fiabilidad de los datos obtenidos a través del software de Alfa de Cronbach. Para ello fue necesario obtener valores entre 0.61 a 0.80 Alta confiabilidad.

### **Procedimientos**

#### **Identificación de los ecosistemas de cacao**

Se dio inicio con la estratificación de las subparcelas con cacao; para ello se establecieron en dos ecosistemas siendo este cacao como monocultivo

(MON) y cacao con árboles de sombra (SAF), establecidas en dos niveles altitudinales (300-500 y 800-1 000 msnm) en cada sistema se hicieron calicatas y se tomaron suelos del primer horizonte, siendo este de 0-20 cm (Ver Anexo 4 y 5).

### **Contenido de humedad del suelo**

Muestras de suelo colectadas fueron pesadas en fresco y llevadas al laboratorio para el secado a 70 °C por 48 horas con la finalidad de determinar el peso seco. Con dicha información se determinó el contenido de humedad (CH) mediante la ecuación expresada en su publicación de Solis et al. (2020):

$$CH = (\text{Peso húmedo de la muestra} - \text{Peso seco de la muestra}) / \text{Peso húmedo de la muestra}$$

### **Medición del número de lombrices**

Se midió la densidad de lombrices por metro cuadrado en muestras de dos ecosistemas y dos niveles altitudinales de cacao a 20 cm de profundidad. Para ello se empleó una pala metálica y una revisión por conteo (USDA, 2001) (Ver Anexo 6).

### **Colonización micorrícica**

Se consideraron 400 g de suelo colectado alrededor de la planta de cacao, tomándose raíces finas para la colonización. En seguida se lavó con agua destilada y se pusieron en tubos de vidrio con alcohol etílico al 70 %, y en seguida se puso a una refrigeradora a 4 °C. Las raíces se tiñeron usando la técnica de Phillips y Hayman (1970), utilizando tinta Parker al 0,25.

Se empleó el método de Brundrett *et al.* (1996) para evaluar la colonización micorrícica. Esta técnica consistió en teñir 30 segmentos de raíces con 1 cm de longitud y colocarlos verticalmente en portaobjetos, dividiéndolos en tres sectores de observación en un microscopio a 10X.

Asimismo, se utilizó la fórmula siguiente para analizar la colonización de micorrizas:

$$\% \text{ CM} = (n/N) \times 100$$

La fórmula para calcular el porcentaje de colonización micorrícica (% CM) consistió en dividir el número total de segmentos evaluados (N) entre el número total de zonas en las que se detectaron estructuras micorrícicas (n) y se multiplicó por 100 (Ver Anexo 7).

### **Estimación de COS**

Se estimó el COS por la técnica de Walkley, Black (1934) en el Instituto de Cultivos Tropicales. Asimismo, se realizó el método del cilindro para extraer la densidad aparente (DA) y poder calcular el carbono de los suelos

$$\text{COS} = P_s * D_a * C_O$$

Para determinar la DA se empleó un cilindro de 5,3 cm de diámetro y 5 cm indicados por Blake y Hartge. (1986) el análisis se realizó en  $\text{g cm}^{-3}$ , mediante la fórmula:

$$D_A: W_d/V$$

### **Análisis de materia orgánica y fósforo**

Los análisis de caracterización de suelos se realizaron en el ICT, cuyo fin fue analizar los contenidos de carbono, materia orgánica, densidad aparente, humedad del suelo y características físico químicas (Método Walkley -black).

### **Estimación de COS**

Se estimó el COS por la técnica de Walkley, Black (1934) en el Instituto de Cultivos Tropicales. Asimismo, se realizó el método del cilindro para extraer la densidad aparente (DA) y poder calcular el carbono de los suelos (Ver Anexo 8).

$$COS = P_s * D_a * CO$$

Para determinar la DA se empleó un cilindro de 5.3 cm de diámetro y 5 cm indicados por Blake y Hartge. (1986) el análisis se realizó en  $g\ cm^{-3}$ , mediante la fórmula:

$$DA: Wd/V$$

### **Método de Análisis de datos**

Los análisis fueron medidos por el software R Studio para tener mayor precisión y calidad científica. Se aplicó la normalidad de datos por la prueba de Shapiro-Wilk ( $P < 0.05$ ). Al mismo tiempo pruebas de ANOVA y Tukey para determinar la significancia entre variables, a un nivel de 0.05. Asimismo, se aplicó la correlación de Pearson entre las variables a medirse.

### **Aspectos éticos**

Este estudio estuvo respaldado por publicaciones científicas de los cuartiles 1, 2 y 3 indexadas en SCOPUS y considerando las NORMAS ISO y la estructura del reglamento de la Universidad César Vallejo y RVI N°081-2024-VI-UCV - articulación líneas investigación UCV – RSU.

### III. RESULTADOS

En el presente apartado se expone un análisis de la información obtenida a partir de las muestras de suelos colectadas en sistemas de manejo de cacao.

#### **Medir la relación de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales con cacao en el contenido de carbono en Lamas, San Martín**

##### **Carbono orgánico en suelos**

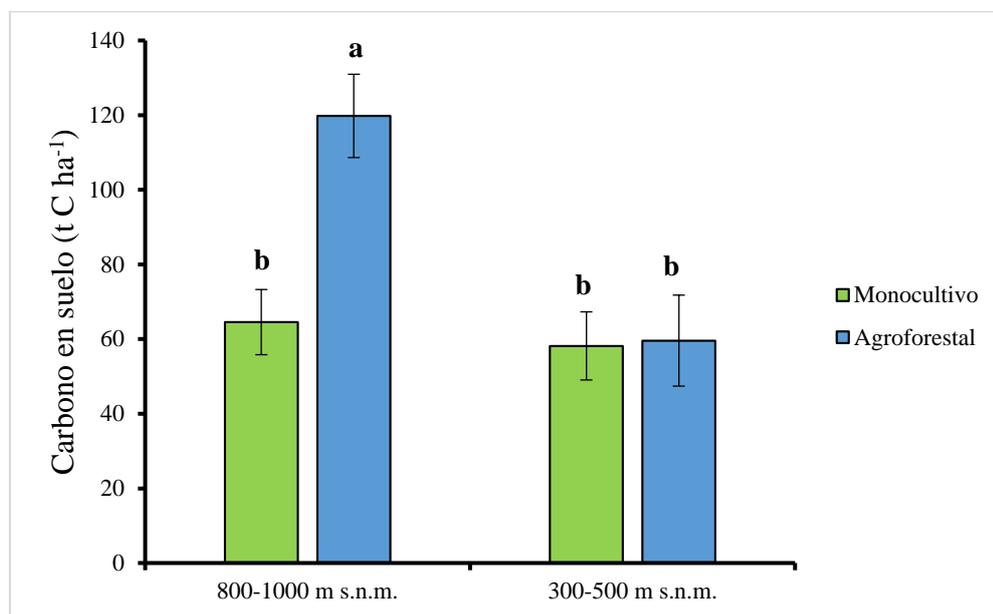
La Tabla 1 muestra el Análisis de Varianza (ANOVA) para el contenido de C (%) en los cuatro tratamientos evaluados. Datos transformados a función arco seno (X). Los resultados muestran diferencias significativas en los factores evaluados (factor A: cultivo, factor B: altitud y la interacción de ambos), lo que significa que el indicador evaluado influyó sobre los tratamientos.

Tabla 1. Análisis de varianza para el contenido de carbono

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	3.58	3	1.19	40.3	<0.0001**
Factor A: Cultivo	1.04	1	1.04	34.99	0.0004**
Factor B: Altitud	1.58	1	1.58	53.35	0.0001**
Cultivo*Altitud	0.96	1	0.96	32.55	0.0005**
Error	0.24	8	0.03		
Total	3.82	11			
**: Altamente Significativo		*: Significativo		N. S: No Significativo	
R <sup>2</sup> : 94%			C. V: 9%		

Los datos presentados en la Figura 8 muestran los resultados de la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) para el carbono orgánico en suelos de ecosistemas con cacao, donde el mayor contenido se presentó en suelos con altitudes entre 800 a 1 000 msnm con  $119.79 \text{ t C ha}^{-1}$ , existiendo diferencias significativas entre ecosistemas de manejo (agroforestal y monocultivo). En tanto, el contenido de carbono en la

altitud entre 300-500msnm no mostró diferencias significativas para el sistema agroforestal y monocultivo.



