

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE
SUELOS Y AGUA



**CALIDAD DEL SUELO Y LOS INDICADORES QUE LO DETERMINAN EN LOS
SISTEMAS DE USO EN EL CENTRO POBLADO SUPTE SAN JORGE, PROVINCIA
LEONCIO PRADO**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA

PRESENTADO POR:

SAJAMI TAQUIO, KEVIN JHORDY

Tingo María – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 135-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 26 de mayo de 2025, a horas 02:00 p.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“CALIDAD DEL SUELO Y LOS INDICADORES QUE LO DETERMINAN EN LOS SISTEMAS DE USO EN EL CENTRO POBLADO SUPTE SAN JORGE, PROVINCIA LEONCIO PRADO”

Presentado por el Bachiller: **SAJAMI TAQUIO, KEVIN JHORDY** 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, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN CONSERVACION DE SUELOS Y AGUA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 04 de diciembre de 2025

Dr. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUAREZ
PRESIDENTE

Ing. JAIME TORRES GARCIA
MIEMBRO

Dr. WILFREDO ALVA VALDIVIEZO
MIEMBRO



Ing. MSc. JUAN PABLO RENGIFO TRIGOZO
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 recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 437 - 2025 - 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 en Conservación de Suelos y Agua

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
CALIDAD DEL SUELO Y LOS INDICADORES QUE LO DETERMINAN EN LOS SISTEMAS DE USO EN EL CENTRO POBLADO SUPTE SAN JORGE, PROVINCIA LEONCIO PRADO	SAJAMI TAQUIO, KEVIN JHORDY	09 % Nueve	Menor a 20 %

Tingo María, 30 de diciembre de 2025.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

DEDICATORIA

En el umbral de este momento significativo, me encuentro reflexionando sobre el viaje que ha sido mi trayectoria académica. La culminación de este esfuerzo, mi tesis de grado no solo representa el logro de metas individuales, sino también la materialización de un camino que ha sido recorrido con el apoyo invaluable de seres queridos, mentores y amigos.

Dedico la presente tesis a mi fiel compañero DOKI, no hay palabras que puedan expresar todo el amor y la alegría que traes a mi vida. Eres mi amigo incondicional, mi confidente y mi compañero de aventuras, Tu presencia ha sido una bendición en mi vida y me siento agradecido por todos los momentos felices que hemos compartido juntos.

En este viaje, he descubierto que la educación no solo transforma mentes, sino también corazones. A través de este trabajo, espero inspirar a quienes me rodean, tal como ustedes me han inspirado a mí.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron de manera significativa en mi proceso de estudio y obtención del título profesional. Este logro no habría sido posible sin el apoyo, la orientación y la colaboración de aquellos que han sido parte integral de este viaje académico.

Agradezco sinceramente a mi Asesor el Ing. Juan Pablo Rengifo Trigozo por su guía experta y su dedicación. Su sabiduría, paciencia y compromiso con mi crecimiento académico han sido fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Al Ing. Lucio Manrique de Lara Suarez que ha compartido sus conocimientos y experiencias, gracias por inspirarme y desafiarme intelectualmente. Cada lección aprendida ha contribuido a la formación de mi perspectiva educativa.

Agradezco al comité evaluador por su tiempo y esfuerzo al revisar y enriquecer este trabajo con sus valiosas sugerencias y comentarios. Sus aportes han mejorado significativamente la calidad de la investigación.

Expreso mi gratitud a la Universidad Nacional Agraria de la Selva por proporcionar el entorno propicio para la investigación y el aprendizaje.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	
2.1.	Marco teórico	
2.1.1.	El suelo.....	
2.1.2.	Procesos de formación del suelo.....	3
2.1.3.	Fertilidad del suelo.....	4
2.1.4.	Calidad del suelo.....	4
2.1.5.	Indicadores de la calidad del suelo	5
2.1.6.	Indicadores físicos del suelo	6
2.1.7.	Indicadores químicos del suelo	9
2.1.8.	Indicadores biológicos del suelo.....	13
2.1.9.	Efectos de diferentes sistemas de uso en la calidad del suelo.....	16
2.1.10.	Biomasa microbiana	16
2.1.11.	Densidad de macrofauna en el suelo	16
2.1.12.	La biodiversidad	16
2.1.13.	Diversidad de especie	17
2.2.	Estado del arte	18
2.2.1.	Investigaciones realizadas.....	18
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1.	Lugar de ejecución	21
3.1.1.	Clima.....	22
3.1.2.	Zona de vida.....	22
3.1.3.	Suelo	22
3.1.4.	Descripción de los sistemas de uso.....	22
3.2.	Materiales y métodos.....	24
3.2.1.	Materiales.....	24
3.2.2.	Equipos	24
3.3.	Criterios de investigación.....	24
3.3.1.	Tipo de investigación.....	24
3.3.2.	Nivel de investigación.....	25
3.3.3.	Variables de estudio y operacionalización.....	25

3.3.4. Operacionalización de las variables.....	25
3.3.5. Diseño de la investigación.....	27
3.3.6. Población.....	27
3.3.7. Muestra	27
3.4. Metodología.....	27
3.4.1. Determinar y comparar los indicadores físicos (textura, densidad aparente, resistencia a la penetración del suelo) químicos (materia orgánica, reacción del suelo o pH, nitrógeno total, fósforo disponible, potasio disponible, CIC) en los sistemas de uso del suelo en el centro poblado Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado	27
3.4.2. Identificar y cuantificar la macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado	29
3.4.3. Determinar la densidad (ind.m ²), biomasa (g.m ²) y diversidad (Índice H') de especies de macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado	30
3.4.4. Correlacionar los indicadores físicos y químicos del suelo con la densidad y biomasa de macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado	32
3.5. Análisis de datos y métodos estadísticos.....	32
3.6. Fórmulas estadísticas.....	34
3.7. Análisis estadísticos de los datos de la investigación.....	38
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
4.1. Determinar y comparar los indicadores físicos (textura, densidad aparente, resistencia a la penetración del suelo) químicos (materia orgánica, reacción del suelo o pH, nitrógeno total, fósforo disponible, potasio disponible, CIC) en los sistemas de uso del suelo en el centro poblado Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado.....	40
4.1.1. Indicadores físicos	40
4.1.2. Indicadores químicos	44
4.2. Identificar y cuantificar la macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado.....	52

4.3. Determinar la densidad (ind.m ²), biomasa (g.m ²) y diversidad (Índice H')	
especies de macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado,	
Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado.....	55
4.4. Correlacionar los indicadores físicos y químicos del suelo con la densidad y	
biomasa de macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado	
Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado.....	57
4.4.1. Estadística descriptivas de abundancia y diversidad	58
4.4.2. Correlación entre la macrofauna del suelo y las variables fisicoquímicas	62
V. CONCLUSIONES	71
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	72
VII. REFERENCIAS	73
ANEXO	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Coordenadas UTM (Datum WGS84, UTM/UPS) del área de investigación.	21
2. Clasificación de las variables en estudio.	26
3. Métodos para la determinación de los indicadores físicos y químicos y biológicos en los sistemas de uso del suelo.	31
4. Textura del suelo de los sistemas de uso (SUS).	40
5. Densidad aparente (g.cm^3) del suelo en los sistemas de uso (SUS).	42
6. Resistencia a la penetración (Kg/cm^2) del suelo en los sistemas de uso (SUS).	43
7. El pH en el suelo en los sistemas de uso (SUS).	45
8. Materia orgánica en el suelo en los sistemas de uso (SUS).	46
9. Nitrógeno total del suelo en los sistemas de uso (SUS).	47
10. Fósforo disponible del suelo en los sistemas de uso (SUS).	48
11. Potasio disponible del suelo en los sistemas de uso (SUS).	49
12. Capacidad de intercambio catiónico del suelo en los sistemas de uso (SUS).	51
13. Análisis de la abundancia total (ind/m^2) de macrofauna del suelo en los sistemas de uso (SUS).	53
14. Densidades de macrofauna edáfica en los diferentes sistemas de uso.	55
15. Biomasa de macrofauna edáfica en los diferentes sistemas de uso.	56
16. Índice de diversidad de Shannon – Wiener (H') para los diferentes SUS.	57
17. Estadísticas descriptivas para la abundancia de macrofauna (ind/m^2) por SUS.	59
18. Identificación de putliers de la abundancia de macrofauna (ind/m^2) por SUS.	59
19. Estadísticas descriptivas para la diversidad (índice H') de macrofauna en los diferentes SUS.	59
20. Identificación de putliers del índice de diversidad de Shannon – Wiener por SUS.	59
21. Indicadores consolidados con base en los valores por SUS.	62
22. Matriz de correlación que incluye únicamente coeficiente de correlación fuertes y estadísticamente significativos ($ r > 0.90$; $p < 0.05$).	64
23. Interpretación de los coeficientes destacados de la matriz de correlación y su analogía con bioindicadores edáficos.	66

24. Evaluación de la asimetría de los indicadores edáficos y decisión sobre las transformaciones de datos	67
25. Dimensión de partículas del suelo.	93
26. Valores de la densidad aparente para los tipos de textura del suelo.	93
27. Valores interpretativos de densidad aparente.	93
28. Escala de resistencia a la penetración del suelo agrícola.	94
29. Niveles del pH del suelo.	94
30. Niveles de materia orgánica.	94
31. Niveles de nitrógeno total del suelo.	94
32. Niveles de fósforo disponible en el suelo.	95
33. Niveles de potasio disponible en el suelo.	95
34. Niveles de capacidad de intercambio catiónico (pH> 5.5).	95
35. Niveles de capacidad de intercambio catiónico (pH<5.5).	95
36. Diversidad y densidad relativa de macrofauna en cacao según índice de Shannon – Wiener (H').	96
37. Diversidad y densidad relativa de macrofauna en maíz según índice de Shannon – Wiener (H').	96
38. Diversidad y densidad relativa de macrofauna en cítrico según índice de Shannon – Wiener (H').	97
39. Niveles Diversidad y densidad relativa de macrofauna en sotobosque según índice de Shannon – Wiener (H').	97
40. Resistencia a la penetración por SUS.	98
41. Densidad aparente por SUS.	98
42. Contenido de pH por SUS.	99
43. Contenido de MO% por SUS.	99
44. Contenido de N% por SUS.	99
45. Contenido de P por SUS.	100
46. Contenido de K por SUS.	100
47. Contenido de CIC por SUS.	101
48. Densidad relativa (%) por orden taxonómicay comparación con MO%.	102
49. Densidad relativa (%) por orden taxonómicay comparación con P.	103
50. Densidad relativa (%) por orden taxonómicay comparación con K.	104

51. Densidad relativa (%) por orden taxonómicay comparación con CIC..... 105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Esquema de las parcelas de los sistemas de uso del suelo (100 x 100 m).....	21
2. A) Esquema de espaciamiento en la parcela de cacao (100 x 100 m). distanciamiento de 3 m x 3 m para cacao, bolaina blanca cada 4 m y guaba cada 0 m. Capirona dispuesta como cortina rompeviento. B) Esquema de distribución de especies de la parcela sotobosqueo purma (100m x 100 m). Constituidas por especies propias de la zona: atadijo, higuera, pashaco, moena negra, moena amarilla, huayruro y rifari.....	23
3. A) Esquema 3D de espaciamiento de la parcela de maíz (100 m x 100 m), con una pendiente de 25%. Se encuentra cubierta de especies herbáceas. B) Esquema 3D de espaciamiento de la parcela con cítrico (naranja) (100 m x 100 m), con una pendiente de 25%. Se encuentra cubierta por especies herbáceas	24
4. Diagrama de muestreo para macrofauna del suelo	30
5. Comparación entre un diagrama de caja (boxplot) de una distribución casi normal y una función de densidad de probabilidad de una distribución normal.	36
6. Proporción de arena, arcilla y limo en los sistemas de uso del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge	41
7. Densidad aparente del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge	42
8. Resistencia a la penetración del suelo (RPS) en el centro poblado, Supte San Jorge	44
9. Valores de pH del suelo en el centro poblado Supte San Jorge	45
10. Valores de materia orgánica del suelo en el centro poblado, Supte San JorgeCachiyacu .	47
11. Valores del nitrógeno total del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge	48
12. Valores de fósforo disponible del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge	49
13. Valores de potasio disponible del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge	50
14. Valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge	51

15. Proporción de individuos por orden en cada sistema de uso (SUS) en el centro poblado, Supte San Jorge	52
16. Análisis visual de la distribución de grupos de macrofauna del suelo según cada (SUS) en el centro poblado, Supte San Jorge	54
17. Gráfico tipo boxplot – Abundancia. Muestra la dispersión del número total de individuos por metro cuadrado en cada sistema de cultivo	60
18. Gráfico tipo boxplot – Índice de diversidad (H'). Muestra la dispersión de los valores del índice H' en cada sistema de cultivo	61
19. Heatmap. Mapa de calor generado a partir de la matriz de correlación de Pearson	65
20. Muestreo de suelo en un sistema de uso maíz	107
21. Muestreo de suelo en un sistema de uso cacao	107
22. Muestra del perfil del suelo	108
23. Determinando la textura del suelo	108
24. Análisis de suelo de los sistemas de uso	109

RESUMEN

Existe una limitada comprensión de las relaciones entre la macrofauna del suelo y los atributos físicos y químicos en diferentes sistemas de uso del suelo del centro poblado Supte San Jorge, provincia de Leoncio Prado. Por ello, el objetivo de esta investigación es evaluar la calidad del suelo y los indicadores que la determinan en los sistemas cacao, maíz, cítrico y purma. La metodología comprendió un muestreo estandarizado en 48 unidades, analizando indicadores físicos (textura, densidad aparente y resistencia mecánica a la penetración), químicos (pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y capacidad de intercambio catiónico) y biológicos, mediante la identificación, densidad, biomasa y diversidad de la macrofauna edáfica. Se aplicaron análisis estadísticos univariados y multivariados para determinar correlaciones significativas entre variables. Los resultados mostraron suelos de textura franca, densidad aparente adecuada, pero con resistencia a la penetración de moderada a severa, pH ácido y bajos niveles de fertilidad química. La macrofauna estuvo dominada por el filo Arthropoda, registrándose 15 órdenes, con mayor abundancia de Haplotaxida. La mayor densidad y biomasa se presentaron en purma y cacao. Las correlaciones evidenciaron a Haplotaxida como bioindicador de fertilidad edáfica, Araneae como indicador negativo de compactación, y Orthoptera y Diplopoda como indicadores de buena estructura física. Se concluye que la macrofauna del suelo es un indicador funcional clave para el monitoreo de la calidad edáfica en sistemas tropicales.

Palabras clave: Análisis estadísticos, Fertilidad edáfica, Macrofauna, Muestreo, Sistemas tropicales.

ABSTRACT

There is a limited understanding of the relationships between soil macrofauna and physical and chemical attributes in different land-use systems in the Supte San Jorge community, Leoncio Prado province. Therefore, the objective of this research is to evaluate soil quality and the indicators that determine it in cacao, maize, citrus, and fallow land systems. The methodology involved standardized sampling of 48 units, analyzing physical indicators (texture, bulk density, and mechanical resistance to penetration), chemical indicators (pH, organic matter, nitrogen, phosphorus, potassium, and cation exchange capacity), and biological indicators, through the identification, density, biomass, and diversity of soil macrofauna. Univariate and multivariate statistical analyses were applied to determine significant correlations between variables. The results showed soils with a loamy texture, adequate bulk density, but with moderate to severe resistance to penetration, acidic pH, and low levels of chemical fertility. The macrofauna was dominated by the phylum Arthropoda, with 15 orders recorded, the most abundant being Haplotaxida. The highest density and biomass were found in fallow land and cacao. Correlations showed Haplotaxida to be a bioindicator of soil fertility, Araneae as a negative indicator of compaction, and Orthoptera and Diplopoda as indicators of good soil structure. It is concluded that soil macrofauna is a key functional indicator for monitoring soil quality in tropical systems.

Keywords: Statistical analysis, Soil fertility, Macrofauna, Sampling, Tropical systems.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe un mayor interés en evaluar la calidad del suelo mediante un enfoque integral que considere simultáneamente atributos físicos, químicos y biológicos. Este enfoque se vuelve especialmente relevante en contextos tropicales donde las dinámicas de uso del suelo y las presiones antrópicas generan transformaciones aceleradas en la estructura y funcionalidad edáfica. El centro poblado Supte San Jorge, ubicado en la provincia de Leoncio Prado, presenta un potencial significativo para cultivos de importancia económica como el cacao, el maíz y los cítricos. Sin embargo, se carece de estudios locales que aborden con profundidad la calidad del suelo desde una perspectiva holística, que incorpore no solo las propiedades fisicoquímicas, sino también indicadores biológicos, como la macrofauna edáfica.

En este marco, se define como problema de investigación la necesidad de comprender si existen correlaciones significativas entre la macrofauna del suelo y los atributos físicos y químicos del mismo, en función de los diferentes sistemas de uso presentes en la región. El investigador parte de la premisa de que, si tales relaciones son identificables y estadísticamente sólidas, podrían utilizarse como herramientas bioindicadoras para el monitoreo y manejo sostenible del suelo. Por tanto, la pregunta clave que guía esta investigación es: ¿Cuál será la calidad del suelo y los indicadores que lo determinan en los distintos sistemas de uso en el centro poblado Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado? Para ello planteamos la siguiente hipótesis: la calidad del suelo es significativa evaluada como un recurso en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado.

En la región amazónica del Perú, particularmente en la cuenca del río Supte (provincia de Leoncio Prado), los sistemas de uso del suelo como el cultivo de cacao, maíz, cítricos y purma coexisten en una matriz ecológica compleja, sujeta a presiones antrópicas y procesos de transformación acelerada. Sin embargo, se dispone de poca información sobre cómo estas prácticas afectan la macrofauna del suelo y qué atributos edáficos se asocian a su presencia, abundancia o diversidad.

En este estudio se propone un enfoque metodológico que combina análisis univariados y multivariados, con énfasis en la interpretación ecológica funcional y el respaldo estadístico riguroso, a fin de evaluar cómo las variaciones edáficas se relacionan con la macrofauna en diferentes sistemas de uso. Se busca generar evidencia que fundamente el uso de la macrofauna como herramienta bioindicadora en agroecosistemas tropicales, incorporando criterios de densidad relativa, sensibilidad ecológica y significancia estadística. Asimismo, pretende ofrecer una línea de base metodológica replicable que fortalezca el monitoreo participativo del recurso

suelo, con miras a su conservación y uso racional en zonas de alta diversidad biológica y agrícola.

1.1. Objetivo general

Evaluar la calidad del suelo y los indicadores que lo determinan en los sistemas de uso en el centro poblado Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar y comparar los indicadores físicos (textura, densidad aparente, resistencia a la penetración del suelo) químicos (materia orgánica, reacción del suelo o pH, nitrógeno total, fósforo disponible, potasio disponible, C.I.C.) en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado.
- Identificar y cuantificar la macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia de Leoncio Prado.
- Determinar la densidad, biomasa y diversidad de especies de macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado.
- Correlacionar los indicadores físicos y químicos del suelo con la densidad y biomasa de la macrofauna en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. El suelo

Se define como un recurso esencial para la vida y representa la base de la producción agropecuaria y forestal; la producción de los alimentos depende significativamente de su uso y manejo (Martin & Adad, 2006). Este cumple un papel muy importante en los ecosistemas, por lo tanto, resulta imprescindible su conservación para mantenerse sostenible (Castelán et al., 2017). La temperatura, las precipitaciones (factores ambientales) y el tipo de cobertura forestal afecta en la dinámica de degradación de los restos vegetales del suelo (Moreno et al., 2018).

El suelo es el principal proveedor de nutrientes y medio de crecimiento para las plantas en sistemas ecológicos terrestres y sistemas agrícolas, además contribuye en la producción agro rural. Para asegurar la sostenibilidad de disponibilidad de alimentos de la población presente y futura es necesario aplicar prácticas para la conservación y el manejo adecuado (Vandermeer, 2011).

Muchas personas desconocen el papel determinante del suelo en la subsistencia del hombre, ya que en el reloj del tiempo del hombre no es fácilmente perceptible. Por este motivo se define al suelo como un recurso finito ya que su proceso de formación tarda cientos e incluso miles de años (Orjuela-Hernán, B., 2017).

2.1.2. Procesos de formación del suelo

Es un proceso complejo que implica la transformación biológica, química y física de la roca de origen geológico. Los procesos físicos, tales como los ciclos de hielo-deshielo y la lluvia, pueden reducir el tamaño de los sedimentos mas no afectar su composición. Los procesos químicos alteran o descomponen los minerales de la roca por la interacción principalmente con el oxígeno, el agua, el CO₂ y la biomasa formándose los compuestos estables (Budhu, 2007).

2.1.3. Fertilidad del suelo

Desde una perspectiva agronómica, se define como la capacidad para sustentar el desarrollo y productividad de los cultivos y las especies forestales. Si bien suele analizarse por separado en términos de fertilidad química, física y biológica, estas dimensiones están intrínsecamente interrelacionadas. La fertilidad química viene a denominarse como la accesibilidad de los nutrientes necesarios para las plantas (Torres, 2008). La fertilidad física implica las condiciones estructurales del suelo que permiten el sostén y desarrollo de plantas, considerando variables como la estructura, porosidad, retención hídrica y DA. La fertilidad

biológica es la interacción de los organismos microscópicos del suelo, estos son agentes determinantes en el crecimiento de las plantas (Torres 2008).

La gestión y conservación sostenible del suelo agrícola, pecuario y forestal requiere comprender su importancia tanto para la producción como para el equilibrio natural del planeta (Orsag, 2009).

Estos tres atributos (químicos, físicos y biológicos) interactúan activamente para asegurar la producción y estabilidad de los ecosistemas agrícolas. Los organismos invertebrados del suelo, visibles a simple vista y mayores a 2 mm, mejoran la aireación, infiltración, e incorporación de materia orgánica (Huerta et al, 2008), y los microorganismos (bacterias, hongos y protozoos) invisibles a simple vista, descomponen la MO, ponen a distribución los nutrientes esenciales para plantas, animales y humanos, y participan en la formación del humus, actuando como los "ingenieros químicos" del suelo (Turbé et al., 2010).

2.1.4. Calidad del suelo

La calidad y salud del suelo representan definiciones iguales, aunque no siempre deben ser considerados sinónimos (Hawkesford et al., 2012). La calidad se refiere a la utilidad del suelo a largo plazo, abarcando múltiples funciones y evolucionando constantemente (Singer & Ewing, 2000). La salud es la aptitud funcional del suelo para cumplir sus funciones de acuerdo con su potencial, considerando los efectos de las actividades antrópicas y de los eventos naturales a lo largo del tiempo.

La calidad es el potencial que posee el suelo para cumplir sus funciones en ecosistemas naturales o antrópicos, sustentar la capacidad productiva, mitigar la contaminación del medio y favorecer la salud de los seres vivos, relaciona la conservación, el manejo y los objetivos de la agricultura sostenible. Por ello, su evaluación y evolución temporal son indicadores fundamentales del manejo sostenible (Astier et al., 2002).

Las prácticas de manejo adecuadas protegen o restauran la calidad del suelo (Lal, 2015), aunque los efectos de la adición de materia orgánica varían según la fuente y la dosis (Orozco et al., 2016; Turgut & Köse, 2016).

La deficiencia de nutrientes (N, P, K) limita el rendimiento (Khan et al., 2018), haciendo que la MO (proveedora de macronutrientes y mejoradora de la estructura) y el pH (relacionado con la absorción de nutrientes) sean indicadores comunes de calidad en áreas de cultivo (Chen et al., 2020).

Factores físicos, como la estructura del suelo, intervienen directamente en la absorción de nutrientes para el crecimiento y en la calidad de los cultivos (Vandermeer, 2011).

2.1.5. Indicadores de la calidad del suelo

La evaluación de un indicador de la calidad del suelo permite precisar el estado en la que este se encuentra, así como identificar cambios y patrones en su comportamiento. Un indicador de la calidad del suelo mide atributos, procesos y características edáficas. Para que una variable sea considerada como indicador de la calidad, debe reunir una serie de criterios técnicos esenciales. En primer lugar, debe poseer un carácter integrador, contar con sustento objetivo y permitir una medición sencilla y confiable (Mäser et al., 1999). Asimismo, es fundamental que el indicador se adecue al nivel de análisis y al sistema en estudio, de modo que pueda ser aplicado en distintos ecosistemas y represente de manera adecuada el grado de sostenibilidad que se desea evaluar. Además, debe presentar una interpretación clara, facilitar la identificación de diferencias entre sistemas productivos.

Ahora bien, Ramírez (2004) señala que un indicador de calidad del suelo debe responder de manera sensible a los procesos de deterioro y recuperación del recurso, mantener una estrecha relación con el funcionamiento del ecosistema, incorporar los componentes químicos, biológicos y físicos del suelo, y permitir su evaluación mediante procedimientos accesibles y viables en condiciones de campo.

Considerando que el suelo funciona como un sistema altamente complejo, su análisis debe abordarse desde una perspectiva integral que contemple diversos factores de manera simultánea. Es necesario considerar indicadores del tipo físico, químico, biológico, social y productivo, ya que ningún indicador individual proporciona una visión completa (Doran & Parkin, 1994; Ramírez, 2004).

Desde el punto de vista metodológico, estos indicadores suelen agruparse en tres categorías principales: químicos, físicos y biológicos, los cuales se complementan con indicadores visuales del sistema productivo, permitiendo así una interpretación más amplia e integrada del estado del suelo (Angulo & Reyes, 2015).

2.1.6. Indicadores físicos del suelo

Los indicadores son la infiltración, la DA, la estructura, conductividad hidráulica, la porosidad y la estabilidad de los agregados (Karlen et al., 1992; Vandermeer, 2011).

Estas propiedades influyen en la distribución de nutrientes, agua y aire, estimulan el desempeño de microorganismos del suelo y fauna edáfica no vertebrada, regulan la germinación de las plantas y el crecimiento radicular, y afectan la erosión. Fundamentalmente, la calidad física del suelo se vincula con la resistencia mecánica y el almacenamiento/transmisión de fluidos dentro de la zona radicular. Una alta calidad física

implica un almacenamiento y transmisión adecuados de fluidos para favorecer el desarrollo óptimo del cultivo y minimizar la degradación ambiental (Reynolds et al., 2002). La estabilidad de los agregados estima indirectamente el potencial de almacenamiento de agua y aire, lo que regula la compactación, el movimiento del agua y la aireación (Dexter, 2004).

Una baja densidad aparente favorece el manejo del cultivo, mientras que la granulometría influye en la porosidad, afectando el contenido de aire y agua del suelo (Carlile et al., 2015).

- **Textura**

La textura del suelo es la proporción de la fracción de limo, arcilla y arena (Guerrero, 2000). Por lo que un suelo óptimo es aquel que brinda las condiciones adecuadas para el desarrollo radicular de las plantas, buena aireación, excelente drenaje, buena retención de humedad y nutrientes. Siendo estos suelos aquellos que se encuentran en texturas franco arcilloso a franco arenoso. Aunque los suelos arenosos tienen una adecuada permeabilidad y oxigenación (Navarro, 2003), su fertilidad es limitada debido a las rápidas fluctuaciones de temperatura.

Los procesos de agregación de partículas del suelo son dinámicos y dependen de las características pedogenéticas del suelo, como el material de origen, la textura, el relieve, y también están fuertemente influenciados por las condiciones de uso y manejo (Tian et al., 2022).

- **Densidad aparente**

Es la proporción existente entre el peso del sólido con un volumen determinado del suelo (Navarro, 1994). En suelos arenosos la DA es 1.8 gramo/cm³ y en suelos arcillosos es 1.0 gramo/cm³. Los suelos arenosos presentan valores más elevados de densidad aparente, ya que poseen menor espacio poroso. Los valores de DA se incrementan en relación con los estratos del suelo, causado por la disminución en el contenido orgánico y la compactación del suelo (Aguilera & Martínez, 1996).

La DA depende de los parámetros e indicadores, tales como la textura, MO, resistencia mecánica, porosidad, conductividad térmica y compactación del suelo. La condición adecuada para el desarrollo de los cultivos es un menor valor de DA del suelo (Navarro, 2003).

La compactación es un problema actual que enfrentan los sistemas agrícolas (degradación del suelo). La compactación genera el aumento de la densidad, la reducción de la porosidad total y cambios en las propiedades hidráulicas del suelo (Voltr et al., 2021).

En la Tabla 8, (Anexo) indican los valores interpretativos de densidad aparente establecidos por (Navarro, 2003).

- **Resistencia a la penetración**

Es la capacidad portante que el suelo ejerce al ser introducido por una herramienta de sondeo mecánico (penetrómetro) u otro objeto e incluso del crecimiento de las raíces, su valor se verá influenciada por el contenido de H₂O, la compactación, los niveles de arcilla, los niveles de MO y la estructura del suelo (Navarro, 2003).

El instrumento que mide este indicador físico es el penetrómetro, el cual muestra valores enfocados al índice de dureza del suelo, conocido comúnmente como índice de cono (IC) definida como aquella fuerza por unidad de área de base cónica útil para empujar la herramienta pasando de un ligero incremento específico de profundidad (Asabe, 2008).

La capacidad del suelo para resistir la desintegración de sus partículas bajo fuerzas externas, como la labranza en zonas agrícolas y los fenómenos meteorológicos como la precipitación y el viento, está relacionada con la dinámica biológica, los niveles de materia orgánica y la dinámica de nutrientes disponibles (USDA, 2008; Nichols).

Para Conte et al. (2011) la compactación tiende a agravarse cuando el suelo tiene humedad en el rango más favorable para la deformación plástica, lo cual ocurre justo por encima de su límite de friabilidad. Las presiones ejercidas por los neumáticos agrícolas pueden expresarse de forma más profunda en el perfil del suelo, ya que la profundidad de acción de esta presión es directamente proporcional al área de contacto con el suelo e inversamente proporcional a la resistencia del suelo (Conte et al., 2011; Mileusnić et al., 2022; Zhang et al., 2024).