**Figura 1.** Contenido de carbono orgánico en suelos de ecosistemas con cacao

*Nota.* En la barra se muestra la desviación estándar. Promedios con distintas letras en cada barra, indica diferencias estadísticamente significativas en el carbono según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

### Densidad aparente en suelos

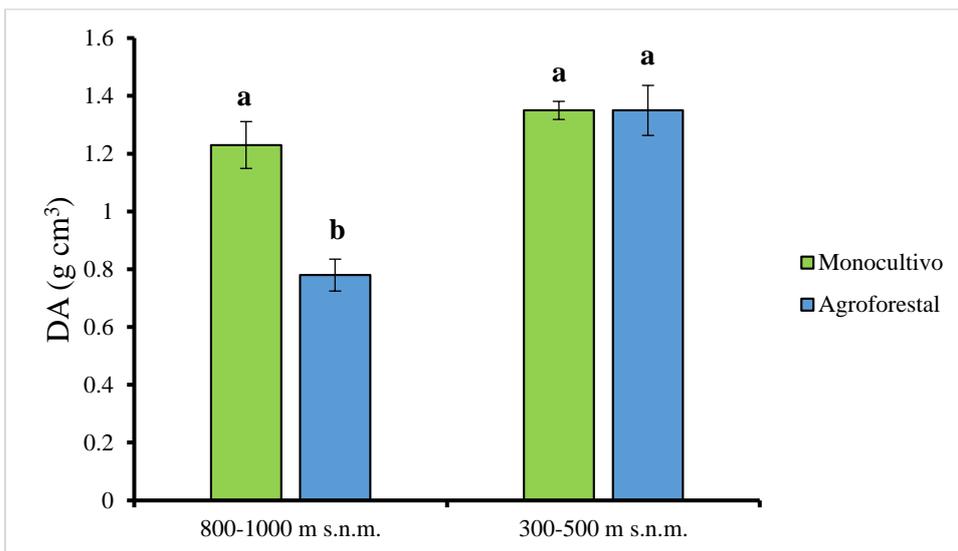
La Tabla 2 muestra el Análisis de Varianza (ANOVA) para el contenido de DA en los cuatro tratamientos evaluados. Datos transformados a función raíz cuadrada (X). Los resultados muestran diferencias significativas en los factores evaluados (factor A: cultivo, factor B: altitud y la interacción de ambos), lo que significa que el indicador evaluado influyó sobre los tratamientos.

Tabla 2. Análisis de varianza para el contenido de DA.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.16	3	0.05	56.42	<0.0001**
Factor A: Cultivo	0.04	1	0.04	41.63	0.0002**
Factor B: Altitud	0.08	1	0.08	87.28	<0.0001**
Cultivo*Altitud	0.04	1	0.04	40.35	0.0002**

Error	0.24	8	0.03		
Total	3.82	11			
**: Altamente Significativo		*: Significativo		N. S: No Significativo	
R <sup>2</sup> : 95%			C. V: 3%		

Los datos presentados en la Figura 9 muestran los resultados de la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ) para el carbono orgánico en suelos de ecosistemas con cacao, donde el mayor contenido se presentó en suelos con altitudes entre 300 a 500 msnm con  $1.35 \text{ g cm}^{-3}$ , sin diferencias significativas entre ecosistemas de manejo (agroforestal y monocultivo). En tanto, el sistema de monocultivo presentó mayor densidad aparente que el monocultivo en la altitud de 800 a 1 000 msnm; mostrando diferencias significativas entre sistemas de manejo de cacao.



**Figura 2.** Contenido de densidad aparente en suelos de ecosistemas con cacao

*Nota.* En la barra se muestra la desviación estándar. Promedios con distintas letras en cada barra, indica diferencias estadísticamente significativas en la densidad aparente del suelo, según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

**Explicar la relación de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en el estado nutricional del suelo (MO, P y humedad) en Lamas**

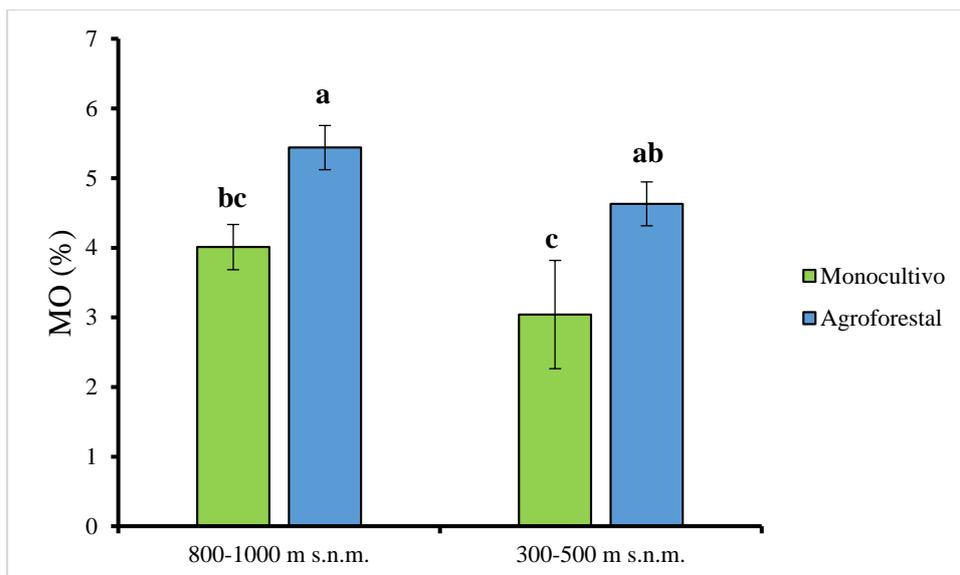
**Materia orgánica en suelos**

La Tabla 3 muestra el Análisis de Varianza (ANOVA) para el contenido de materia orgánica ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) en los cuatro tratamientos evaluados. Datos transformados a función raíz cuadrada ( $X$ ). Los resultados muestran diferencias significativas en los factores evaluados (factor A: cultivo, factor B: altitud) sin embargo, la interacción de ambos fue no significativo, lo que significa que el indicador evaluado influyó sobre los tratamientos de manera independiente.

Tabla 3. Análisis de varianza para el contenido de MO.

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	0.58	3	0.19	11.7	0.0027**
Factor A: Cultivo	0.42	1	0.42	25.55	0.001**
Factor B: Altitud	0.15	1	0.15	9.21	0.0162**
Cultivo*Altitud	0.01	1	0.01	0.33	0.5816N. S
Error	0.13	8	0.02		
Total	0.71	11			
**: Altamente Significativo		*: Significativo		N. S: No Significativo	
R <sup>2</sup> : 81%			C. V: 6%		

Los datos presentados en la Figura 10 muestran los resultados de la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ) para materia orgánica en suelos de ecosistemas con cacao, donde el mayor contenido se presentó en suelos con altitudes entre 800 a 1 000 msnm con 5.44%, existiendo diferencias significativas entre ecosistemas de manejo (agroforestal y monocultivo). En tanto, materia orgánica en la altitud entre 300-500 msnm también mostró diferencias significativas en ambos sistemas.



**Figura 3.** Contenido de materia orgánica en suelos de ecosistemas con cacao

*Nota.* En la barra se muestra la desviación estándar. Promedios con distintas letras en cada barra, indica diferencias estadísticamente significativas en la materia orgánica del suelo, según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

### Fósforo (P) en suelos

La Tabla 4 muestra el Análisis de Varianza (ANOVA) para el contenido de P (ppm) en los cuatro tratamientos evaluados. Datos transformados a función raíz cuadrada (X). Los resultados muestran sin diferencias significativas en ninguno de los factores evaluados (factor A: cultivo, factor B: altitud e interacción de ambos), lo que significa que el indicador evaluado no influyó sobre los tratamientos.

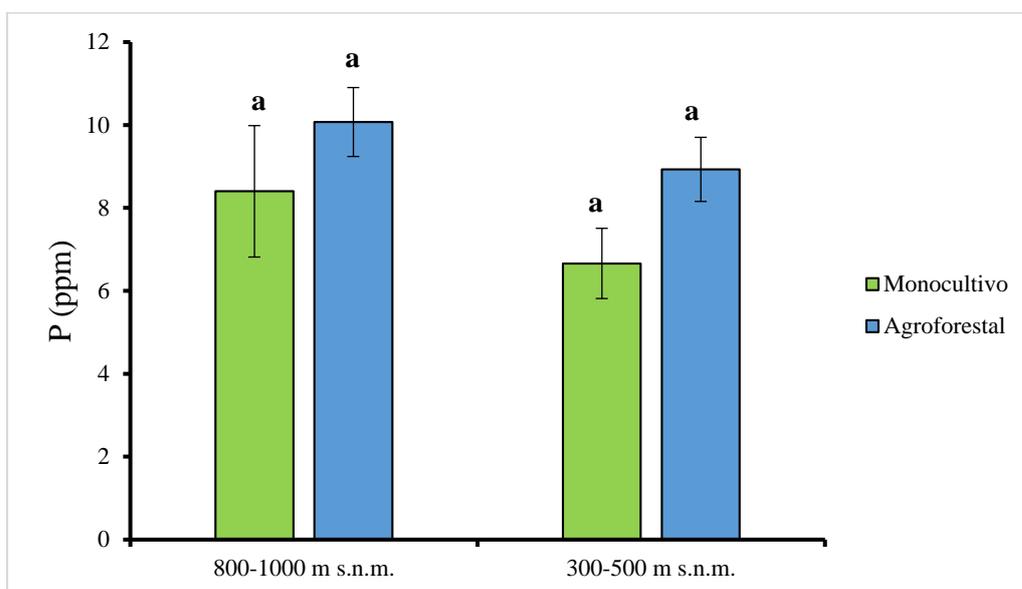
Tabla 4. Análisis de varianza para el contenido de P (ppm).

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.63	3	0.21	0.4	0.7601N. S
Factor A: Cultivo	0.49	1	0.49	0.92	0.3652N. S
Factor B: Altitud	0.14	1	0.14	0.26	0.6236N. S
Cultivo*Altitud	0.002	1	0.002	0.003	0.9531N. S
Error	4.25	8	0.53		
Total	4.88	11			
**: Altamente Significativo		*: Significativo		N. S: No Significativo	

R<sup>2</sup>: 73%

C. V: 25%

Los datos presentados en la Figura 11 muestran los resultados de la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ) para el carbono orgánico en suelos de ecosistemas con cacao, donde el mayor contenido se presentó en suelos con altitudes entre 800 a 1 000 msnm con 10.67 ppm, no existiendo diferencias significativas entre ecosistemas de manejo (agroforestal y monocultivo). En tanto, la altitud entre 300-500 msnm tampoco mostró diferencias significativas en ambos sistemas.