En la Tabla 28, (Anexo) indican los valores interpretativos de la resistencia a la penetración del suelo como indica (Pérez, 2010).

2.1.7. Indicadores químicos del suelo

Los indicadores químicos del suelo (pH, MO, conductividad eléctrica, nutrientes y parámetros relacionados como la relación de adsorción de sodio y la CIC) son cruciales para las interacciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de agua y nutrientes (SQI, 1996)

La calidad química del suelo, influenciada por factores entre ellos la disponibilidad de nutrientes, el carbono orgánico total y lábil, la capacidad de absorción de fosfatos, la dinámica de la materia orgánica y el nitrógeno total y mineralizable, impacta directamente en estos aspectos (Sillero et al., 2020).

El intercambio iónico, un proceso químico fundamental para la fertilidad, ocurre entre el sistema de intercambio del suelo y la solución del suelo, reponiendo los nutrientes absorbidos por las plantas mediante el intercambio de cationes adsorbidos (Ca, Mg, K, Na, etc.) con iones de igual carga en la solución (Ortega, 1995; Malagon et al., 1995).

- **Reacción del suelo o pH**

El pH es crucial porque afecta la solubilidad de los nutrimentos esenciales para las plantas (SAGARPA, 2012).

Los valores de pH de 6.5 y 7.5 pH son los recomendados para un óptimo crecimiento y desarrollo vegetal, ahora bien, suelos que poseen valores mayores o menores a intervalo presentarán problemas de fitotoxicidad. Asimismo, aquellos suelos encontrados en el rango de pH 5.8 a 7.5 poseen mayor probabilidad de generar problemas que aquellos con valores altos o bajos. Suelos con valores de pH iguales o menores a 5.0, poseen menor contenido de calcio, magnesio e hidrogeno, asimismo pueden contener aquellos elementos tóxicos como zinc, aluminio, níquel, entre otros (Fassbender & Bornemisza, 1987).

- **Materia orgánica**

No existe un concepto bien definido de materia orgánica o humus con la cual la mayoría de los especialistas coincidan, por lo general, el vocablo humus distingue a aquellas sustancias orgánicas transformadas, cuyas características son de color pardo y negruzco, resultantes del desgaste de material orgánico exclusivamente de origen vegetal”. Contiene cerca del 5% de N (Navarro, 2003).

Se ha señalado que los niveles de MO son muy variados. Por lo que el mismo valor poseería significado a nivel regional. En tal sentido, los suelos de un valle aluvial costero ostentan valores de 2% (alto), mientras que el mismo valor en una zona de la sierra sería de rangos o nivel bajo, y en particular en zonas de la amazonia baja sería de nivel medio. Por lo que, en mérito a lo expuesto, los niveles bajo, medio, alto y muy alto deberán ser considerados a nivel regional y acorde a los requerimientos del cultivo.

La materia orgánica del suelo (MOS) es el indicador ideal de la calidad del suelo debido a su importancia en etapas fisicoquímicas y biológicas que suceden en el suelo. Entre estos procesos se incluyen: el ciclo y la retención de nutrientes, la agregación del suelo, la dinámica del agua, y la fuente primaria de energía para las actividades biológicas del suelo (Tirloni et al., 2012; Lal, 2020; Mesele et al., 2024).

La MOS está compuesta por componentes vivos y no vivos. Los primeros son las raíces, la fauna y los microorganismos del suelo. Los componentes no vivos incluyen materia orgánica macro (residuos de plantas en descomposición, sustancias humificadas y no

humificadas). Las sustancias no humificadas incluyen carbohidratos, lípidos, aminoácidos, proteínas, ligninas, ácidos nucleicos, pigmentos y una variedad de ácidos orgánicos. A su vez, las sustancias humificadas se componen de las fracciones ácido fúlvico, ácido húmico y humina (Passos et al., 2007; Lal, 2020; Mesele et al., 2024).

La estratificación de la MO entre 0-10 y 10-20 cm es un indicador del manejo del suelo a largo plazo (Díaz et al., 2008).

- **Nitrógeno**

Gran parte del N mineral en los suelos lo encontramos formando parte de la MO depositada posterior a la muerte de microorganismos y plantas, bajo esta forma, la planta no puede aprovechar este elemento. Su concentración o niveles del nitrógeno en el suelo varía más en cantidad en el suelo a comparación de otros elementos indispensables para el crecimiento óptimo de la planta. (Navarro, 2003).

El nitrógeno, elemento muy dinámico en el suelo, responde rápidamente a los manejos. Los efectos del manejo orgánico y convencional sobre el nitrógeno son inconsistentes en la literatura, con estudios que muestran diferencias (Cristóbal-Acevedo et al., 2011) y otros que no.

- **Fósforo disponible**

Es el macroelemento que genera mayor limitante en el crecimiento y desarrollo del cultivo, participando en muchas fases bioquímicas a nivel celular. Su entrada al sistema procede de agregado de fertilizantes fosfatados, y su salida puede darse en la producción de frutos, escurrimiento, erosión, y lixiviación, siendo esta última de escasa importancia. (Navarro, 2003).

El fósforo es un nutriente básico para el desarrollo y la reproducción óptima de cultivos, siendo uno de los 17 nutrientes indispensables. Ningún otro nutriente puede sustituir sus funciones, y su deficiencia es común en la agricultura, ya que los cultivos lo necesitan en proporciones relativamente grandes (0.1-0.5% de su composición total, Munera y Meza, 2012). El contenido de P total en los suelos está relacionado con el contenido de MO y su evolución pedológica (Fassbender & Bornemisza, 1987).

- **Potasio**

El K, un macroelemento esencial para todos los organismos vivos, es requerido por las plantas en grandes cantidades, comparable al nitrógeno. Desempeña un papel crucial en la activación de numerosas enzimas implicadas en etapas metabólicas como la síntesis de proteínas, la fotosíntesis y la producción de carbohidratos. Favorece el desarrollo, la fructificación, la maduración y la calidad de los frutos, y participa en el balance hídrico y el

crecimiento meristemático (Navarro, 2003). Considerado el catión más importante en la fisiología vegetal, el potasio es esencial para la translocación de azúcares y la formación de almidón, regula la apertura y el cierre de estomas, incrementa la resistencia fitosanitaria y potencia la calidad productiva (Navarro y Navarro, 2013; Taiz et al., 2015). El suministro de potasio al suelo es beneficioso cuando sus niveles son bajos (Havlin et al., 2014).

El potasio disponible en la solución del suelo es menor en comparación con el potasio total presente en el suelo. El potasio total el cual se encuentra en mayor cantidad dependiendo su contenido (como K_2O) de la textura del suelo (Fassbender, 1984).

- **Capacidad de intercambio catiónico**

La CIC, una característica fundamental del suelo debido a la carga negativa del complejo coloidal, determina su habilidad para retener cationes. La CIC aumenta en suelos de textura fina ricos en arcilla y humus, y disminuye en suelos de textura gruesa, como arenas, debido a su bajo contenido de arcilla coloidal y humus (Fassbender & Bornemisza, 1987).

Una mayor CIC mejora la estructura del suelo, favoreciendo la aireación, la retención de agua, la actividad microbiana y la fertilidad (SAGARPA, 2012).

Agronómicamente, la CIC es importante porque indica la capacidad del suelo para actuar como reserva de nutrientes. Una mayor CIC implica una mayor capacidad para retener iones nutritivos disponibles para la captación radicular de las plantas (Arévalo y Gauggel, 2014).

2.1.8. Indicadores biológicos del suelo

Al haber mayor presencia y dinámica de macroinvertebrados en el suelo, estos mejoran o contribuyen en la calidad. Estos modifican el suelo a través de la construcción de estructuras (Villani et al., 1999) e influyen directa (incorporación de materiales) e indirectamente (formación de comunidades microbianas) en los procesos edáficos. La degradación de restos vegetales, la respiración, el nitrógeno y el carbono de la biomasa microbiana son indicadores importantes en el suelo. La biomasa microbiana asimila mejor a la relación C microbiano / C orgánico del suelo que al C total del suelo y esto sirve como indicador de cambios iniciales en la dinámica de la MO (Sparling, 1997).

Los organismos microscópicos del suelo liberan la mayoría de elementos nutritivos de la MO. Al descomponerla, utilizan el carbono y los nutrientes para su crecimiento y liberan el excedente al suelo, donde las plantas pueden absorberlos. Si la materia orgánica es pobre en nutrientes, los microorganismos los obtienen del suelo (Peña, 2016).

La cuantificación de variables biológicas es útil para indicar la tendencia del suelo a aumentar o disminuir la MO, reflejando rápidamente el efecto de los cambios de manejo

(Cabrera, 2014). Si bien algunas prácticas de manejo afectan la población microbiana, otros estudios no encuentran diferencias.

La fauna edáfica también es crucial en el ciclo de nutrientes y la evolución del suelo. Mezclan partículas orgánicas y minerales, forman poros y agregados a través de materia fecal, siendo considerados factores formadores del suelo (Gliessman, 2002, López, 2005).

La mesofauna y macrofauna edáfica contribuyen al ciclo de nutrientes al: 1. simplificar la materia orgánica. 2. mezclar el suelo y mejorar su porosidad 3. aumentar la disponibilidad de nutrientes a través de excretas y controlar comunidades microbianas (López, 2005; Pérez, 2010). Finalmente, la sensibilidad de los microorganismos a las perturbaciones del suelo los convierte en excelentes indicadores (Vandermeer, 2011).

- **Macrofauna**

Son aquellos individuos pertenecientes a diferentes Filos, Clases y Órdenes, que cuyo ancho de cuerpo es superior a 2 mm y visibles para el ser humano (Máster, 2004). Los que componen la macrofauna del suelo se caracterizan por gozar de un período biológico extenso, no obstante, se reproducen lentamente en comparación con otros organismos. Presentan dificultades para desplazarse rápidamente a lugares lejanos (Brown *et al.*, 2001).

La fragmentación de las partículas del suelo produce residuos fecales, ayudando a estimular la actividad microbiana, consecuentemente logra intervenir en el ciclo de la MO y nutrientes, ello mejora la agregación del suelo. Además, genera la alteración de la textura, aeración e infiltración, a través de sus actividades físicas (Máster, 2004).

Las lombrices, pertenecen a la macrofauna y no son tolerantes a los productos agroquímicos (Pérez, 2010).

- **Microbiota del Suelo**

La microbiota edáfica es crucial para la mineralización de la MO, liberando nutrientes esenciales y contribuyendo a la humificación. Bacterias como *Azotobacter*, *Clostridium* y *Rhizobium* (en leguminosas) fijan nitrógeno, un proceso clave dada su frecuente limitación para el crecimiento vegetal. La microbiota del suelo interviene en la disponibilidad y circulación de nutrientes tales como P, N, Ca, Mn, C, S y Fe (López, 2005).

La MO mejora las propiedades edáficas, afectando directa o indirectamente el desarrollo y la eficiencia de las micorrizas (Bernal, 2010).

- **Importancia de la macrofauna**

Los organismos, al descomponer la materia orgánica, contribuyen en la accesibilidad de nutrientes en el suelo (Lok, 2005). Asimismo, crean una estructura más porosa, lo cual mejora la aireación del suelo y la infiltración de agua.

- **Grupos funcionales de la macrofauna**

Para simplificar el estudio de la compleja red trófica del suelo, la FAO (2001) propone clasificaciones prácticas, destacando la división de la macrofauna según su comportamiento alimentario.

Las interacciones bióticas resultantes de actividades prácticas influyen en las características edáficas. En ecosistemas complejos, las alteraciones en la dinámica de los nutrientes pueden tener consecuencias significativas (Wardle, 2004). Asimismo, los depredadores pueden afectar sustancialmente la producción y descomposición neta, con implicaciones locales y ambientales (Masters, 2004; Wardle y Bardgett, 2004).

2.1.9. Efectos de diferentes sistemas de uso en la calidad del suelo

La calidad del suelo es una función de sus indicadores fisicoquímicos y biológicos, y sus interrelaciones. Para analizar la calidad del suelo, se deben considerar todos estos aspectos, aunque su importancia varía según el tipo de suelo. Por ejemplo, la medición de la conductividad eléctrica (CE) para definir la salinidad puede no ser relevante en zonas donde la salinidad no es un problema (Doran y Lincoln, 1999).

2.1.10. Biomasa microbiana

La biomasa microbiana, definida como la masa total de microorganismos vivos en un volumen de suelo dado, representa la carga total microbiana en un ambiente (Cárdenas, 2008). La riqueza y biomasa de macroinvertebrados varían significativamente según el uso de materia orgánica y la profundidad del suelo, siendo mayores en la capa superficial (hojarasca y 0-10 cm).

La presencia de macroinvertebrados también depende del uso del suelo y la estabilidad ambiental, influenciada por la insolación, la humedad relativa, la estructura de la vegetación y la disponibilidad de materia orgánica para la descomposición (Porta et al., 1999).

2.1.11. Densidad de macrofauna en el suelo

La densidad de macrofauna se calcula en individuos por metro cuadrado (ind/m^2). Para el muestreo, se utiliza un cuadrado de 0,25 m x 0,25 m ($1/16 \text{ m}^2$). Los datos

obtenidos en cada punto de muestreo se multiplican por 16 para estimar el número de individuos por m² (Correia & Oliveira, 2000, cito por Valdez, 2016).

2.1.12. La biodiversidad

Es la variedad de organismos vivos y los ecosistemas en los que habitan. Los sistemas agroforestales presentan un alto potencial para la conservación de la biodiversidad, debido a su alta diversidad florística, estratificación de la vegetación, alta densidad de árboles y similitud con los bosques (Pagiola y ota, 1997).

Para Delgado y España (1999) puede definirse como la proporción y organización de elementos naturales presentes en sistemas biológicos complejos. Doran y Lincoln (1999) representa una cualidad de los sistemas de vida que puede ser evaluada en distintos niveles de organización, desde poblaciones y redes de especies hasta ecosistemas.

2.1.13. Diversidad de especie

La macrofauna del suelo, invertebrados visibles a simple vista (gusanos, termitas, insectos, etc.) que habitan el suelo, puede alcanzar más de 1000 especies, densidades superiores a 1.000.000 de individuos y una biomasa de una tonelada por hectárea. Estos organismos, clasificados según diversos criterios (Etter, 1991), desempeñan múltiples funciones ecosistémicas. Para estimar la diversidad comunitaria, se han utilizado ampliamente índices basados en la teoría de la información, como el índice de Shannon-Wiener (ajustado por Equitatividad) y el índice de Heterogeneidad de Simpson, a pesar de sus limitaciones (Franco, 1989). El índice de Simpson cuantifica la probabilidad de que dos individuos aleatorios de una comunidad pertenezcan a la misma especie. En conservación, donde interesa la variación en la riqueza de especies, es necesario emplear índices sensibles a las especies menos abundantes, como el índice de Shannon-Wiener.

- **Riqueza biológica**

Según Franco (1989), la riqueza de especies es un concepto inherente a la idea de riqueza biológica, ya que es el número de especies en una zona específica, independientemente del tamaño de la muestra.