**Figura 4.** Contenido de fósforo en suelos de ecosistemas con cacao

Nota. En la barra se muestra la desviación estándar. Promedios con distintas letras en cada barra, indica diferencias estadísticamente significativas en el contenido de fósforo, según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

### pH en suelos

La Tabla 5 muestra el Análisis de Varianza (ANOVA) para el contenido de pH en los cuatro tratamientos evaluados. Datos transformados a función raíz cuadrada (X). Los resultados muestran diferencias significativas en el factor A: cultivo, sin embargo, en el factor B: altitud e interacción de ambos, no hay diferencia estadística, lo que significa que el indicador evaluado solo influenció el primer factor.

Tabla 5. Análisis de varianza para el contenido de pH.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.09	3	0.03	4.25	0.0451*
Factor A: Cultivo	0.05	1	0.05	6.62	0.0329*
Factor B: Altitud	0.02	1	0.02	2.09	0.1861N. S
Cultivo*Altitud	0.03	1	0.03	4.04	0.0793N. S
Error	0.06	8	0.01		
Total	0.15	11			
**: Altamente Significativo		*: Significativo		N. S: No Significativo	
R <sup>2</sup> : 61%			C. V: 3%		

Los datos presentados en la Figura 12 muestran los resultados de la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ) para el pH en suelos de ecosistemas con cacao, donde el mayor contenido se presentó en suelos con altitudes entre 300-500 msnm con 7.02, existiendo diferencias significativas entre ecosistemas de manejo (agroforestal y monocultivo). En tanto, la altitud entre 800-1 000 msnm no mostró diferencias significativas en ambos sistemas.

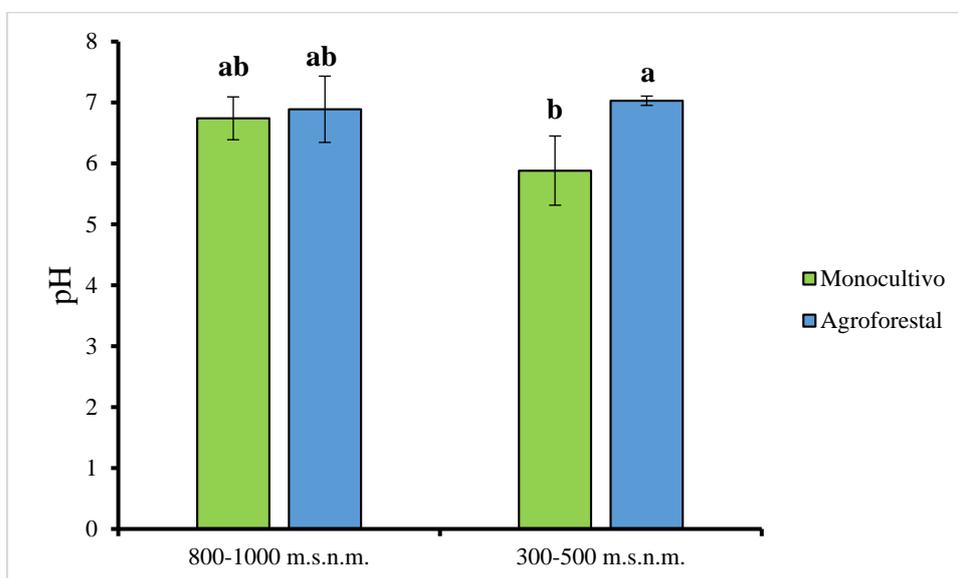


Figura 5. pH en suelos de ecosistemas con cacao

Nota. En la barra se muestra la desviación estándar. Promedios con distintas letras en cada barra, indica diferencias estadísticamente significativas en el pH, según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

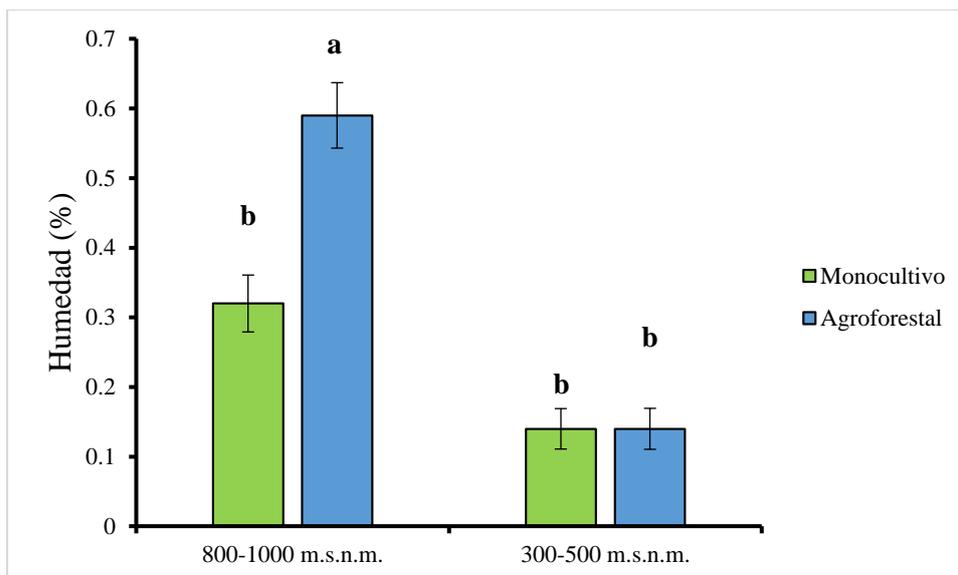
## Humedad (%) en suelos

La Tabla 6 muestra el Análisis de Varianza (ANOVA) para el contenido de humedad en los cuatro tratamientos evaluados. Datos transformados a función arco seno (X). Los resultados muestran diferencias significativas en los factores evaluados (factor A: cultivo, factor B: altitud y la interacción de ambos), lo que significa que el indicador evaluado influyó sobre los tratamientos.

Tabla 6. Análisis de varianza para el contenido de humedad (%).

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	0.31	3	0.1	20.45	0.0004**
Factor A: Cultivo	0.03	1	0.03	5.71	0.0439*
Factor B: Altitud	0.25	1	0.25	49.94	0.0001**
Cultivo*Altitud	0.03	1	0.03	5.71	0.0439*
Error	0.04	8	0.01		
Total	0.35	11			
**: Altamente Significativo		*: Significativo		N. S: No Significativo	
R <sup>2</sup> : 88%			C. V: 14%		

Los datos presentados en la Figura 13 muestran los resultados de la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ) para la humedad en suelos de ecosistemas con cacao, donde el mayor contenido se presentó en suelos con altitudes entre 800 a 1 000 msnm con 0.59%, existiendo diferencias significativas entre ecosistemas de manejo (agroforestal y monocultivo). En tanto, la altitud entre 300-500 msnm no mostró diferencias significativas en ambos sistemas.



**Figura 6.** Humedad en suelos de ecosistemas con cacao

Nota. En la barra se muestra la desviación estándar. Promedios con distintas letras en cada barra, indica diferencias estadísticamente significativas en la humedad, según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

### **Existe diferencias significativas en los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en la colonización micorrícica y contenido de lombrices en Lamas, San Martín**

#### **Colonización micorrícica (%)**

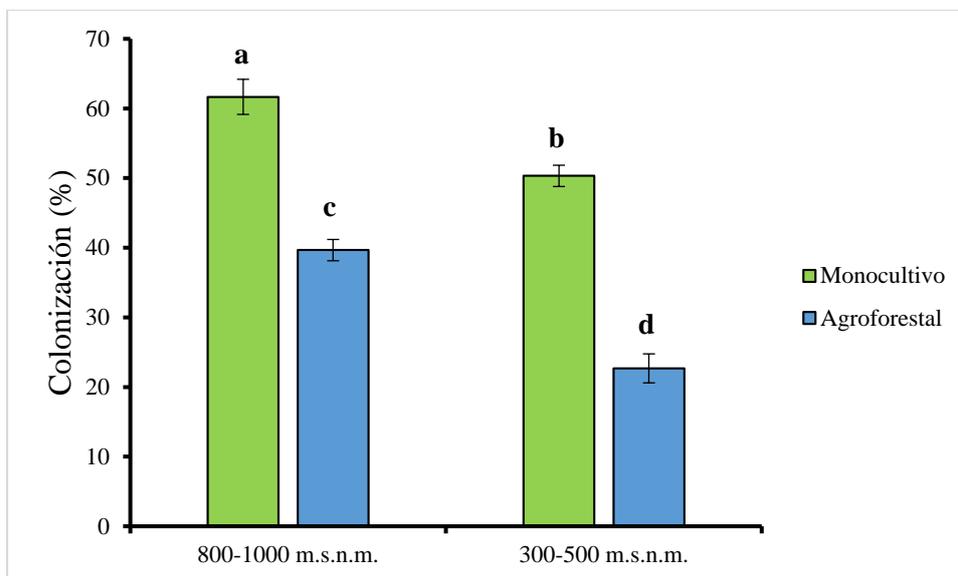
La Tabla 7 muestra el Análisis de Varianza (ANOVA) para el contenido de pH en los cuatro tratamientos evaluados. Datos transformados a función arco seno (X). Los resultados muestran diferencias significativas en los factores evaluados (Factor A: cultivo, factor B: altitud e interacción de ambos), lo que significa que el indicador evaluado influyó sobre todos los tratamientos.