- **Diversidad alfa**

Halffter et al. (2001) definen la diversidad alfa como la abundancia de especies en una zona local homogénea. En este estudio, el término se restringe a la disposición de tipos de marcadores coincidentes en un espacio homogéneo, que corresponde a la unidad de muestreo: un fragmento de vegetación comparable a un área local. Franco (1989)

señala la existencia de varios índices para evaluar esta diversidad, entre ellos: Considerando el criterio de Heterogeneidad.

- **Índice de diversidad de Shannon - Wiener (H')**

Cuantifica la incertidumbre al predecir la especie de un individuo aleatorio de la comunidad, siendo mínima si todos pertenecen a la misma especie y máxima si todas las especies tienen la misma abundancia.

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \log p_i$$

Generalmente, los valores oscilan entre 1.5 y 3.5, raramente superando 4.5. Moreno (2001) destaca que una característica de Shannon-Wiener es su sensibilidad a los cambios en la abundancia de especies raras, lo que lo hace útil en estudios de conservación. (Moreno, 2001).

- **Índice de Equitatividad**

Para determinar los resultados en una escala de valores de 0 a 1, se utiliza el índice de equidad, cuya ecuación es la siguiente:

$$E = J = \frac{H'}{H_{MAX}}$$

2.2. Estado del arte

2.2.1. Investigaciones realizadas

Rodríguez et al. (2016) investigaron el efecto de un sistema agroforestal (SAF) de olivo-maíz, cultivado durante 30 años en Texcoco, México, sobre la calidad del suelo, comparándolo con un monocultivo de maíz (MC). El SAF mostró menor punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de campo (CC), mejores condiciones para la actividad microbiana y mesofauna, y menor escurrimiento y pérdida de suelo, sin diferencias significativas en las propiedades químicas, indicando una mayor conservación del suelo. Sin embargo, la producción de maíz fue menor en el SAF (4670 kg ha⁻¹) que en el MC (6379 kg ha⁻¹), probablemente debido al efecto de la sombra de los árboles.

Por otro lado, Angulo y Reyes (2015) evaluaron la calidad del sitio para cuatro especies forestales comerciales en un suelo degradado en el Bosque Alexander Von Humboldt. A los 70 meses, Marupa, Shihuahuaco y Tahuari mostraron el mayor crecimiento en el bloque tres (15.90 m, 12.80 m y 11.20 m, respectivamente), mientras que Pumaquiroy tuvo

el menor crecimiento en la parcela uno (6.40 m), sin diferencias significativas entre tratamientos por especie ($p > 0.05$). El suelo presentó bajo contenido de fósforo y materia orgánica, alta acidez (pH 4.21-4.69), y alta saturación de aluminio (46.22%-63.28%), indicando baja fertilidad.

Munive (2017) investigó la calidad del suelo en cuatro distritos del valle del Mantaro (INIA El Tambo, EEA Mantaro, Chupaca y Huayao) en Junín, con el objetivo de identificar indicadores fisicoquímicos y biológicos clave para mejorar y sostener la calidad del suelo. Utilizando el marco SMAF, basado en múltiples indicadores, se determinó un Conjunto Mínimo de Datos (CMD) para construir un índice que evaluara los efectos del manejo a través del tiempo. El estudio de agrupamiento químico reveló diferencias en la composición del suelo entre localidades: Santa Ana y Mantaro eran más similares entre sí que a Huayao, y más diferentes aún a Chupaca. El análisis físico agrupó a Huayao y Chupaca, diferenciándolos de Mantaro y Santa Ana, un patrón similar al observado en los indicadores químicos. Los Índices de Calidad del Suelo (ICS) iniciales mostraron que Chupaca tenía los suelos de mayor calidad y Santa Ana los de menor. Tras el análisis de agrupamiento y basándose en los índices de Cantú et al. (2007), Chupaca y Huayao exhibieron la mejor calidad de suelo, seguidos por Mantaro y luego Santa Ana. Esta mejor calidad se asoció con un mayor contenido de MO y una mejor CIC. Sin embargo, para el cultivo de maíz, los ICS indicaron que Mantaro tenía los mejores suelos y Santa Ana los peores, corroborando el análisis de componentes principales (ACP). En conclusión, existían diferencias en la fertilidad del suelo antes y después de la aplicación de tratamientos, observándose una ligera acidificación con la adición de materia orgánica.

Gómez & Hoyos (2020) evaluaron la calidad del suelo bajo tres usos diferentes (cacao, guanábana y cítricos) en la Granja Barcelona de la Universidad de los Llanos. Se tomaron muestras de suelo en forma de cuadro y se determinaron las propiedades físicas (DA, resistencia a la penetración) y químicas (pH, fósforo disponible, MO, stock de carbono) siguiendo los protocolos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Se calculó un Índice de Calidad del Suelo (ICS) mediante ACP, evaluando la relación entre los parámetros medidos. Los resultados indicaron que el manejo de las propiedades químicas, buscando prácticas que aumenten el pH, es clave para mejorar la calidad del suelo, con el aspecto químico contribuyendo más significativamente que la resistencia a la penetración, que aportó aproximadamente un 20%.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El estudio se realizó en cuatro parcelas de una hectárea (1 ha; 100 m × 100 m), correspondientes a cuatro sistemas de uso del suelo (SUS): 1) *Theobroma cacao* (cacao), 2) *Zea mays* L. (maíz), 3) *Citrus sinensis* (naranja cítrico) y 4) sotobosque (purma) (Figura 1). Las parcelas se encuentran georreferenciadas y están ubicadas, desde el punto de vista político-administrativo, en el sector Vista Alegre del centro poblado de Supte San Jorge, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco (Tabla 1).

Se realizaron coordinaciones previas con los propietarios de las unidades productivas correspondientes a cada sistema de uso del suelo, a fin de garantizar el acceso, la logística y la disponibilidad de las áreas seleccionadas durante la etapa de muestreo.

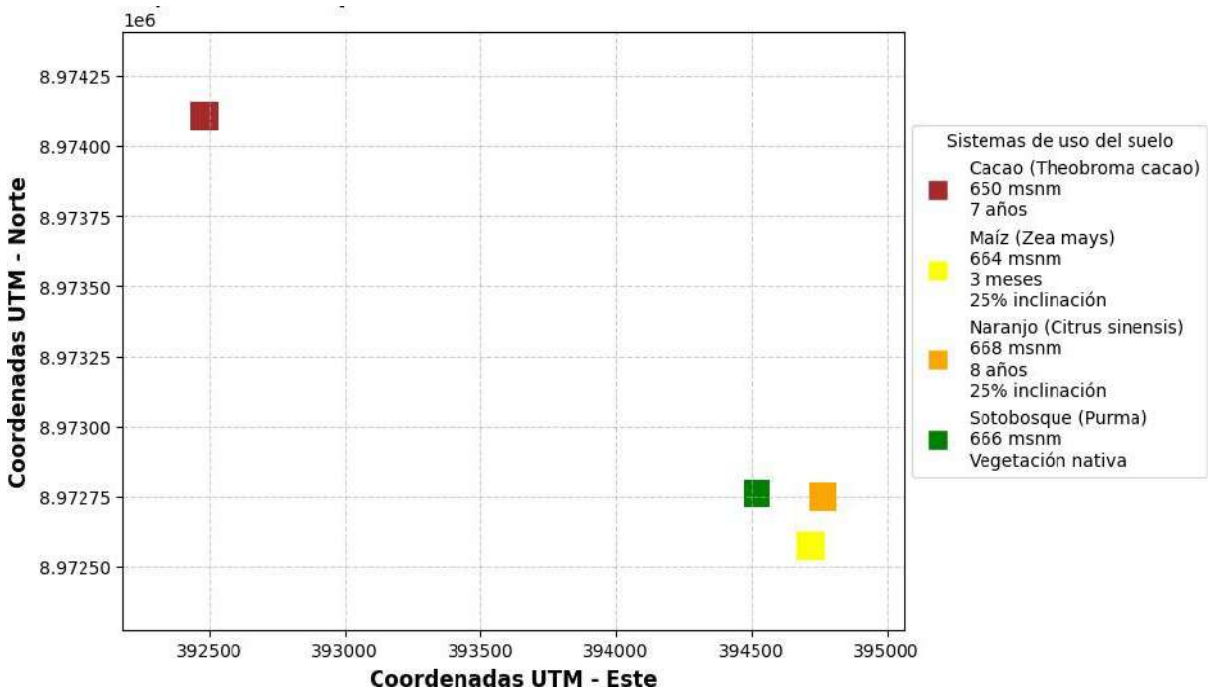


Figura 1. Esquema de parcelas de los sistemas de uso del suelo (100 m × 100 m cada una).

Las actividades de gabinete se realizaron en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva y el Laboratorio de Entomología de la Facultad de Agronomía.

Tabla 1. Coordenadas UTM (Datum WGS 84, UTM/UPS) del área de investigación.

Sistemas de uso del suelo	Coordenadas geográficas (UTM)		Altitud (msnm)
	Este	Norte	
Cacao	392481	8974108	650
Maíz	394717	8972726	664

Cítrico naranjo	394614-	8972751	668
Sotobosque o purma	394670	8972761	666

3.1.1. Clima

Clima tropical húmedo, caracterizado por temperaturas elevadas y alta humedad relativa durante la mayor parte del año. De acuerdo con datos climáticos proporcionados por la estación meteorológica más cercana, localizada en la provincia de Leoncio Prado, específicamente en la ciudad de Tingo María, se registran temperaturas medias anuales que oscilan entre 23 °C y 26 °C, con mínimas de hasta 19 °C y máximas que pueden superar los 33 °C. El régimen pluviométrico es marcadamente estacional, con una precipitación media anual superior a los 3 000 mm. La estación lluviosa se extiende predominantemente entre los meses de noviembre y abril, mientras que los meses de junio a agosto corresponden al período menos lluvioso, aunque no necesariamente seco. La humedad relativa se mantiene alta durante todo el año, oscilando entre el 80 % y el 95 %.

Estas condiciones climáticas favorecen una alta actividad biológica en el suelo, acelerando las etapas de mineralización, desgaste de la MO y dinámica de la macrofauna edáfica, factores que deben considerarse al momento de interpretar las variaciones espacio-funcionales de los indicadores evaluados.

3.1.2. Zona de vida

De acuerdo con la clasificación de zonas de vida o formaciones vegetales del mundo, el centro poblado Supte San Jorge presenta una formación vegetal de bosques muy húmedo premontano, tropical (bmh - T) y según CDC – UNALM (2003) se encuentra dentro de la ecorregión de las Yungas Peruanas cuya extensión se desarrolla a lo largo de la cuenca del Huallaga denominada Yungas Nor Huánuco.

3.1.3. Suelo

Los suelos del área y en general de la provincia de Leoncio Prado varían en fertilidad, textura, pendiente y drenaje interno, ya que posee un relieve complejo y muestran distintas etapas de formación.

3.1.4. Descripción de los sistemas de uso

El sistema de uso del suelo sotobosque (Figura 2B) está conformado por especies nativas de la zona, tales como *Trema micrantha* (L.) Blume (atadijo), *Micrandra spruceana* (higuerilla), *Parkia multijuga* (pashaco), *Aniba perutilis* (moena negra), *Ocotea olivácea* (moena amarilla), *Ormosia coccinea* (huayruro) y *Miconia barbeyana* (rifari). Este sistema se localiza a una altitud de 666 msnm.

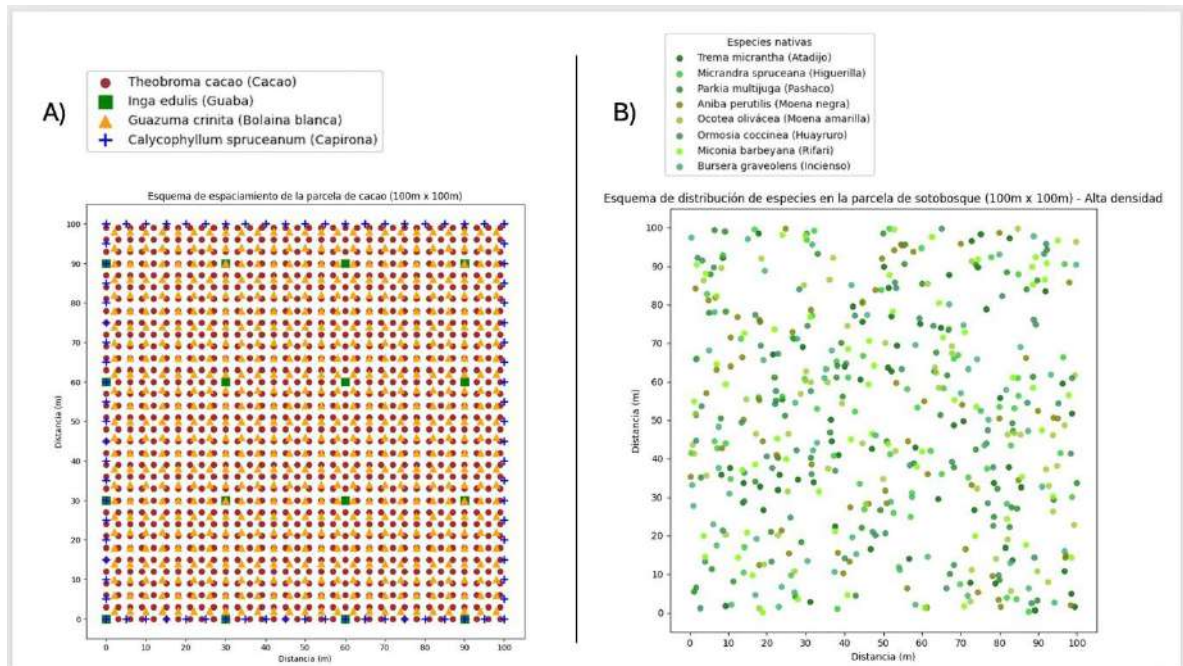


Figura 2. A) Esquema de espaciamento en la parcela de cacao (100 m × 100 m). Distanciamiento de 3 m × 3 m para cacao, con bolaina blanca cada 4 m y guaba cada 30 m. Capirona dispuesta en los bordes como cortinas rompeviento. B) Esquema de distribución de especies en la parcela de sotobosque (100 m × 100 m). Constituida por especies propias de la zona: atadijo, higuerilla, pashaco, moena negra, moena amarilla, huayruro y rifari.

El sistema de uso del suelo de *Theobroma cacao* (cacao, variedad CCN 51) cuenta con siete años promedio, se localiza a una altitud de 650 msnm y presenta un distanciamiento de 3 m × 3 m. En sus contornos se encuentra una asociación de plantas con *Inga edulis* (guaba), plantadas cada 30 m, complementadas con árboles de la especie *Guazuma crinita* (bolaina blanca), con un distanciamiento de 4 m, y *Calycophyllum spruceanum* (capirona), todos establecidos en el lindero como cortinas rompeviento (Figura 2A).

El cultivo de *Zea mays* se encuentra a una altitud de 664 msnm, con aproximadamente tres meses de establecido, presenta una pendiente del 25 % y está cubierto por especies herbáceas (Figura 3B). El cultivo de *Citrus sinensis* se encuentra a una altitud de 668 msnm, con aproximadamente ocho años de establecido, presenta una pendiente del 25 % y está cubierto por especies herbáceas (Figura 3B).

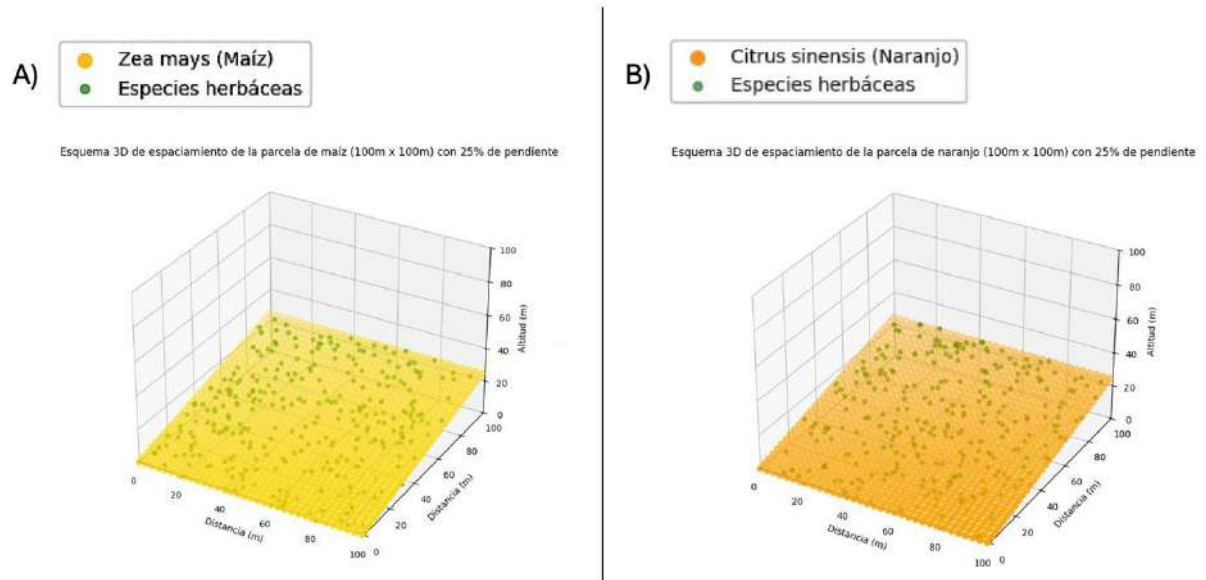


Figura 3. A) Esquema 3D de espaciamento de la parcela de maíz (100 m × 100 m), con una pendiente del 25%. Se encuentra cubierta por especies herbáceas. B) Esquema 3D de espaciamento de la parcela de cítrico (*naranja*) (100 m × 100 m), con una pendiente del 25 %. Se encuentra cubierta por especies herbáceas.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales

Wincha de 50 m, libreta de campo, fichas de campo, bolsas plásticas de 1 y 2 kg, cuadrado muestreador, cilindro muestreador, machete, pala recta, lupa, papel secante, Agua destilada, alcohol y formol, cilindro muestreador, machete y tamiz.

3.2.2. Equipos

Termómetro de suelo, penetrómetro, cámara fotográfica, sistema de posicionamiento global (GPS), cámara digital, balanza de precisión, estufa, peachímetro y estereoscopio.

3.3. Criterios de investigación

3.3.1. Tipo de investigación

Fue de campo y aplicada, dado que se fundamenta en la utilización de conocimientos provenientes de las ciencias del suelo para caracterizar sus propiedades fisicoquímicos y biológicos bajo la influencia de cuatro distintos Sistemas de Uso del Suelo (SUS): *Theobroma cacao*, *Zea mays*, *Citrus sinensis* y sotobosque o purma.

3.3.2. Nivel de investigación

En cuanto a su nivel, el estudio adopta un enfoque probabilístico, dado que se emplea un muestreo que permite obtener datos representativos del área de estudio. Según la naturaleza del problema planteado, el estudio se caracteriza por ser de nivel descriptivo y

correlacional, ya que busca describir las propiedades edáficas en cada tipo de cobertura y, a su vez, analizar las relaciones estadísticas entre las variables consideradas, con énfasis en la calidad del suelo.

Este enfoque metodológico exige una clara definición de las variables implicadas en el análisis, así como su respectiva operacionalización, tal como se detalla a continuación.

3.3.3. Variables de estudio y operacionalización

La presente investigación contempla el análisis de la calidad del suelo a través del análisis correlacional entre variables seleccionadas, las cuales representan distintos aspectos del uso del suelo, sus propiedades edáficas y sus efectos ecológicos. La clasificación de estas variables en categorías específicas permite establecer un marco metodológico riguroso para interpretar las interacciones entre los sistemas evaluados.

Para el estudio fueron consideradas las siguientes variables dependientes e independientes:

a. Variable Dependiente (Y)

Las variables dependientes reflejan los efectos observables derivados de los cambios en las variables independientes. En este caso, se consideran la Abundancia y la Diversidad de la macrofauna edáfica como indicadores clave de la respuesta ecológica ante las distintas coberturas vegetales (Tabla 2).

b. Variable Independiente (X)

Las variables independientes corresponden a aquellos factores definidos por el diseño experimental que se presume influyen directamente en otras variables del sistema. En este estudio, se identifican como los Sistemas de Uso del Suelo (SUS), integrados por cuatro coberturas principales (Tabla 2).

3.3.4. Operacionalización de variables

Por su parte, las variables intervinientes o mediadoras pueden influir o modificar la relación entre las variables dependientes e independientes. Estas variables físicas y químicas proporcionan información crítica sobre las condiciones del suelo, e incluyen: DA (densidad aparente), RPS (resistencia a la penetración del suelo), pH, MO (materia orgánica), N (nitrógeno), P (fósforo), K (potasio) y CIC (capacidad de intercambio catiónico) (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de las variables en estudio.

	Variable	Dimensiones	Indicadores	Índices
Variable independiente (X)	Sistemas de uso del suelo	Tipos de sistemas de uso del suelo (SUS)	<i>Theobroma cacao</i>	ha
			<i>Zea mays</i>	ha
			<i>Citrus sinensis</i>	ha
			Sotobosque o purma	ha
Variable dependiente (Y)	Propiedades biológicas	Biológicas (macrofauna edáfica)	Abundancia	Individuos (m ²)
			Diversidad (riqueza de especies)	Índice de Shannon-Wiener (H')
Variable interviniente o mediadora	Propiedades físicas	Físicas	Textura	Granulometría
			Densidad Aparente (DA)	g/cm ³
			Resistencia a la penetración (RPS)	Kg/cm ²
	Propiedades químicas	Químicas	pH	Rangos
			Materia orgánica (MO)	%
			Nitrógeno (N)	%
			Fósforo (P)	ppm
			Potasio (K)	K ₂ O
		Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	(Cmol(+).kg ⁻¹)	

3.3.5. Diseño de la investigación

La investigación empleó el muestreo y análisis de suelos de cuatro Sistemas de Uso del Suelo (SUS): cacao, maíz, cítrico y sotobosque. El estudio se realizó durante seis meses, determinando algunas propiedades in situ y analizando otras en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (Hernández et al., 2014).

3.3.6. Población

La población fueron las áreas de los sistemas de uso del suelo en el sector Vista Alegre del centro poblado de Supte San Jorge en la provincia de Leoncio Prado del departamento Huánuco.

3.3.7. Muestra

La muestra fueron los suelos muestreados asociados con la presencia de cada uno de los sistemas de uso en la presente investigación.

Para el muestreo de las variables físicas y químicas se realizaron en cada parcela de 100 m × 100 m correspondiente a cada SUS, los suelos se muestrearon al azar siguiendo un patrón en zigzag, obteniéndose un promedio de 25 submuestras por parcela.

Para el muestreo de macrofauna del suelo, a partir de un transecto lineal de 40 m trazado, se extrajo un monolito de 25 x 25 x 30, se tomaron tres muestras edáficas por parcela a distintas profundidades, en total se analizaron 15 submuestras (5 x 3) haciendo un total de 45 muestras a una profundidad de 30 cm., diferenciadas por estratos sucesivos:

- 0 a 10 cm de profundidad
- 10 a 20 cm de profundidad
- 20 a 30 cm de profundidad

Las recolectas siguieron el protocolo del Tropical Soil Biology and Fertility handbook – TSBF (Anderson & Ingram, 1993).

3.4. Metodología

3.4.1. Determinar y comparar los indicadores físicos (textura, densidad aparente, resistencia a la penetración del suelo) químicos (materia orgánica, reacción del suelo o pH, nitrógeno total, fósforo disponible, potasio disponible, CIC) en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado

- Coordinación con los propietarios de los sistemas de uso

Las coordinaciones fueron realizadas con la finalidad de visitar los sistemas de uso del suelo con *Theobroma cacao* “cacao”, *Zea mays* L. “maíz”, *Citrus sinensis* “Naranja” y “Sotobosques”, en el sector Vista Alegre del centro poblado Supte San Jorge, con la finalidad de asegurar el día en que se realizará el muestreo de suelos y de los microorganismos.

- Georreferenciación de los sistemas de uso

Se georreferenciaron cuatro sistemas de uso del suelo para facilitar el trabajo de campo según la metodología del estudio.

- Muestreo de suelo de los sistemas de uso

En Vista Alegre, Supte San Jorge, se seleccionaron y analizaron sistemas de cacao (*Theobroma cacao*), maíz (*Zea mays* L.), naranja (*Citrus sinensis*) y sotobosque. Para el muestreo de suelo, se recolectaron al azar aproximadamente 25 submuestras en zigzag por sistema, utilizando una pala recta. Estas se homogenizaron, extrayéndose una muestra de un kilogramo que se envió al laboratorio de suelos de la facultad de Agronomía.

- Muestreo de la densidad aparente del suelo en los sistemas de uso

En cada punto de muestreo, se limpió un área de 40 x 40 cm y se introdujo horizontalmente un cilindro metálico en el suelo hasta su completa inserción. Tras extraer el cilindro con la muestra, se enrasaron los bordes y se trasladó al laboratorio de suelos. Se registraron las dimensiones y el peso del cilindro, así como el peso fresco de la muestra. Luego,

las muestras se secaron en estufa a 105 °C durante 72 horas, y se registró el peso seco para calcular la densidad aparente:

$$\text{Densidad aparente } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{\text{Peso del suelo seco}}{\text{Volumen del suelo}} \text{----- (1)}$$

- **Resistencia a la penetración del suelo en los sistemas de uso**

La resistencia a la penetración del suelo se midió en los mismos puntos de muestreo de la densidad aparente. En cada punto, se limpió el área, se realizó un corte en el suelo y se introdujo el penetrómetro horizontalmente en el perfil del corte. Se registraron las lecturas del penetrómetro en kg/m².

- **Determinación de los indicadores físicos y químicos del suelo en los sistemas de uso**

Se ubicaron los puntos de muestreo en cada parcela con *Theobroma cacao* “cacao”, *Zea mays* L. “maíz”, *Citrus sinensis* “Naranja” y “Sotobosques”, en el sector Vista Alegre en el centro poblado Supte San Jorge, en cada una de estas se colectaron un aproximado de 25 submuestras a lo largo de un trayecto de zigzag con la ayuda de una pala recta, cada muestra de suelo fue depositada en un costal de yute para ser homogenizada y de esta mezcla de suelo homogenizada se extrajo una muestra compuesta de un kilogramo (1 kg), la misma que fue enviada al laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, etiquetada con sus respectivas coordenadas y ubicación de la muestra.

Esta metodología garantizó que la muestra final represente adecuadamente las condiciones generales del suelo. La técnica en zigzag aseguró una distribución uniforme de las muestras, evitando sesgos ocasionados por variaciones locales específicas en el suelo.

3.4.2. Identificar y cuantificar la macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado

- **Muestreo de macrofauna**

Los puntos de muestreo se determinaron mediante un plan sistemático a lo largo de un transecto lineal de 40 m, con monolitos de 25 cm x 25 cm x 30 cm extraídos cada 10 m. Se tomaron cinco muestras por tratamiento a profundidades de hojarasca, 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm, siguiendo el protocolo del manual Tropical Soil Biology and Fertility (Anderson & Ingram, 1993) (Figura 4).

- **Colección de especies de macrofauna del suelo en los sistemas de uso**

Una vez obtenido el monolito, se desmenuzó la muestra por cada estrato, los organismos recolectados fueron preservados en soluciones de alcohol al 70% y 80%, o formol al 4% hasta 10%, según la naturaleza del cuerpo (blando o endurecido). Los envases herméticos

fueron enumerados, codificados por los tres estratos distintos y posteriormente identificados en el Laboratorio de Entomología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Mediante el uso de claves de identificación, la clasificación taxonómica se realizó a nivel de filo y orden, distinguiéndose entre insectos (Clase Insecta) y otros macroinvertebrados, como arácnidos, anélidos y moluscos. Se contabilizó el número de individuos de cada unidad taxonómica en los tres estratos distintos de los cinco monolitos (media de $5 \times 3 = 15$ submuestras).

- **Identificación y conteo de la macrofauna del suelo en los sistemas de uso**

En el laboratorio los individuos fueron cuantificados en términos de: i) abundancia (ind/m²) y densidad relativa promedio (%), ii) biomasa (g/m²) y iii) diversidad (Índice H' de Shannon-Weaver, Shannon, 1948) de cada unidad taxonómica en los sistemas de uso.

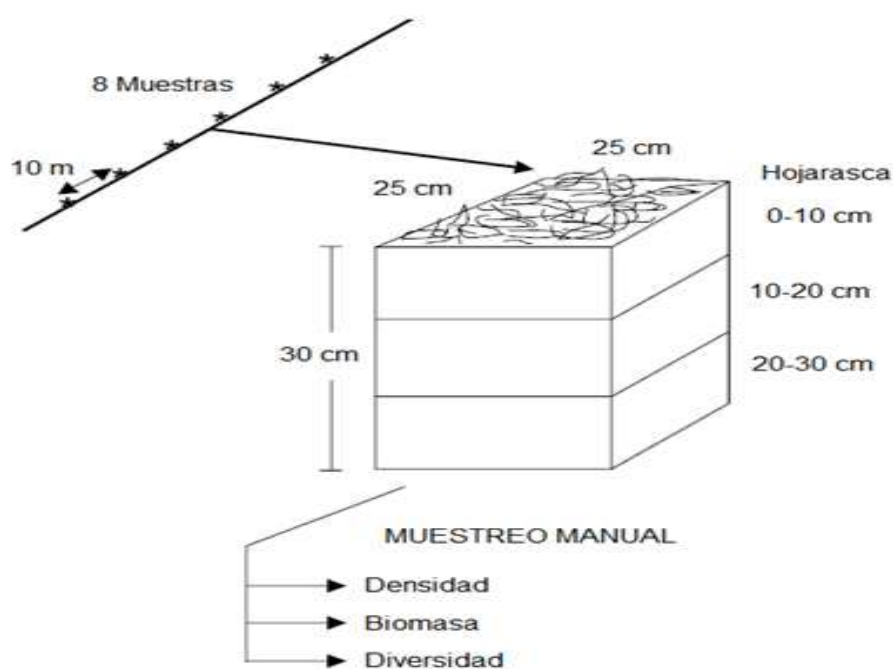


Figura 4. Diagrama de muestreo para macrofauna del suelo.