Tabla 7. Análisis de varianza para el porcentaje de colonización micorrícica.

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	15.77	3	5.26	212.23	<0.0001**
Factor A: Cultivo	11.35	1	11.35	458.36	<0.0001**
Factor B: Altitud	3.96	1	3.96	159.81	<0.0001**

Cultivo*Altitud	0.46	1	0.46	18.52	0.0026**
Error	0.2	8	0.02		
Total	15.97	11			
**: Altamente Significativo		*: Significativo		N. S: No Significativo	
R <sup>2</sup> : 99%			C. V: 2%		

Los datos presentados en la Figura 14 muestran los resultados de la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) para la colonización en suelos de ecosistemas con cacao, donde el mayor contenido se presentó en suelos con altitudes entre 800 a 1 000 msnm con 61.66%, existiendo diferencias significativas entre ecosistemas de manejo (agroforestal y monocultivo). En tanto, la altitud entre 300-500 msnm también mostró diferencias significativas en ambos sistemas.



**Figura 7.** Colonización micorrícica en suelos de ecosistemas con cacao

Nota. En la barra se muestra la desviación estándar. Promedios con distintas letras en cada barra, indica diferencias estadísticamente significativas en la colonización micorrícica, según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

### Lombrices en suelos (m<sup>2</sup>)

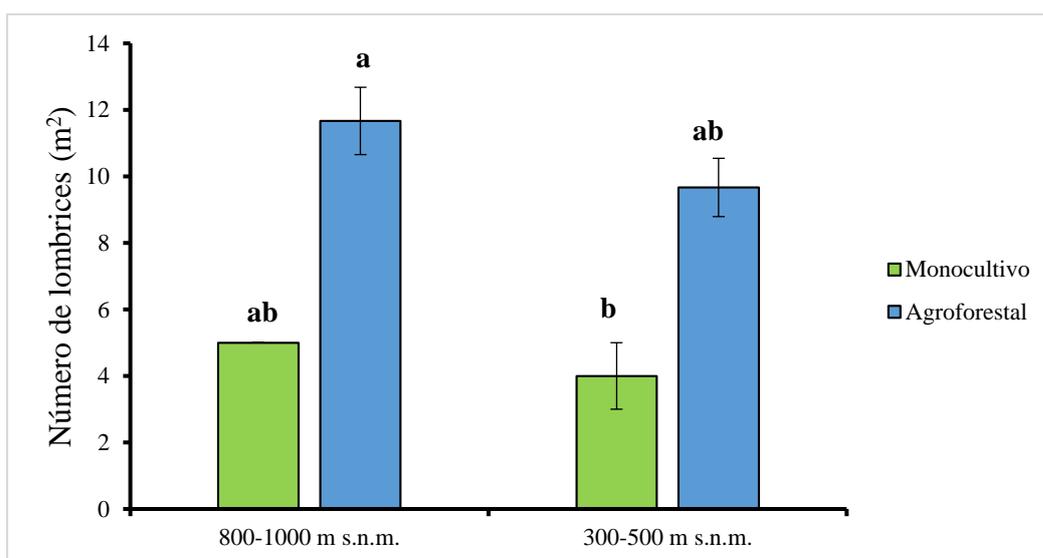
La Tabla 8 muestra el Análisis de Varianza (ANOVA) para el contenido de lombrices en el suelo (m<sup>2</sup>) en los cuatro tratamientos evaluados. Datos transformados a

función raíz cuadrada ( $X$ ). Los resultados muestran diferencias significativas en los factores evaluados (Factor A: cultivo, factor B: altitud e interacción de ambos), lo que significa que el indicador evaluado influyó sobre todos los tratamientos.

Tabla 8. Análisis de varianza para el contenido de lombrices en el suelo ( $m^2$ ).

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3.96	3	1.32	7.04	0.0124*
Factor A: Cultivo	3.73	1	3.73	19.87	0.0021**
Factor B: Altitud	0.23	1	0.23	1.24	0.2985N. S
Cultivo*Altitud	0.003	1	0.003	0.02	0.9035N. S
Error	1.5	8	0.19		
Total	5.46	11			
**: Altamente Significativo		*: Significativo		N. S: No Significativo	
R <sup>2</sup> : 73%			C. V: 16%		

Los datos presentados en la Figura 13 muestran los resultados de la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) para el número de lombrices en suelos de ecosistemas con cacao, donde el mayor número se presentó en suelos con altitudes entre 800 a 1 000 msnm con 12 lombrices existiendo diferencias significativas entre ecosistemas de manejo (agroforestal y monocultivo). En tanto, la altitud entre 300-500 msnm también mostró diferencias significativas en ambos sistemas.



## **Figura 8. Número de lombrices en suelos de ecosistemas con cacao**

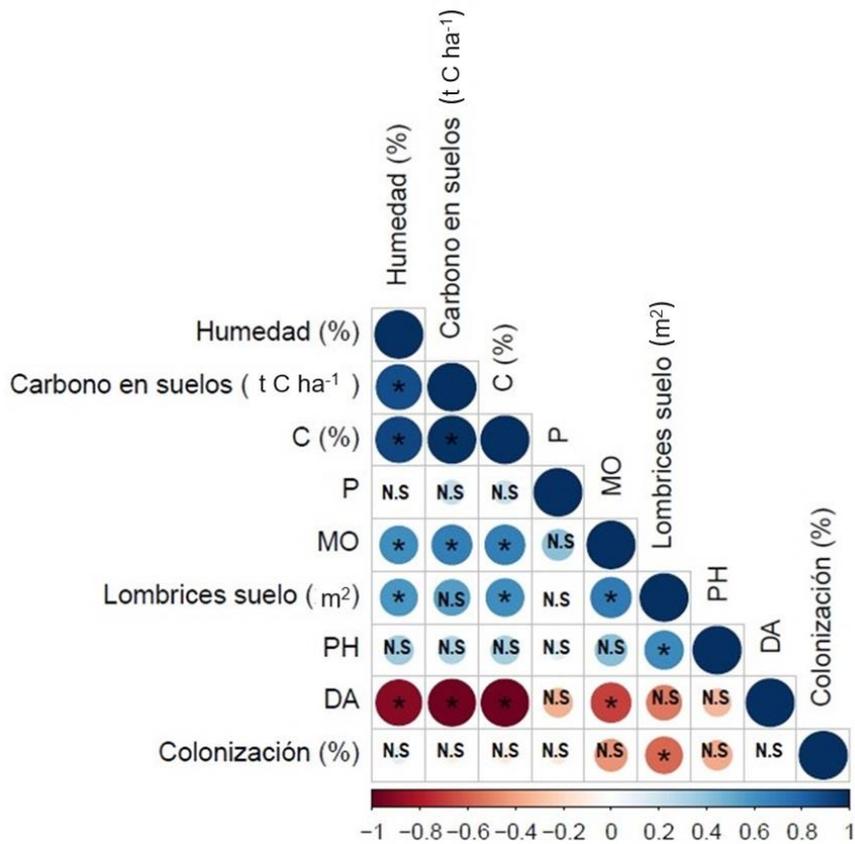
Nota. En la barra se muestra la desviación estándar. Promedios con distintas letras en cada barra, indica diferencias estadísticamente significativas en número de lombrices, según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

## **Correlación de indicadores en ecosistemas de cacao en la provincia de Lamas**

Los datos presentados en la Figura 14 presentan un análisis de correlación de Pearson que relaciona los parámetros estudiados.

Los resultados revelan que existieron correlación significativa entre siete pares de variables con correlación alta:

- Carbono con densidad aparente y materia orgánica en suelos: Correlación positiva alta que implicaron que cuando aumenta el carbono, aumenta la densidad aparente y materia orgánica en suelos.
- Materia orgánica con número de lombrices y densidad aparente: Correlación positiva alta que implicaron que cuando aumenta la MO, aumenta la DA y número de lombrices.



**Figura 9.** Principales variables estudiadas en la investigación en suelos de ecosistemas con cacao.

*Nota.* Análisis de correlación de Pearson de los parámetros evaluados en los suelos de ecosistemas con cacao en la provincia de Lamas, San Martín. Valores de significancia \* ( $p < 0.05$ ) y N. S, No Significativo.

#### IV. DISCUSIÓN

##### **Medir la relación de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales con cacao en el contenido de carbono en Lamas, San Martín**

Se encontró mayor contenido de carbono en suelos (COS) a niveles altitudinales mayores y con sistemas agroforestales; en tanto el COS medio más alto se encontró en altitudes altas ( $169.6 \pm 76.9 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y el COS medio más bajo en altitudes bajas ( $82.5 \pm 48.6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (de la Cruz-Amo et al., 2020). Se ha sugerido que las altitudes de las reservas totales de carbono es el resultado de cambios en las temperaturas atmosféricas predominantes, que desencadenarían tendencias opuestas en COS, igualando así las reservas totales de carbono a lo largo del gradiente altitudinal (Phillips et al., 2019). Nuestros análisis sugieren que, en altitudes bajas, las temperaturas más cálidas pueden promover el ciclo de nutrientes y el crecimiento de las plantas que contribuyen a resultado valores bajos de COS.