- **Conteo y estructura de macrofauna del suelo en los sistemas de uso**

Se sumó el total de los individuos por taxón en cada SUS. El conteo se expresó utilizando factores de conversión basados en el área muestreada (0.0625 m² por monolito) y para ello se utilizó un estereoscopio, para los órdenes Hymenoptera e Isoptera, se empleó un contómetro digital para asegurar precisión en el conteo.

3.4.3. Determinar la densidad (ind.m²), biomasa (g.m²) y diversidad (Índice H') de especies de macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado

Para determinar la de densidad (ind/m²), biomasa (g.m²) y Diversidad (Índice H') se ubicaron primero los puntos de muestreo, conforme lo explicado en el protocolo del Tropical Soil Biology and Fertility handbook – TSBF (Anderson & Ingram, 1993).

- **Densidad de macrofauna (número de individuos/m²)**

La densidad fue calculada multiplicando el número de individuos por muestra (cuadrados de 25 cm de lado, equivalentes a 1/16 m²) por 16 para obtener individuos/m², siguiendo la metodología de Correa (2011).

- **Biomasa de macrofauna (g.m-2)**

Se determinó pesando los individuos. Los pesos obtenidos por muestra (g/muestra) se multiplicaron por 16 para obtener g/m². Se aplicó un factor de corrección para compensar la pérdida de peso durante la fijación (19% lombrices, 9% hormigas, 11% escarabajos, 6% arañas, 13% resto de macroinvertebrados) (Correa, 2011).

- **Registro de valores**

En la Tabla 4 se presentan los métodos de determinación correspondientes a los indicadores físicos: 1) método del hidrómetro de Bouyoucos, para textura del suelo (Bouyoucos, 1962); 2) método por volumen y peso húmedo y seco, para densidad aparente (Blake & Hartge, 1986); 3) método directo (penetrómetro), para resistencia a la penetración (Herrick & Jones, 2002). Indicadores químicos: 1) prueba de Walkley y Black, para porcentaje de MO (Walkley & Black, 1934); 2) método de Kjeldahl, para porcentaje de nitrógeno total (Kjeldahl, 1883); 3) método de Olsen, para fósforo disponible (ppm) (Olsen et al., 1954); 4) método del ácido sulfúrico, para potasio disponible (kg K₂O ha⁻¹) (Pratt, 1965). Indicadores biológicos: 1) método directo para la recolección, el conteo y el pesaje de la macrofauna edáfica, para densidad de la macrofauna (Anderson & Ingram, 1993); 2) método de Shannon-Weaver, para diversidad de especies (Shannon, 1948).

Tabla 3. Métodos para la determinación de los indicadores físicos, químicos y biológicos en los SUS.

Método de determinación de indicadores físicos, químicos y biológicos				
	Textura	Densidad aparente	Resistencia a la penetración (RPS)	
Indicadores físicos	Método de Hidrómetro de Bouyoucos (Bouyoucos, 1982)	Por volumen, peso húmedo y seco (Blake & Hartge, 1986)	Método directo (penetrómetro) (Herrick & Jones, 2002)	
Indicadores químicos	Materia orgánica	Nitrógeno total	Fósforo disponible	Potasio disponible

	Método de Walkley y Blakc (Walkley & Black, 1934)	Método de Kjeldahl (Kjeldahl, 1883)	Método de Olsen (Olsen et al., 1954)	Método del ácido sulfúrico (Pratt, 1965)
	Densidad de la macrofauna	Biomasa de la macrofauna	Diversidad de especies	
Indicadores biológicos	Método directo para la recolección, el conteo y el pesaje de la macrofauna edáfica (Anderson & Ingram, 1993)		Método de Shannon - Wiener (Shannon, 1948)	

3.4.4. Correlacionar los indicadores físicos y químicos del suelo con la densidad y biomasa de macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado

Esta actividad evaluó la calidad del suelo mediante un índice basado en valores, porcentajes relativos e indicadores, siguiendo la metodología propuesta por Chen (2000), Doran y Lincoln (1999), y Porta et al. (1999).

- **Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Las muestras de suelo se recolectaron según el protocolo establecido y se analizaron (física, química y biológicamente) en el laboratorio de análisis de suelo de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, utilizando los reactivos, equipos y materiales necesarios bajo la supervisión de docentes especialistas.

3.5. Análisis de datos y métodos estadísticos

La interpretación de los datos consistió en establecer inferencias en base a los resultados de estadística descriptiva. Esta nos permitió sacar conclusiones acertadas sobre la investigación, sobre las correlaciones entre los indicadores fisicoquímicos y biológicos de los sistemas de uso del suelo.

Los cálculos estadísticos fueron realizados por medio del software de análisis estadístico Python (McKinney, 2017; VanderPlas, 2022), utilizando el entorno colaborativo Google Colab (Bisong, 2019) para el procesamiento y visualización de los datos. Se emplearon diferentes bibliotecas especializadas para análisis numérico, estadística inferencial y representación gráfica, descritas a continuación:

- **Pandas**

Esta biblioteca fue fundamental para la manipulación, estructuración y análisis de datos tabulares en formato de *DataFrame*. Se utilizó para el cálculo de promedios, totales,

porcentajes, así como para la organización y limpieza de las tablas, permitiendo una manipulación eficiente de grandes volúmenes de datos.

- **Numpy**

Utilizada tanto de forma explícita en operaciones matemáticas y vectoriales, como implícita por otras bibliotecas, facilitó cálculos como logaritmos naturales (base e), transformaciones de variables asimétricas y operaciones elementales sobre matrices numéricas.

- **Scipy.stats**

A través de la función `pearsonr`, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) y su respectivo valor p de significancia estadística. Esta biblioteca permitió evaluar el grado de asociación lineal entre variables biológicas (macrofauna edáfica) y parámetros del suelo (químicos y físicos).

- **Matplotlib.pyplot**

Se utilizó para la construcción de gráficos estadísticos, como histogramas, diagramas de caja (*boxplots*) y curvas de distribución, permitiendo representar la dispersión, la simetría y la presencia de valores atípicos (*outliers*). También se empleó para la personalización de estilos gráficos, etiquetas, ejes y colores.

- **Seaborn**

Biblioteca de visualización estadística basada en `matplotlib`, utilizada para generar el mapa de calor (*heatmap*) de correlaciones. Se implementó una paleta de colores continua y anotaciones numéricas directas en cada celda, facilitando la interpretación visual de los coeficientes de correlación entre los distintos indicadores del estudio.

3.6. Fórmulas estadísticas

- **Índice de Diversidad de Shannon-Wiener (H')**

$$H' = - \sum_{i=1}^S (p_i \times \ln \times p_i) \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

H' : Índice de Shannon-Wiener.

S : Número de especies (riqueza de especies)

$p_i = \frac{n_i}{N}$ proporción de individuos de la especie i en relación con el total.

n_i : número de individuos de la especie o abundancia de género

N : Número de todos los individuos, de todas las especies o abundancia total

de los géneros = $\sum n_i$

\ln : Logaritmo natural

La suma de $p_i \times \ln p_i$ siempre es negativa porque el logaritmo de un número entre 0 y 1 es negativo. Como el índice de diversidad debe ser positivo para tener sentido ecológico, se añade el signo negativo a la fórmula.

- **Fórmula de varianza**

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

¡El término $(x_i - \bar{x})$ representa la varianza individual de cada observación en relación con la media de la muestra! La varianza es una medida de la dispersión de los datos e indica qué tan alejados están los valores individuales con respecto a la media general.

- **Fórmula de varianza**

Se entiende que calcular la desviación estándar (DE) y el error estándar (EE) para el Índice de Diversidad de Shannon-Weaver (H') en cada sistema de cultivo (cacao, maíz, cítrico y purma), antes de proceder con la correlación de Pearson (r), contribuiría a comprender la variabilidad de la diversidad entre los distintos órdenes de la macrofauna dentro de cada sistema.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

σ → Desvío estándar (medida de dispersión de los valores respecto a la media, Valores individuales del Índice de Diversidad H').

Σ → Sumatoria de todos los valores desde $i - 1$ hasta n .

x_i → Valor individual de la muestra (valores individuales del Índice de Diversidad H' para cada orden de macrofauna en el sistema de cultivo).

\bar{x} → Media aritmética de los valores (media de H' para cada sistema de cultivo).

n → Número total de observaciones en la muestra (número total de órdenes de macrofauna en la muestra ($n = 15$ en este estudio)).

$n - 1$ → Grados de libertad de la muestra.

- **Fórmula de error estándar (EE)**

$$EP = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

EP : Error estándar de la media (indica la precisión de la estimación de la media de H).

σ : Desvío estándar (calculado previamente con la fórmula anterior).

n : Número total de observaciones en la muestra (número total de órdenes de macrofauna en la muestra ($n = 15$ en este estudio)).

\sqrt{n} : Raíz cuadrada del número de observaciones (número de órdenes de macrofauna).

- Cálculo del Boxplot

El *boxplot* (o diagrama de caja y bigotes) se basa en los cuartiles y la distribución de los datos.

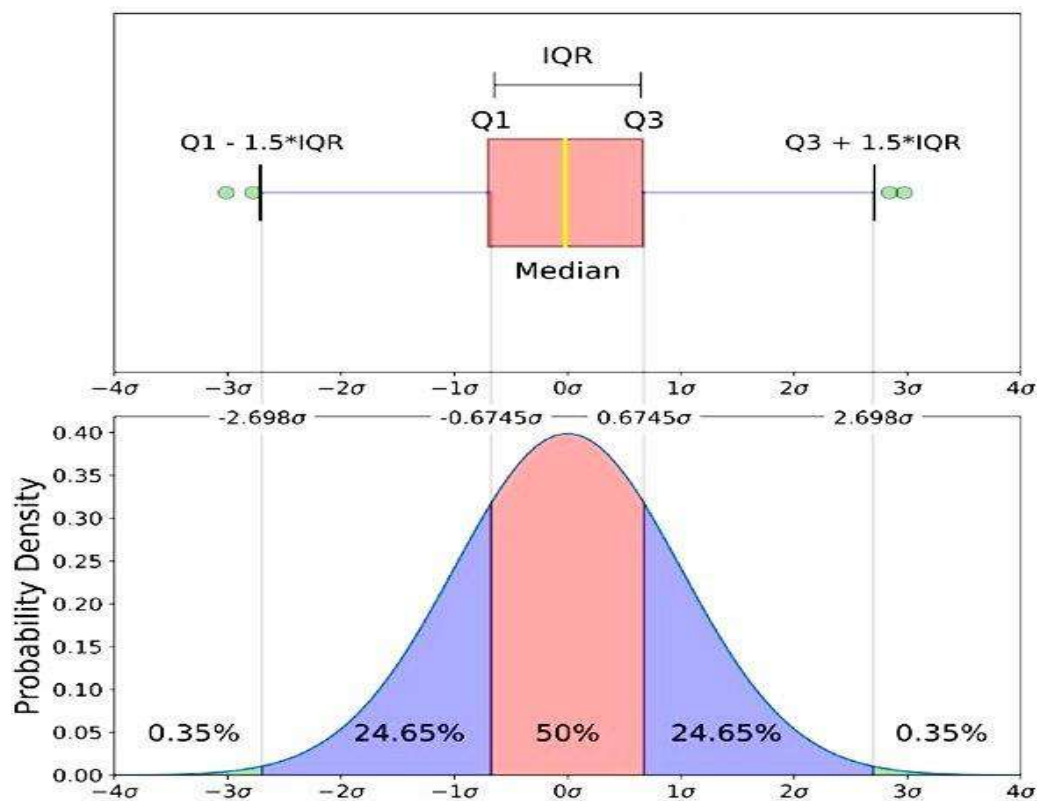


Figura 5. Comparación entre un diagrama de caja (*boxplot*) de una distribución casi normal y una función de densidad de probabilidad de una distribución normal. Fuente: Galarnyk, (2024).

La figura de caja (*boxplot*) permite visualizar la dispersión de los valores, los cuartiles, los valores medianos y posibles *outliers*. Los *outliers* son cualquier valor atípico por debajo del límite inferior o por encima del límite superior, y se representan en el gráfico como puntos aislados (pequeños círculos verdes en la parte superior de la Figura 5).

Los principales cálculos son: $Q1$ (Primer Cuartil, 25%): El valor por debajo del cual se encuentra el 25% de los datos, $Q2$ (Mediana, 50%): El valor central de los datos (punto medio de la distribución), $Q3$ (Tercer Cuartil, 75%): El valor por debajo del cual se encuentra el 75% de los datos.

El IQR (Rango Intercuartílico) mide la dispersión de los valores centrales de la distribución:

$$IQR = Q3 - Q1 \dots \dots \dots (5)$$

Los Límites para *Outliers* son dos:

$$Límite inferior: Q1 - 1.5 \times IQR \dots \dots \dots (6)$$

$$Límite superior: Q3 + 1.5 \times IQR \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

- Esta regla se basa en el intervalo intercuartílico (IQR), que representa la dispersión de los datos entre el primer cuartil (Q1, 25%) y el tercer cuartil (Q3, 75%) (Galarnyk, 2024).
- El número 1.5 en el cálculo del límite inferior y del límite superior está relacionado con la regla de Tukey para la detección de *outliers*. El factor $1.5 \times IQR$ en la regla de Tukey fue elegido empíricamente para identificar *outliers* moderados, ya que funciona bien en la mayoría de las distribuciones sin requerir suposiciones de normalidad (Galarnyk, 2024). Esta elección de $1.5 \times IQR$ proviene de la observación estadística de que, para distribuciones simétricas y aproximadamente normales, alrededor del 99.3% de los datos ($24.65\% + 50\% + 24.65\%$) están dentro del intervalo: $Q1 - 1.5 \times IQR$ a $Q3 + 1.5 \times IQR$. Esto significa que solo el 0.7% de los datos debería estar fuera de este rango, lo que permite identificar valores atípicos sin ser excesivamente sensible a pequeñas fluctuaciones.

- **Fórmula para el cálculo de coeficiente de asimetría de Fisher (Skewness)**

La asimetría de Fisher (o simplemente skewness) se calcula utilizando la fórmula estadística estándar que mide la simetría en la distribución de los datos. Para cada indicador, se aplicó la fórmula a la distribución de sus valores en los cuatro SUS: cacao, maíz, cítrico y purma.

Valores de asimetría mayores que 1 ($g_1 > 1$) o menores que -1 ($g_1 < -1$) indican distribuciones altamente asimétricas. Por ello, los indicadores con asimetría deben ser transformados antes del cálculo de las matrices de correlación.

Valores de asimetría comprendidos entre -1 y +1 ($-1 \leq g_1 \leq +1$) indican que la distribución se considera aproximadamente simétrica, sin necesidad de transformación.

$$g_1 = \left(\frac{n}{(n-1)(n-2)} \right) \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{(x_i - \bar{x})}{s} \right)^3 \dots \dots \dots (8)$$

Donde:

- g_1 o 'skew' = coeficiente de asimetría de Fisher (*skewness*)
- n = número de observaciones ($n = 4$ en este caso)
- x_i = cada valor de la muestra
- \bar{x} = media de los valores
- s = desviación estándar muestral (no poblacional).

3.7. Análisis estadístico de los datos de la investigación

La macrofauna se estudió en cuatro sistemas de uso del suelo, evaluando su distribución en cuatro estratos de profundidad (hojarasca, 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm). Se empleó un diseño con dos factores: sistema y estrato. Los datos cuantitativos de los indicadores, considerados ideales según Doran y Lincoln (1999) y Porta et al. (1999), fueron utilizados para este análisis.

- Fórmula de coeficiente de Correlación de Pearson

A fin de definir la correlación existente entre las características fisicoquímicas del suelo con la macrofauna, los datos fueron evaluados mediante el coeficiente de correlación de Pearson, a través de la siguiente expresión:

$$r = \frac{(\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))}{\sqrt{[(\sum(X_i - \bar{X})^2) * (\sum(Y_i - \bar{Y})^2)]}} \dots\dots\dots(9)$$

Donde:

- r → Coeficiente de correlación de Pearson (indica la relación lineal entre dos variables).
- X_i y Y_i → Valores individuales de las dos variables comparadas.
- \bar{X} y \bar{Y} → Media de cada variable (\bar{X} para la primera variable \bar{Y} para la segunda variable).
- $\sum(X_i - \bar{X})$ → Diferencia de cada valor de X con respecto a su media.
- $\sum(Y_i - \bar{Y})$ → Diferencia de cada valor de Y con respecto a su media.
- $L[(\sum(X_i - \bar{X})^2) * (\sum(Y_i - \bar{Y})^2)]$ → Producto de las varianzas de las dos variables, ajustado por su desviación estándar.

De acuerdo con Hernández et al. (2014), el coeficiente de correlación de Pearson (r) puede oscilar entre -1.00 y +1.00. Un valor de -1.00 denota una correlación negativa perfecta, lo cual implica que, a medida que la variable X incrementa, la variable Y disminuye proporcionalmente. En otras palabras, por cada unidad que aumenta X , Y disminuye siempre

en una magnitud constante. Este comportamiento es igualmente aplicable en sentido contrario: a medida que X disminuye, Y aumenta de forma constante.

- 0.90 = Correlación negativa muy fuerte
- 0.75 = Correlación negativa considerable
- 0.50 = Correlación negativa media
- 0.25 = Correlación negativa débil
- 0.10 = Correlación negativa muy débil
- 0.00 = No existe correlación alguna entre las variables
- +0.10 = Correlación positiva muy débil
- +0.25 = Correlación positiva débil
- +0.50 = Correlación positiva media
- +0.75 = Correlación positiva considerable
- +0.90 = Correlación positiva muy fuerte
- +1.00 = Correlación positiva perfecta

- **Fórmula de densidad relativa promedio**

$$\text{Densidad relativa promedio global (\%)} = \left(\frac{\text{Número de individuos de la orden (suma de los 4 SUS)}}{\text{Total geral de individuos en todos los SUS}} \right) \times 100$$

$$\text{Densidad relativa promedio por SUS (\%)} = \left(\frac{\text{Número de individuos de la orden}}{\text{Total geral de individuos en el SUS}} \right) \times 100$$

- **Fórmula general de RDA (Análisis de Redundancia)**

$$\hat{Y} = X * B + E \dots\dots\dots(10)$$

\hat{Y} = matriz de valores predichos de la macrofauna (respuestas biológicas)

X = matriz de variables edáficas (predictoras ambientales)

B = matriz de coeficientes estimados por regresión múltiple.

La ordenación se basa en la descomposición en autovalores de la varianza explicada por

\hat{Y}

- **Fórmula general de CCA (Análisis de Correspondencia Canónica)**

$$Y_{ij} = f e \Sigma W \alpha_i * \lambda_i * u_{ji} \dots\dots\dots(11)$$

Y_{ij} = abundancia o densidad relativa de la orden taxonómica j en sitio i

α_i = puntuación del sitio i en el eje canónico

λ_i = autovalor asociado al eje i

u_{ji} = puntuación de la orden j en el eje i

f = función de enlace (por lo general basada en la distancia chi-cuadrado)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinar y comparar los indicadores físicos (textura, densidad aparente, resistencia a la penetración del suelo) químicos (materia orgánica, reacción del suelo o pH, nitrógeno total, fósforo disponible, potasio disponible, C.I.C.) en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado

4.1.1. Indicadores físicos

La calidad del suelo está influenciada por parámetros físicos como la DA, permeabilidad, porosidad, estructura y características de los agregados, que afectan el transporte de agua, nutrientes y aire, así como las actividades de microorganismos e invertebrados. Además, regula la emergencia de las plántulas, la penetración de las raíces e influye en la erosión (Kallen et al., 1992; Vandermeer, 2011). Se han propuesto las siguientes propiedades físicas como indicadores de su calidad:

4.1.1.1. Textura del suelo

Para Tormena et al. (2002); Mustafa et al. (2020) & Tian et al (2022) manifiestan que los procesos de agregación de partículas del suelo son dinámicos y dependen de las características pedogenéticas del suelo, como el material de origen, la textura, el relieve, y también están fuertemente influenciados por las condiciones de uso y manejo. Los valores encontrados de la textura del suelo en todos los sistemas de uso fueron francos (tabla 4 y figura 7). Por lo que Crespo (1999) manifiesta que un suelo óptimo es aquel que brinda las condiciones adecuadas para que las raíces de las plantas puedan crecer libremente, buena aireación, excelente drenaje, buena retención de humedad y nutrientes. Considerando en la investigación que estos suelos son óptimos debido a que brinda las condiciones adecuadas a estos sistemas de uso.

Tabla 4. Textura del suelo de los sistemas de uso (SUS).

Sistema de Uso del Suelo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura
Cacao	35	35	37	Franca
Maíz	33	24	43	
Cítrico	34	27	38	
Purma	37	24	39	
Promedio	35	25	40	Franca
Desviación estándar	2.01	1.82	2.66	-----
Coefficiente variación	5.77	7.23	6.67	-----

Los indicadores de calidad del suelo se clasifican generalmente en químicos, físicos, biológicos y visuales (Angulo & Reyes, 2015). La figura 6 muestra la proporción de arena, limo y arcilla, que define la textura del suelo en los sistemas de uso del suelo del caserío Vista Alegre, Supte San Jorge.

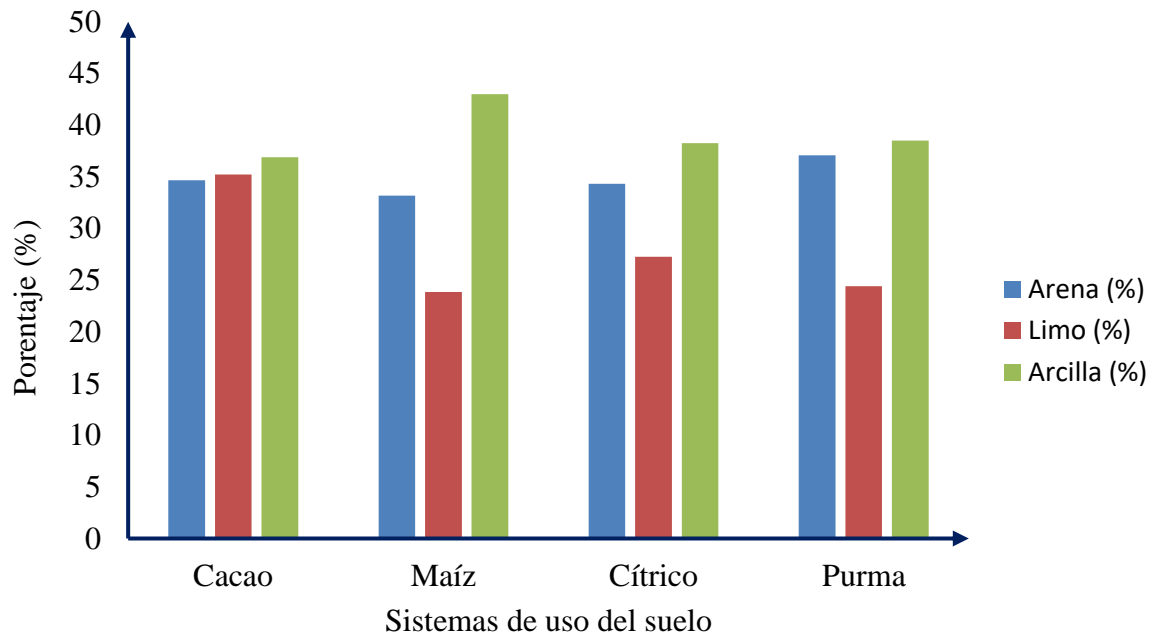


Figura 6. Proporción de arena, arcilla y limo en los sistemas de uso del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge.

4.1.1.2. Densidad aparente del suelo

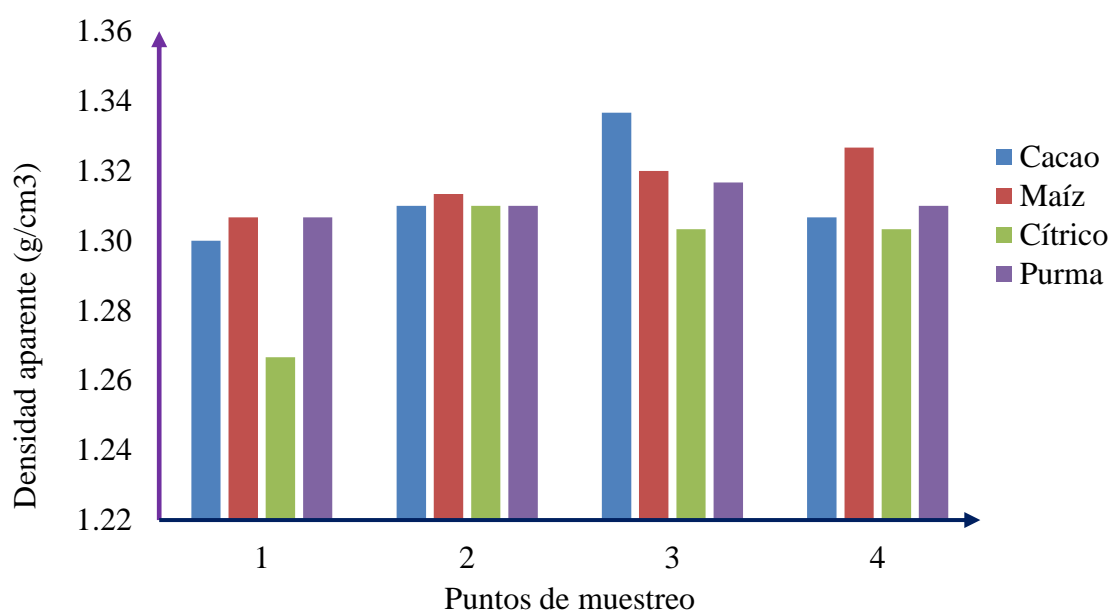
Para Navarro (2003) los valores bajos de DA del suelo son asociados como una condición adecuada para el desarrollo de los cultivos. Mientras que Martínez & Aguilera (1996) mencionan que los valores de DA se incrementan en relación con la profundidad del suelo, causado por la reducción de los niveles de MO, sumada a la menor agregación e incremento de la compactación del suelo. En ambos casos se coincide con los autores ya que la DA del suelo de los cuatro sistemas de encuentran 1.30 el cítrico, cacao con purma con 1.31, mientras que el maíz presenta una densidad aparente de 1.32 y todos estos sistemas de uso son aptos para el desarrollo de cualquier cultivo.

La compactación es un problema actual que enfrentan los sistemas agrícolas (degradación del suelo). La compactación genera el aumento de la densidad, la reducción de la porosidad total y cambios en las propiedades hidráulicas del suelo (Voltr et al., 2021). Coincidiendo con el autor ya que en la investigación la densidad aparente de los cuatro sistemas de uso no presenta cambios ni aumento de compactación. Tabla 5.

Tabla 5. Densidad aparente (g/cm^3) del suelo en los sistemas de uso (SUS).

Muestreo	Cacao	Maíz	Cítrico	Purma
1	1.30	1.31	1.27	1.31
2	1.31	1.31	1.31	1.31
3	1.34	1.32	1.30	1.32
4	1.31	1.33	1.30	1.31
Promedio	1.31	1.32	1.30	1.31
Desviación estándar	0.02	0.01	0.02	0.00
Coefficiente variación	1.23	0.65	1.52	0.32

Navarro, (1994) indica que los valores de DA del suelo varían de 1.0 g/cm^3 para suelos de características arcillosos, orgánicos y de buena estructuración, hasta 1.8 g/cm^3 para suelos arenosos. En la figura 7 se muestran los resultados de la densidad aparente de los cuatro sistemas de uso del suelo del caserío Vista Alegre, sector Supte San Jorge.

**Figura 7.** Densidad aparente del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge.

4.1.1.3. Resistencia a la penetración del suelo (RPS)

Navarro (2003) define que la resistencia mecánica a la penetración del suelo no es más que la fuerza que el suelo ejerce al ser introducido por una herramienta de sondeo mecánico (penetrómetro), su valor es determinado por un índice integrado de medición de la compactación del suelo, contenido de humedad, textura, tipo de la fracción de arcilla mineral, niveles de MO, y estructura del suelo.

Para Conte et al. (2011), la compactación del suelo puede agravarse cuando el suelo tiene humedad en el rango más favorable para la deformación plástica, lo cual

ocurre justo por encima de su límite de friabilidad. Las presiones ejercidas por los neumáticos agrícolas pueden expresarse de forma más profunda en el perfil del suelo, ya que la profundidad de acción de esta presión es directamente proporcional al área de contacto con el suelo e inversamente proporcional a la resistencia del suelo (Conte et al., 2011; Mileusnić et al., 2022; Zhang et al., 2024). Los sistemas de uso de la investigación no presentan problemas de compactación ya que no fueron instalados mecanizadamente.

Tabla 6. Resistencia a la penetración (kg/cm^2) del suelo en los sistemas de uso (SUS).

Muestreo	Cacao	Maíz	Cítrico	Purma
1	1.67	1.81	1.64	1.64
2	1.68	1.79	1.59	1.59
3	1.72	1.74	1.67	1.67
4	1.80	1.74	1.66	1.66
Promedio	1.72	1.77	1.64	1.64
Desviación estándar	0.06	0.03	0.04	0.04
Coefficiente variación	3.66	1.81	2.32	2.32

Para Asabe (2008) indica que uno de los instrumentos con mayor uso para medir la resistencia a la penetración del suelo es el penetrómetro de punta fina, muestra valores enfocados al índice de dureza del suelo, conocido comúnmente como índice de cono (IC) definida como aquella fuerza por unidad de área de base cónica útil para empujar la herramienta pasando de un ligero incremento específico de profundidad. La figura 8 muestran los valores de la resistencia la penetración mecánica del suelo de los cuatro sistemas de uso del caserío Vista Alegre, sector Supte San Jorge.