Un estudio realizado por Vallejos-Torres et al. (2023) en bosque secundario mostraron un stock promedio de COS de  $225.28 \text{ t ha}^{-1}$  a una altitud de 1 332 msnm, mientras que los suelos con menor contenido de C se ubicaron bajo monocultivo de café sin árboles de sombra, con un promedio de  $28.02 \text{ t ha}^{-1}$  a una altitud de 772 m snm. Muchos autores han presentado patrones similares, como Okello et al. (2022), quienes revelaron que, a lo largo del gradiente altitudinal, el C orgánico del suelo aumentó seis veces desde 2.6% a 1 250-1 300 msnm hasta 16.0% a 2700-3000 msnm. Asimismo, Dieleman et al. (2013) encontraron que el COS en los bosques tropicales variaba de manera predecible con la altitud, oscilando entre 4.8 y  $19.4 \text{ kg C m}^{-2}$  y aumentando en  $5.1 \text{ kg C m}^{-2}$  por cada 1000 m de aumento de altitud.

Además, se ha demostrado que el COS y la estabilidad de los agregados del suelo lábiles y recalcitrantes aumentaron con la altitud (Abalori et al., 2022). Tashi et al. (2016) indicaron que el contenido de C estaba igualmente correlacionado con la altitud, siendo la temperatura aparentemente el factor determinante del contenido

de C del suelo a lo largo del gradiente altitudinal. La acumulación de COS a lo largo del gradiente altitudinal se produce debido a actividades de descomposición más lentas en condiciones más frías en elevaciones más altas en comparación con elevaciones más bajas lo que resulta en una acumulación de materia orgánica (Spehn et al., 2012).

Contrariamente al carbono, micorrizas y MO, nuestro estudio presentó menos densidad aparente del suelo en sistemas agroforestales a mayor nivel altitudinal. Normalmente, los suelos con mayor contenido orgánico tienen menor densidad aparente, aunque la densidad aparente de los horizontes orgánicos también depende del grado de descomposición, la composición de los residuos vegetales en el suelo y la proporción de vacíos (de la Cruz-Amo et al., 2020). La densidad aparente del suelo (BD) tiene un impacto negativo sobre el carbono orgánico del suelo, especialmente en presencia de vegetación (Yao et al., 2023).

Un estudio anterior en nuestro sitio encontró una mayor biomasa de raíces en rodales de hoja perenne que en rodales de hoja caduca (Archambault et al., 2019), lo que puede explicar por qué los suelos eran menos densos debajo de las coníferas. Otros estudios también han identificado grandes cambios en la densidad aparente del suelo y la estructura del suelo entre rodales de diferentes especies de árboles (Morazzo et al., 2021). Sin embargo, nuestros resultados muestran que incluso los árboles jóvenes pueden alterar la densidad aparente del suelo y el contenido de C (Waring et al., 2022).

### **Explicar la relación de los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en el estado nutricional del suelo (MO, P y humedad) en Lamas**

El mayor contenido de materia orgánica se encontró en los sistemas agroforestales, seguido del sistema de monocultivo; ambos en la altitud de 800 a 1 000 msnm. En tanto, el P no mostro diferencias significativas tanto en los sistemas como en las altitudes; mientras que el pH se mostró similar tanto para el sistema agroforestal como monocultivo en el mayor nivel altitudinal; en tanto,

Muchane et al. (2020) revisaron el potencial de alivio de la acidez de los sistemas agroforestales y concluyeron que, en general, las prácticas agroforestales elevaron el pH del suelo en comparación con el monocultivo, con diferencias menores según el tipo de suelo. La mejora del suelo en los sistemas agroforestales está relacionada con la fijación biológica de nitrógeno, el reciclaje de nutrientes de las capas más profundas a la superficie del suelo, la acumulación de materia orgánica del suelo (MOS) de las partes de las plantas aéreas y subterráneas, el P y el aumento de la actividad microbiana del suelo y la mejora de la actividad de los hongos micorrízicos arbusculares (Dollinger y José, 2018).

La mejora del suelo bajo árboles y sistemas agroforestales está relacionada en gran parte con aumentos de materia orgánica, ya sea en forma de hojarasca superficial o carbono del suelo. Por lo tanto, además de su papel en el secuestro de carbono en la superficie, los sistemas agroforestales también tienen un gran potencial para aumentar las reservas de carbono en el suelo (Rachel et al., 2012).

Se ha observado que, además de las propiedades físicas y químicas del suelo de los sitios estudiados, los factores geográficos/ambientales también afectan las reservas de COS, como la topografía, el calentamiento y los diversos tipos de cubierta forestal evaluados (Zhang et al., 2018). En nuestro estudio, los suelos tenían cantidades particularmente grandes de MOS asociada con la fracción de suelo más gruesa. En nuestro estudio hay un aumento en el flujo de COS con mayor cobertura vegetal; a su vez por el aumento de la precipitación y las condiciones de temperatura que aceleran la mineralización de C (Novara et al., 2018).

El mayor contenido de humedad encontrado en un sistema agroforestal (SAF) de cacao entre 800 a 1 000 msnm probablemente se deba a diversidad de árboles mayores que tienen la capacidad de retener agua por limitada infiltración y emisión directa de los rayos solares; tal como lo indican Rojas-Molina et al. (2017) y Marconi y Armengot, (2020); quienes demostraron que en los sistemas agroforestales de cacao, las copas de los árboles forestales pueden amortiguar las condiciones ambientales, reduciendo la temperatura del aire, ayudando a retener la humedad y

contribuyendo al mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas del suelo, además de impactar el mantenimiento de la biodiversidad.

Otro factor importante en los SAF es la acumulación de materia orgánica en los suelos (MOS), a su vez, desempeña un papel esencial en múltiples funciones de los suelos fértiles, como la capacidad de retención de humedad y nutrientes, (Oldfield et al., 2019). La vegetación promueve el crecimiento de las raíces, y las raíces secretan ácidos orgánicos, lo que mejora la capacidad de infiltración del agua del suelo, mejorando así aún más la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. Además, el aumento del COS y el suministro de nutrientes mejora la conectividad de los poros del suelo y permite que el suelo tenga mejores capacidades de retención y almacenamiento de agua (Naveed et al., 2014). En tanto, los cambios en la estructura física del suelo y los nutrientes del suelo causados por el aumento en la ingesta de COS en los SAF tuvieron efectos adicionales sobre el contenido de agua del suelo y la capacidad de retención de agua.

### **Existe diferencias significativas en los ecosistemas con cacao y niveles altitudinales en la colonización micorrícica y contenido de lombrices en Lamas, San Martín**

La asociación simbiótica de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), puede tener un impacto positivo en la estructura del suelo y, por lo tanto, ayuda a detener la erosión del suelo. En tanto, las raíces de las plantas en sistemas agroforestales (SAF) y el régimen de humedad del suelo en la rizosfera están muy influenciados por la asociación de los HMA con las raíces de las plantas (Jinger et al., 2023).

Los sistemas de cultivo de cacao asociados a vegetales mostraron los mayores porcentajes de colonización micorrícica de raíces. Esto podría deberse a que las coberturas vegetales favorecen un mayor sistema radicular y proporcionando mejores condiciones de hábitat para las esporas de HMA tal como se presentó en nuestro estudio. La mayor colonización de HMA presentados en nuestro estudio (25-45% de colonización) se observó en monocultivo de cacao; probablemente por

la presencia de malezas y gramíneas en dicho sistema; Encontrándose valores inferiores a lo encontrado (64.99%) por Vallejos-Torres et al. (2023). Asimismo, la simbiosis entre las plantas con raíces pivotantes y los HMA tenía más probabilidades de secuestrar C en el suelo. En conjunto, nuestros resultados sugieren que la inoculación de HMA es un enfoque prometedor para el secuestro de C en el suelo (Tao et al., 2024).

Los estudios han demostrado que la adaptación de las comunidades microbianas a las condiciones locales puede tener un papel potencial en la configuración de la composición de las comunidades vegetales. Por lo tanto, la adaptabilidad del HMA a las condiciones ambientales puede mejorar su capacidad de simbiosis con las raíces de las plantas. Además, nuestros resultados mostraron que la altitud tuvo un efecto significativo en la colonización de HMA. Esto es inconsistente con la conclusión a la que llegaron Li et al. (2020) quienes indicaron que la colonización de raíces fue mayor en altitudes altas. En tanto, (Zhang et al., 2021) encontraron que la colonización más alta se produjo a 1 170 m.s.n.m. y la más baja a 660 msnm.

El mayor número de lombrices encontrados en los sistemas agroforestales entre en la altitud entre 800 a 1 000 msnm obedece a la cantidad de materia orgánica vertidos por los árboles al suelo. Es conocido que las lombrices de tierra pueden aumentar el contenido de materia orgánica del suelo enterrando materiales descomponibles debajo del suelo para una mayor degradación (Hoeffner et al., 2021). Además, el excremento de lombrices puede aumentar indirectamente la disponibilidad de nitrógeno (N) y fósforo (P) al modificar la abundancia de microbios del suelo (Vos et al., 2019) que son responsables de la mineralización de N y P unidos orgánicamente. en el suelo.

Las lombrices de tierra pueden alterar en gran medida la estructura y la fertilidad del suelo para el crecimiento de las plantas (Mudrák y Frouz, 2018). El movimiento de las lombrices de tierra puede crear canales que aumentan la porosidad y la aireación del suelo. Sin embargo, en suelos cultivados, las poblaciones de lombrices suelen ser menos numerosas en comparación con los sistemas poco perturbados, como resultado de los efectos negativos de las prácticas agrícolas en

su supervivencia. La fauna del suelo, especialmente las lombrices de tierra, puede estimular notablemente las emisiones de dióxido de carbono (Gong et al., 2022).

## V. CONCLUSIONES

1. Nuestro estudio demostró que las plantaciones de cacao secuestrarían más carbono si se intercalaran con árboles de sombra como sistema agroforestal. La cobertura vegetal con especies de árboles tuvo un impacto positivo en las reservas de C orgánico (COS) del suelo, la humedad, colonización de micorrizas, materia orgánica y humedad del suelo.
2. Asimismo, la mayor altitud (800-1 000 msnm) presentó mejores resultados casi en todas las variables indicadas; considerándose que la temperatura aparentemente es un factor determinante del contenido de COS a lo largo del gradiente altitudinal, debido a actividades de descomposición más lentas.
3. En este estudio, el mayor stock de COS se encontró en cacao con sistemas agroforestales ubicado entre 800-1000 msnm; seguido por el sistema de cacao como monocultivo en la misma altitud y finalmente los sistemas de cacao agroforestal y monocultivo entre 300-500 msnm.
4. En general, encontramos que el cultivo de cacao con árboles de sombra contribuyó con las mayores reservas de COS debido a la protección física de la MOS inducida por la agregación de partículas finas, como arcilla y limo.

## VI. RECOMENDACIONES

1. Realizar una caracterización de los árboles de sombra asociado a los cultivares de cacao; de tal manera se pueda determinar con precisión el impacto de cada árbol en el almacenamiento de carbono, la calidad de los suelos y el contenido de humedad.
2. Realizar estudios de carbono orgánico en suelos en mayores profundidades de tal manera nos permita determinar la presencia final de carbono en el horizonte; toda vez que para estimar con precisión las reservas de COS, se necesita más investigación sobre el carbono y su correlación con los horizontes del suelo.
3. Ampliar las investigaciones en diferentes niveles altitudinales a lo largo del desarrollo del cultivo desde los 0 msnm hasta los 1 000 msnm; estimando el carbono en todos los compartimentos como carbono aéreo, carbono subterráneo, carbono en la hojarasca, en la biomasa muerta, en la biomasa herbácea, etc.
4. Analizar los mismos indicadores en función a la correlación de la estacionalidad de las precipitaciones; esto puede explicar en parte estas diferencias, ya que la ocurrencia de períodos más secos en el año aumentaría las tasas de mineralización, particularmente en altitudes más altas.

## REFERENCIAS

- ABALORI, TA, et al., 2022. Variabilidad espacial de las fracciones de carbono orgánico del suelo y estabilidad agregada a lo largo de un gradiente de elevación en las praderas alpinas de las montañas Qilian, China. *Revista Chilena de Investigaciones Agropecuarias* 82:52-64. doi:10.4067/S0718-58392022000100052.
- ARMENGOT, L., et al., 2016. Los sistemas agroforestales de cacao tienen un mayor retorno de la mano de obra en comparación con los monocultivos a pleno sol. *Agronomía para el Desarrollo Sostenible* 36: 1-10. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13593-016-0406-6>
- ARMENGOT L, et al., 2021. Nexo alimentos-energía-agua de diferentes sistemas de producción de cacao desde un enfoque de ACV. *J Clean Prod* 304:126941. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126941>
- ASITOAKOR, B.K et al., 2024. Las especies de árboles de sombra importan: gestión agroforestal sostenible del cacao. En: Olwig, MF, Skovmand Bosselmann, A., Owusu, K. (eds) La agroforestería como adaptación al cambio climático. *Palgrave Macmillan, Cham*. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-45635-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-45635-0_3)
- ATO, M, LÓPEZ, J y BENAVENTE, A, 2013. Un sistema de clasificación de los diseños de investigación en psicología. *Anales de psicología*, 29(3), 1038-1059. <https://dx.doi.org/10.6018/analesps.29.3.178511>
- BENNETT, R.E, et al., 2021. Impacto de la intensificación agrícola del cacao en la diversidad de aves y la composición de la comunidad. *Conserva Biol* 36:13779. <https://doi.org/10.1111/cobi.13779>
- BLAKE, G.R y HARTGE, K, 1986. Bulk density. In Klute, A. (ed.) *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA. 363-375. [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=498675](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=498675)
- BRUNDETT, M, et al., 1996. Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. Australian Centre for International Agricultural Research. Doi: 10.13140/2.1.4880.5444
- CASTILLO-VALDEZ, Ximena, et al., 2021. Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39, e698. Epub 05 de abril de 2021. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698>
- CASTLE, S.E, et al., 2022. Evidencia de los impactos de la agrosilvicultura en los servicios ecosistémicos y el bienestar humano en países de altos ingresos: un mapa sistemático. *Reinar. Evidente*. 11, 1–27. doi: 10.1186/s13750-022-00260-4

DAWOE, E, et al., 2016. Diversidad de árboles de sombra y reservas de carbono sobre el suelo en sistemas agroforestales de *Theobroma cacao*. implicaciones para la implementación de REDD+ en un paisaje de cacao en África occidental. *Gestión del equilibrio de carbono* 11, 17. <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0061-x>

DE LA CRUZ-AMO, L, et al., 2020. Trade-Offs Among Aboveground, Belowground, and Soil Organic Carbon Stocks Along Altitudinal Gradients in Andean Tropical Montane Forests. *Front. Plant Sci.* 11:106. doi: 10.3389/fpls.2020.00106

DIELEMAN, WI, et al., 2013. Las reservas de carbono del suelo varían de manera predecible con la altitud en los bosques tropicales: implicaciones para el almacenamiento de carbono en el suelo. *Geoderma* 204:59-67. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.04.005.

DOE, E.K, et al., 2023. Salud del suelo y sinergia de determinantes ecológicos de la productividad del cacao verde en diferentes ecotipos de suelo en Ghana. *Frente. Sostener. Sistema de alimentación.* 7:1169015. doi: 10.3389/fsufs.2023.1169015

DOLLINGER, J. y JOSÉ, S, 2018. Agroforestería para la salud del suelo. *Agrofor. Sistema.* 92, 213–219. doi: 10.1007/s10457-018-0223-9

FERNÁNDEZ Jeri, et al., 2022. Caracterización socioeconómica y ambiental de las fincas productoras de cacao nativo en la provincia de Bagua, Perú. *Idesia (Arica)*, 40(2), 67-75. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000200067>

GAMA-RODRIGUES, E.F, et al., 2011. Soil Carbon Sequestration in Cacao Agroforestry Systems: A Case Study from Bahia, Brazil. In: Kumar, B., Nair, P. (eds) Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems. *Advances in Agroforestry*, vol 8. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1630-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1630-8_5)

GONG, X, et al., 2022. El biocarbón del estiércol de ganado y las lombrices de tierra afectaron interactivamente las emisiones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O en suelos agrícolas y forestales: observación de una clara diferencia. *Frente. Reinar. Ciencia. Ing.* 16, 39. <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1473-8>

HERNÁNDEZ, R, FERNANDEZ, C y BAPTISTA, P, 2014. Summary for Policymakers, *Science Basis*, 53. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

HOEFFNER, K, et al., 2021. Las propiedades del suelo, el manejo de los pastizales y la diversidad del paisaje impulsan el ensamblaje de comunidades de lombrices en los pastizales templados. *Pedosfera* 31, 375–383. doi: 10.1016/S1002-0160(20)60020-0

INOCENCIO-VASQUEZ, Erika Tereza y FLORIDA-ROFNER, Nelino, 2022. Comportamiento espacial de indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo en plantación de *Theobroma cacao* en Padre Abad, Ucayali, Perú. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 25(2), e2320. Epub December 13, 2022. <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2320>

JINGER, D, 2023. Rehabilitación de tierras degradadas mediante agroforestería en India: logros, comprensión actual y perspectivas futuras. Frente. *Ecológico. Evolución*. 11:1088796. doi: 10.3389/fevo.2023.1088796

LAHIVE F, HADLEY, P y DAYMOND, A.J, 2019. Las respuestas fisiológicas del cacao al medio ambiente y las implicaciones para la resiliencia al cambio climático. Una revisión. *Agronomía para el Desarrollo Sostenible* 39: 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0552-0>

Li, F, et al., 2020. Las distribuciones verticales de raíces finas en cinco tipos de bosques subalpinos cambian con las propiedades del suelo a través de gradientes ambientales. *Suelo vegetal* 456, 129-143. doi: 10.1007/s11104-020-04706-x

LLANOS-GÓMEZ Kelvin James, et al., 2023. Identificación morfológica de hongos micorrízicos arbusculares en plantaciones de cacao en la región Amazonas, Perú. *Manglar*. 20(1): 7-14. <http://dx.doi.org/10.57188/manglar.2023.001>

MARCONI, L y ARMENGOT, L, 2020. Sistemas agroforestales complejos contra la homogeneización biótica: el caso de las plantas del estrato herbáceo de los sistemas de producción de cacao. Medio ambiente del ecosistema agrícola. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106664>

MOORE, F.C, 2018. Mimi-PAGE, an open-source implementation of the PAGE09 integrated assessment model Sci. Data 5 180187

MORAZZO, G, et al., 2021. La forestación con diferentes especies de árboles provoca una evolución divergente de los perfiles y propiedades del suelo. Frente. Para. *Globo. Cambio* 4:685827. doi: 10.3389/ffgc.2021.685827

MUCHANE, M.N, 2020. La agrosilvicultura mejora la salud del suelo en los trópicos húmedos y subhúmedos: un metanálisis. *Agrícola. Ecosistema. Reinar*. 295:106899. doi: 10.1016/j.agee.2020.106899

MUDRÁK, O y FROUZ, J, 2018. Las lombrices de tierra aumentan la biomasa vegetal más en suelos sin legado de lombrices que en suelos mediados por lombrices, y favorecen a las especies de sucesión tardía en competencia. *Función. Ecológico*. 32, 626–635. doi: 10.1111/1365-2435.12999

NAUTIYAI, P, et al., 2019. Role of glomalin in soil carbon storage and its variation across land uses in temperate Himalayan regime. *Biocatal Agric Biotechnol* 21:101311. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101311>

Naveed, M, et al., 2014. Impacto de la práctica de fertilización a largo plazo en la evolución de la estructura del suelo. *Geoderma* 217–218, 181–189. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.12.001

NIETHER, W, et al., 2018. Los árboles de sombra y la poda de árboles alteran el caudal y el microclima en los sistemas de producción de cacao (*Theobroma cacao*)

L.). *Anales de Ciencias Forestales* 75: 1-16. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13595-018-0723-9>

NOVARA, A, et al., 2018. La paja utiliza compensaciones solo después del estado estacionario del carbono orgánico del suelo. *Revista Italiana de Agronomía* 13(3):216-220. doi:10.4081/ija.2018.1101.

OLDFIELD, E.E, BRADFORD, M.A y WOOD, S.A, 2019. Metaanálisis global de la relación entre la materia orgánica del suelo y el rendimiento de los cultivos. *Suelo* 5, 15–32. doi: 10.5194/suelo-15-5-2019

OLLINAHO, O.I y KRÖGER, M, 2021. Transiciones agroforestales: lo bueno, lo malo y lo feo. *J. Yeguada Rural*. 82, 210–221. doi:10.1016/j.jrurstud.2021.01.016

PÉREZ-RAMOS, I.M, et al., 2019. Los rasgos funcionales y la plasticidad fenotípica modulan la coexistencia de especies en condiciones climáticas contrastantes. *Comunicaciones de la naturaleza* 10: 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10453-0>

PHILLIPS, J. M y HAYMAN, D. S, 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [Procedimientos mejorados para limpiar raíces y teñir hongos micorrízicos parásitos y vesiculares-arbusculares para una evaluación rápida de la infección]. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158-161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)

PHILLIPS, J, et al., 2019. Diferencias en las reservas de carbono a lo largo de un gradiente altitudinal en los bosques tropicales de montaña de Colombia. *Biotrópica* 51 (4), 490–499. doi: 10.1111/btp.12675

RACHEI, C, et al., 2012. La agrosilvicultura y la mejora de la fertilidad del suelo: una visión desde la Amazonia", *Ciencias del suelo aplicadas y ambientales*, vol. 2012, artículo ID 616383, 11 páginas,. <https://doi.org/10.1155/2012/616383>

ROJAS-MOLINA, J, CAICEDO, V y JAIMES, Y.Y, 2017. Dinámica de análisis de la biomasa en sistemas agroforestales con *T. cacao* L., Rionegro, Santander (Colombia). *Agrón. Colombia*. 35, 182–189. doi: 10.15446/agron.colomb.v35n2.60981

SAAVEDRA, F, et al., 2020. Efectos de variables ambientales y rasgos foliares en la tasa de transpiración del cacao (*Theobroma cacao* L.) bajo diferentes sistemas de cultivo. *Sistemas agroforestales* 94: 2021-2031. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10457-020-00522-5>

SAUVADET, M, et al., 2020. Multifuncionalidad de los agroforestales del cacao y fertilidad del suelo explicadas por los rasgos de la hojarasca de los árboles de sombra. *J. Aplica. Ecológico.*, 57, 476–487. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13560>

SCHMIDT, J.E, et al., 2022. Impactos de los árboles de sombra en la rizosfera de cacao adyacente en un sistema agroforestal joven y diversificado. *Agronomía*, 12, 195. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010195>

SCHROTH, G, et al., 2015. Contribución de los agroforestales al almacenamiento de carbono en el paisaje. Mitigar. Adaptar. *Estrategias globales. Cambio* 20 (7), 1175-1190. doi:10.1007/s11027-013-9530-7

SCHROTH, G, et al., 2016. El respeto al clima de los agrobosques de cacao es compatible con el aumento de la productividad. Mitigar. Adaptar. *Estrategias globales. Cambio* 21, 67–80. doi:10.1007/s11027-014-9570-7

SDROLIA, E y ZAROTIADIS, G, 2019. Una revisión exhaustiva del término producto ecológico: desde la definición hasta la evaluación. *J. Economía. Sobrevivir.* 33, 150-178. doi: 10.1111/joes.12268

SOLIS, R, et al., 2020. Carbon stocks and the use of shade trees in different coffee growing systems in the Peruvian Amazon. *The Journal of Agricultural Science.* 58(6):450-460. doi:10.1017/S002185962000074X

SPEHN, E.M, et al., 2012. Biodiversidad de las montañas y cambio global. Evaluación Mundial de la Biodiversidad de las Montañas (GMBA)-*DIVERSITAS, Basilea, Suiza.*

SUÁREZ-VENERO, Gicli M, et al., 2019. Diversidad arbórea y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Soconusco, Chiapas, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 25(3), 315-332. Epub 19 de febrero de 2021. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.12.093>

TAO, J y LIU, X, 2024. ¿La inoculación de hongos micorrízicos arbusculares influye en el secuestro de carbono del suelo? *Biol suelos fértiles* 60, 213–225. <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01793-1>

TASHI, S, et al., 2016. Reservas de carbono y nitrógeno del suelo en los bosques a lo largo de un gradiente altitudinal en el Himalaya oriental y un metanálisis de datos globales. *Biología del cambio global* 22(6):2255-2268. doi:10.1111/gcb.13234.

VALLEJOS-Torres, G, et al., 2023. Absorción de cadmio y micorrización por clones de cacao en sistemas agroforestales y monocultivos de la Amazonía peruana. *Bioagro*, 35 (3), 237-246. <https://doi.org/10.51372/bioagro353.7>

VALLEJOS-TORRES, Geomar, et al., 2023. Soil organic carbon balance across contrasting plant cover ecosystems in the Peruvian Amazon. *Chilean journal of agricultural research*, 83(5), 553-564. <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-58392023000500553>

VAN RIKXOORT, H, et al., 2014. Las huellas de carbono y las reservas de carbono revelan una producción de café respetuosa con el clima. *Agrón. Sostener. Desarrollo*. 34 (4), 887–897. doi:10.1007/s13593-014-0223-8

VOS, H.M.J, et al., 2019. Grandes variaciones en el fósforo fácilmente disponible en los excrementos de ocho especies de lombrices de tierra están relacionadas con las propiedades del excremento. *Biol del suelo. Bioquímica*. 138:107583. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107583

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>

WARING, B.G, et al., 2022. Las reservas de carbono del suelo se ven afectadas por la identidad de las especies y la productividad en un experimento de jardín común con árboles. *Frente. Para. Globo. Cambio* 5:1032321. doi: 10.3389/ffgc.2022.1032321

YAO Y, et al., 2023. Características y factores que influyen en la composición del carbono orgánico del suelo por tipo de vegetación en montones de escombros. *Frente. Ciencia vegetal*. 14:1240217. doi: 10.3389/fpls.2023.1240217

ZAVALA, Wilfredo, MERINO, Erica, y PELÁEZ, Pedro, 2018. Influencia de tres sistemas agroforestales del cultivo de cacao en la captura y almacenamiento de carbono. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 493-501. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.04>

ZHANG, M, et al., 2021. Diversidad molecular y distribución de hongos micorrízicos arbusculares a diferentes elevaciones en el monte Taibai de la montaña Qinling. *Frente. Microbiol*. 12:609386. doi: 10.3389/fmicb.2021.609386

ZHANG, T, et al., 2018. Los cambios en la composición funcional de los árboles amplifican la respuesta de la biomasa forestal al clima. *Naturaleza* 556:99-102. doi:10.1038/naturaleza26152

## ANEXOS

### Anexo 1. Cuadro de operacionalización de variables

	VARIABLES DE ESTUDIO	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
<b>INDEPENDIENTE</b>	Ecosistemas	La mayor parte de las plantaciones de cacao en el mundo se encuentra establecida con especies de árboles de sombra; por ello, es necesario lograr una composición arbórea para sombra dentro de los SAF de cacao, para analizar la calidad del suelo y en el almacenamiento del carbono (Suárez-Venero et al., 2021).	El análisis del estudio ha considerado metodologías e información relevante de fuentes científicas de gran impacto. Este estudio estará enmarcado en 12 subparcelas de 100 m <sup>2</sup> en un área de cuatro hectáreas (dos ecosistemas de cacao como monocultivo y dos ecosistemas con árboles de sombra) en dos niveles altitudinales.	Ecosistemas con cacao	Monocultivo	Intervalo
					Agroforestal	
	Niveles altitudinales			300-500 msnm	Intervalo	
				800- 1 000 msnm		
	Profundidad de suelo			0-20 cm		Intervalo
				Perfiles de suelos		

<b>DEPENDIENTE</b>	Carbono en suelos	Los contenidos de carbono en un ecosistema esta influenciado por la presencia de microorganismos como las micorrizas arbusculares (Moore et al., 2018). Asimismo, los nuevos conocimientos de la calidad del suelo serán útil para la elaboración de diagnósticos de fertilidad.	En las subparcelas a estratificarse en los ecosistemas de cacao se considerará indicadores de carbono y calidad del suelo que serán trasladados y analizados en el Laboratorio del Instituto de Cultivos Tropicales.	Carbono	Carbono orgánico	Intervalo
	Microfauna			Lombrices	Lombrices	Intervalo
	Calidad del suelo			Micorrizas arbusculares	Colonización	Intervalo
				Calidad de suelo	MO	Intervalo
					P	
	Humedad					

**Fuente:** Elaboración propia

## Anexo 2. Validación de instrumentos por juicio de expertos



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

### Certificado de validez de contenido de los instrumentos.

**I. ASPECTOS DE VALIDACION**  
**MUY DEFICIENTE (1) DEFICIENTE (2) ACEPTABLE (3) BUENA (4) EXCELENTE (5)**

CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	4	5
CLARIDAD	Los ítems están redactados con lenguaje apropiado y libre de ambigüedades acorde con los sujetos muestrales.					X
ACTUALIDAD	instrumento demuestra vigencia acorde con el conocimiento científico, tecnológico, innovación ilegal inherente a la variable					X
ORGANIZACIÓN	los ítems del instrumento reflejan organicidad lógica entre la definición operacional y conceptual respeto a la variable, de manera que permitan hacer inferencia en la función de la hipótesis, problema y objetivos e la investigación.					X
SUFICIENTE	los ítems del instrumento son suficientes en cantidad y calidad acorde a la variable, dimensiones y indicadores.					x
INTENCIONALIDAD	los ítems del instrumento son coherentes con el tipo de investigación y responden a los objetivos hipótesis y variable de estudio					X
CONSISTENCIA	la información que se recoja a través de los ítems del instrumento permitirá analizar describir y explicar la realidad, motivo de la investigación.				X	
COHERENCIA	los ítems del instrumentó expresa la relación con los indicadores de cada dimensión de la variable					X
METODOLOGIA	la relación entre la técnica y el instrumento propuesto, responde al propósito de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación					X
PERTINECIA	la redacción de los ítems concuerda con la escala valorativa del instrumento.				X	
<b>PUNTAJE TOTAL</b>						

(nota: tener en cuenta que el instrumento es válido cuando se tiene un puntaje mínimo de 41 Excelente<sup>®</sup>, sin embargo, un puntaje menos a anterior se considera al instrumento no valido ni aplicable)

**II. OPINION DE APLICABILIDAD**

El instrumento es valido

**Promedio de valoración: 43**

Tarapoto 18 de mayo del 2024

Dr. Ana Lozano Chung  
 INGENIERA AMBIENTAL  
 CV 159414



**Certificado de validez de contenido de los instrumentos.**

**I. ASPECTOS DE VALIDACION**  
**MUY DEFICIENTE (1) DEFICIENTE (2) ACEPTABLE (3) BUENA (4) EXCELENTE (5)**

CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	4	5
CLARIDAD	Los ítems están redactados con lenguaje apropiado y libre de ambigüedades acorde con los sujetos muestrales.					X
ACTUALIDAD	instrumento demuestra vigencia acorde con el conocimiento científico, tecnológico, innovación ilegal inherente a la variable: <b>contenido de carbono</b>					X
ORGANIZACIÓN	los ítems del instrumento reflejan organicidad lógica entre la definición operacional y conceptual respeto a la variable, de manera que permitan hacer inferencia en la función de la hipótesis, problema y objetivos e la investigación.				X	
SUFICIENTE	los ítems del instrumento son suficientes en cantidad y calidad acorde a la variable, dimensiones y indicadores.					X
INTENCIONALIDAD	los ítems del instrumento son coherentes con el tipo de investigación y responden a los objetivos hipótesis y variable de estudio <b>contenido de carbono</b>					X
CONSISTENCIA	la información que se recoja a través de los ítems del instrumento permitirá analizar describir y explicar la realidad, motivo de la investigación.					X
COHERENCIA	los ítems del instrumentó expresa la relación con los indicadores de cada dimensión de la variable <b>contenido de carbono</b>				X	
METODOLOGIA	la relación entre la técnica y el instrumento propuesto, responde al propósito de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación.					X
PERTINECIA	la redacción de los ítems concuerda con la escala valorativa del instrumento.					X
PUNTAJE TOTAL						

(nota: tener en cuenta que el instrumento es válido cuando se tiene un puntaje mínimo de 41 Excelente", sin embargo, un puntaje menos a anterior se considera al instrumento no valido ni aplicable)

**II. OPINION DE APLICABILIDAD**  
El instrumento es valido  
**Promedio de valoración: 43**

Tarapoto 18 de mayo del 2024

**Ing. M. Sc. Harry Saavedra Alva**

**DNI: 43248273**

**CIP 31911**



**Certificado de validez de contenido de los instrumentos.**

**I. ASPECTOS DE VALIDACION**  
**MUY DEFICIENTE (1) DEFICIENTE (2) ACEPTABLE (3) BUENA (4) EXCELENTE (5)**

CRITERIOS	INDICADORES	1	2	3	4	5	
CLARIDAD	Los ítems están redactados con lenguaje apropiado y libre de ambigüedades acorde con los sujetos muestrales.					x	
ACTUALIDAD	instrumento demuestra vigencia acorde con el conocimiento científico, tecnológico, innovación ilegal inherente a la variable: <b>contenido de carbono</b>					x	
ORGANIZACIÓN	los ítems del instrumento reflejan organicidad lógica entre la definición operacional y conceptual respeto a la variable, de manera que permitan hacer inferencia en la función de la hipótesis, problema y objetivos e la investigación.					x	
SUFICIENTE	los ítems del instrumento son suficientes en cantidad y calidad acorde a la variable, dimensiones y indicadores.					x	
INTENCIONALIDAD	los ítems del instrumento son coherentes con el tipo de investigación y responden a los objetivos hipótesis y variable de estudio <b>contenido de carbono</b>					x	
CONSISTENCIA	la información que se recoja a través de los ítems del instrumento permitirá analizar describir y explicar la realidad, motivo de la investigación.				x		
COHERENCIA	los ítems del instrumentó expresa la relación con los indicadores de cada dimensión de la variable <b>contenido de carbono</b>				x		
METODOLOGIA	la relación entre la técnica y el instrumento propuesto, responde al propósito de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación.					x	
PERTINECIA	la redacción de los ítems concuerda con la escala valorativa del instrumento.					x	
PUNTAJE TOTAL							43

(nota: tener en cuenta que el instrumento es válido cuando se tiene un puntaje mínimo de 41 Excelente", sin embargo, un puntaje menos a anterior se considera al instrumento no valido ni aplicable)

**II. OPINION DE APLICABILIDAD**  
El instrumento es valido  
**Promedio de valoración: Instrumento aplicable**

Tarapoto 18 de mayo del 2024

.....  
Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz  
DNI: 41807923

### Anexo 3. Validación resumida de los instrumentos por favorable de estudio

**Tabla 3.** Variable: Ecosistemas con cacao en dos niveles altitudinales

Nº	Especialista	Especialidad	Calificación
1	Andi Lozano Chung	Ambiental	43
2	Harry Saavedra Alva	Agrónomo	43
3	Karina M. Ordoñez Ruiz	Ambiental	43

**Tabla 4.** Variable: contenidos de carbono y calidad del suelo

Nº	Especialista	Especialidad	Calificación
1	Andi Lozano Chung	Ambiental	43
2	Harry Saavedra Alva	Agrónomo	43
3	Karina M. Ordoñez Ruiz	Ambiental	43

### Anexo 3: Identificación y selección de ecosistemas de cacao



#### **Anexo 4. Cultivo de cacao con sistemas agroforestales**



#### **Anexo 5. Cultivo de cacao como monocultivo**



## Anexo 6. Evaluación de la presencia de lombrices en suelos



## Anexo 7. Colecta de muestras de suelo para colonización



**Anexo 8. Pesado y secado de muestras de suelo en la estufa**



**Anexo 9.** Base de datos de los resultados obtenidos en campo y laboratorio

<b>CLAVE</b>	<b>LOCALIDAD</b>	<b>C (%)</b>	<b>DA</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Carbono en suelos (t C ha-1)</b>	<b>MO</b>	<b>P</b>	<b>PH</b>	<b>Colonización (%)</b>	<b>Lombrices suelo (m<sup>2</sup>)</b>
CACAO MONOCULTIVO (800-1000)	LAMAS	2.89	1.15	0.28	66.18	4.2	15.6	6.97	62	5
	LAMAS	2.11	1.31	0.36	55.15	4.19	3.6	6.33	59	5
	LAMAS	2.95	1.23	0.32	72.33	3.63	6	6.91	64	5
CACAO MONOCULTIVO (300-500)	LAMAS	2.27	1.35	0.14	61.43	2.91	3.76	5.82	50	4
	LAMAS	2.47	1.32	0.17	65.19	3.87	10.38	5.35	52	3
	LAMAS	1.73	1.38	0.11	47.83	2.33	5.83	6.48	49	5
CACAO AGROFORESTAL (800-1000)	LAMAS	8.27	0.78	0.59	129.01	5.11	9.60	7.33	41	11
	LAMAS	6.45	0.83	0.40	107.38	5.74	13.6	6.28	40	8
	LAMAS	8.52	0.72	0.78	122.98	5.48	7	7.05	38	16
CACAO AGROFORESTAL (300-500)	LAMAS	2.03	1.43	0.14	58.10	4.99	5.40	7.11	25	13
	LAMAS	1.78	1.35	0.11	48.19	4.43	11.2	6.96	22	10
	LAMAS	2.88	1.26	0.17	72.45	4.46	10.20	7.01	21	6