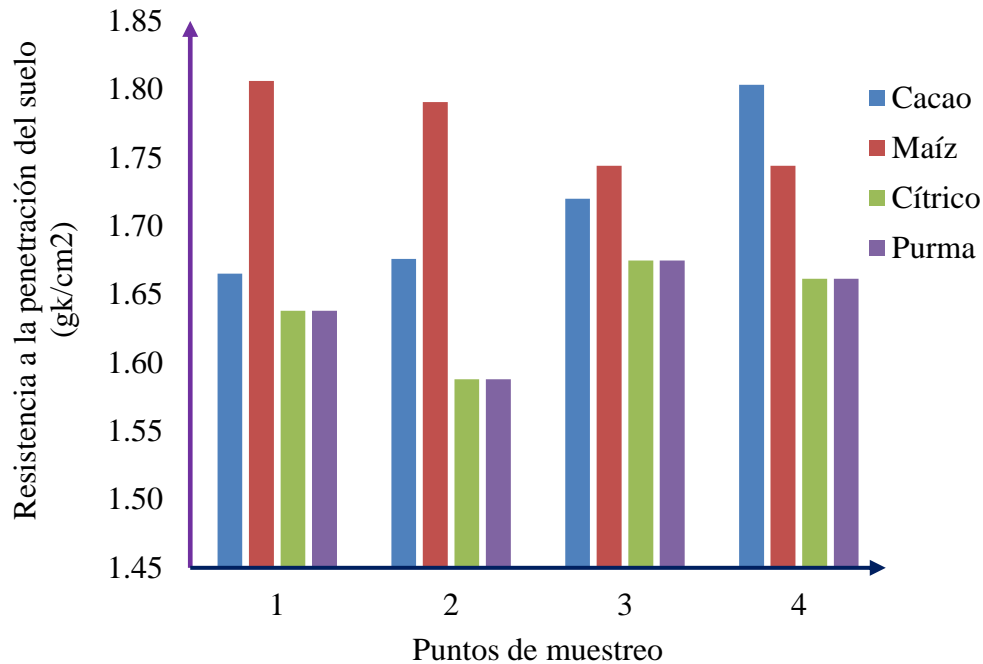


Figura 8. Resistencia a la penetración del suelo (RPS) en el centro poblado, Supte San Jorge.

4.1.2. Indicadores químicos

Sillero y otros. (2020) definieron la calidad química del suelo en función de sus efectos sobre las interacciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad de amortiguación y la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y los microorganismos. Los indicadores clave incluyen la disponibilidad de nutrientes, el C orgánico total y volátil, el pH, CE, la capacidad de absorción de fosfato, la CIC y la dinámica de la MO y el N (total y mineralizable). Este estudio se centró en determinar el pH, MO, N, CE, P y K y la CIC.

4.1.2.1. El pH del suelo

SAGARPA (2012) menciona que el pH es crucial porque afecta la solubilidad de los minerales, los cuales solo están disponibles para las plantas cuando se encuentran disueltos en la solución del suelo y el recomendable para el desarrollo y crecimiento óptimo se encuentra entre los niveles 6.5 y 7.5, mientras que los suelos encontrados en niveles de pH 5.8 a 7.5 tienen mayor probabilidad de generar problemas que aquellos con valores altos o bajos, en la investigación los valores del pH promedio se encuentran en niveles de 5.28 a 5.76.

Tabla 7. El pH del suelo en los sistemas de uso (SUS).

Muestreo	Cacao	Maíz	Cítrico	Purma
1	5.67	5.76	5.28	5.56
2	5.61	5.52	5.26	5.53

3	5.60	5.72	4.42	4.97
4	5.63	5.82	3.52	4.38
Promedio	5.63	5.71	4.62	5.11
Desviación estándar	0.03	0.13	0.84	0.56
Coefficiente de variación	0.55	2.24	18.14	10.88

Para Fasbender & Bornemisza (1987) manifiestan que los suelos que muestran valores de pH iguales o menores a 5.0, muestran que poseen deficiencia en elementos como calcio, magnesio e hidrogeno, asimismo pueden contener aquellos elementos tóxicos como zinc, aluminio, níquel, entre otros. En la figura 9 se muestran los valores de pH de los cuatros sistemas de uso.

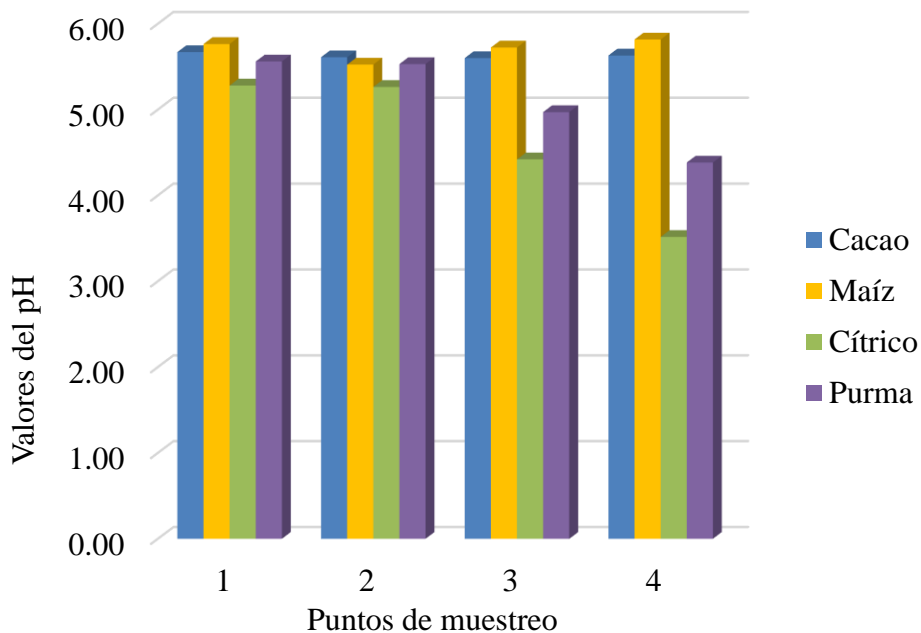


Figura 9. Valores de pH del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge.

4.1.2.2. Materia orgánica del suelo

Navarro (2003) indica que los especialistas no coinciden con el concepto de materia orgánica o humus, por lo general, el vocablo humus distingue a aquellas sustancias orgánicas transformadas, cuyas características son de color pardo y negruzco, resultantes de la descomposición de material orgánico exclusivamente de origen vegetal”. Contiene cerca del 5% de nitrógeno. Los niveles de materia orgánica alto, medio y bajo deberán ser considerados acorde a los requerimientos del cultivo y de acuerdo con la zona donde se encuentre. En la investigación los niveles de MO en los cuatro sistemas de uso se encuentran en promedio entre los niveles de medio a bajo. Para Triloni *et al.* (2012); Lal (2020) & Mesele *et al.* (2024) la materia orgánica del suelo (MOS) es el indicador ideal de la calidad del suelo

debido a su importancia en los etapas físicas, químicas y biológicas que ocurren en el suelo. Mientras que Passos et al. (2007); Lal et al (2020) & Mesele et al. (2024) mencionan que la materia orgánica está compuesta por seres vivos y no vivos. Los primeros son las raíces, la fauna y los microorganismos del suelo. Los componentes no vivos incluyen materia orgánica macro (residuos de plantas en descomposición, sustancias humificadas y no humificadas).
Tabla 8.

Tabla 8. Materia orgánica del suelo en los sistemas de uso (SUS).

Muestreo	Cacao	Maíz	Cítrico	Purma
1	1.79	3.81	1.70	1.46
2	2.13	3.80	1.68	1.45
3	2.04	3.78	1.63	1.44
4	2.02	3.70	1.60	1.44
Promedio	2.00	3.77	1.65	1.45
Desv. estándar	0.14	0.05	0.05	0.01
Coef. variación	7.17	1.35	2.75	0.71

Díaz et al. (2008), la estratificación de la MO entre 0-10 y 10-20 cm evalúa el manejo del suelo a largo plazo. Sin embargo, en esta investigación, las muestras de los cuatro sistemas de uso del suelo se recolectaron a una profundidad de 0 a 30 cm (Fig. 10).

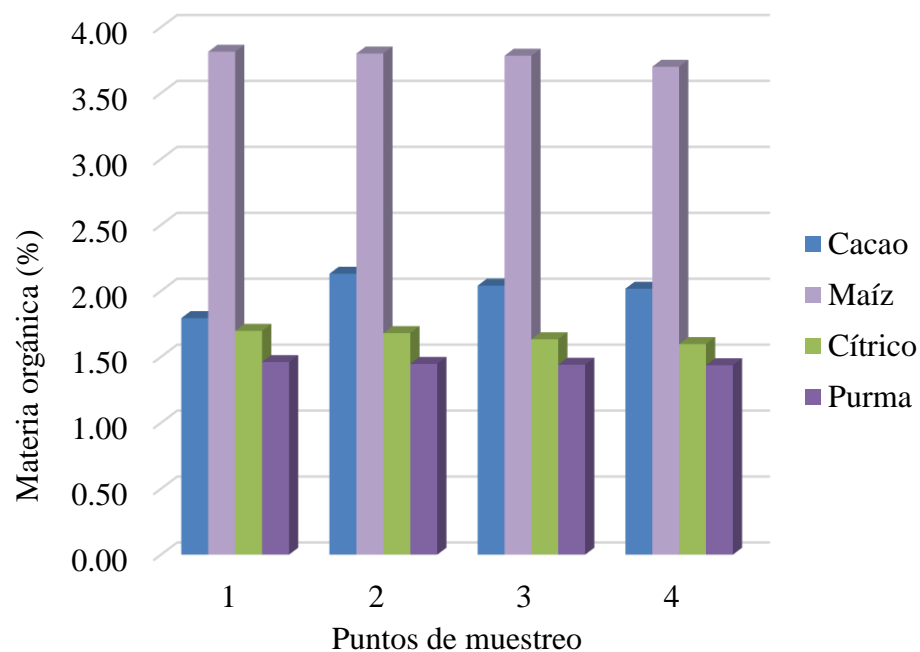


Figura 10. Valores de materia orgánica del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge.

4.1.2.3. El nitrógeno total del suelo

Gran parte del N mineral en los suelos forman parte de la MO depositada posterior a la muerte de microorganismos y plantas, bajo esta forma, la planta no

puede aprovechar este elemento (Navarro, 2003). En la investigación los niveles de nitrógeno son bajos. Tabla 9.

Tabla 9. Nitrógeno total del suelo en los sistemas de uso (SUS).

Muestreo	Cacao	Maíz	Cítrico	Purma
1	0.10	0.15	0.08	0.08
2	0.07	0.08	0.07	0.06
3	0.07	0.06	0.06	0.06
4	0.05	0.05	0.07	0.06
Promedio	0.07	0.08	0.07	0.06
Desv. estándar	0.02	0.05	0.01	0.01
Coef. variación	28.84	54.08	9.25	14.10

El nitrógeno es un elemento muy dinámico en el suelo, sensible a las prácticas de manejo. La investigación sobre el efecto del manejo orgánico y convencional en el nitrógeno es inconsistente, con algunos estudios que no encuentran diferencias y otros que sí (Cristóbal-Acevedo et al., 2011). La figura 11 muestra los valores de nitrógeno para los cuatro sistemas de uso.

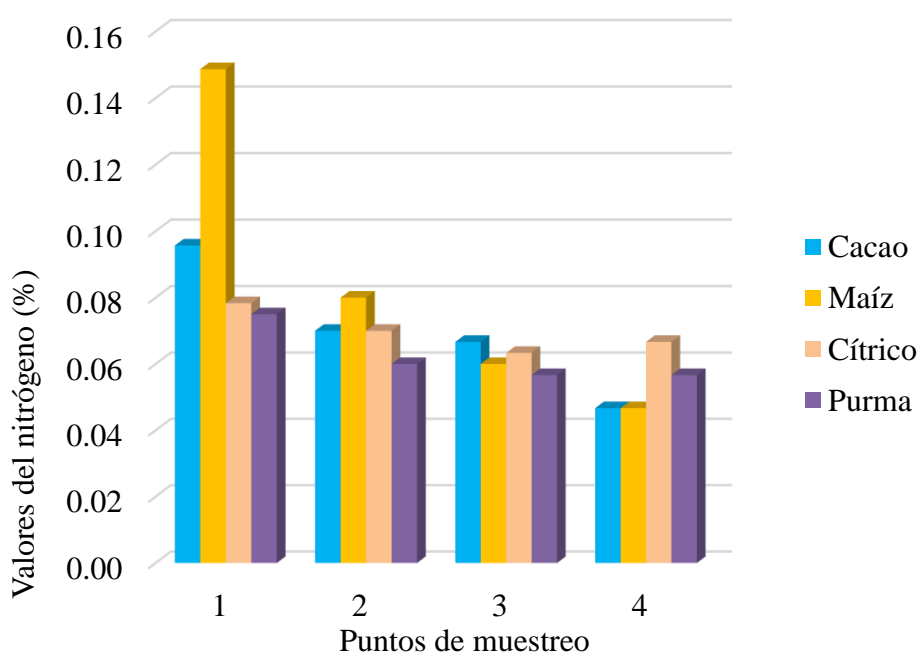


Figura 11. Valores de nitrógeno total del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge.

4.1.2.4. El fósforo disponible del suelo

Para Navarro (2006) es un macroelemento que genera mayor limitante en el crecimiento y desarrollo del cultivo, participando en muchos procesos bioquímicos a nivel celular, su entrada a las plantas se da a través de fertilizantes fosfatados, y su salida puede darse en la producción de frutos, escurrimiento, erosión, y lixiviación, siendo

esta última de escasa importancia. En la investigación el fósforo disponible se encuentra en niveles de medio a bajo. Tabla 10.

Tabla 10. Fósforo disponible del suelo en los sistemas de uso (SUS).

Muestreo	Cacao	Maíz	Cítrico	Purma
1	11.86	11.23	6.84	5.75
2	11.76	11.22	6.78	5.75
3	11.70	11.22	6.83	5.76
4	11.73	11.24	6.82	5.78
Promedio	11.76	11.22	6.82	5.76
Desviación estándar	0.07	0.01	0.03	0.01
Coefficiente de variación	0.58	0.08	0.40	0.25

Fassbender & Bornemisza (1987) indica que el contenido de P total en los suelos parece ligarse con el contenido de MO y con su evolución pedológica.

El P es un nutriente primario a menudo limitante en la producción agrícola, requerido por los cultivos en cantidades relativamente grandes. Su concentración total en los cultivos varía de 0,1 a 0,5% (Munera y Meza, 2012). La figura 12 muestra los valores de fósforo disponible en cuatro sistemas de uso del suelo del caserío Vista Alegre, sector Supte San Jorge.

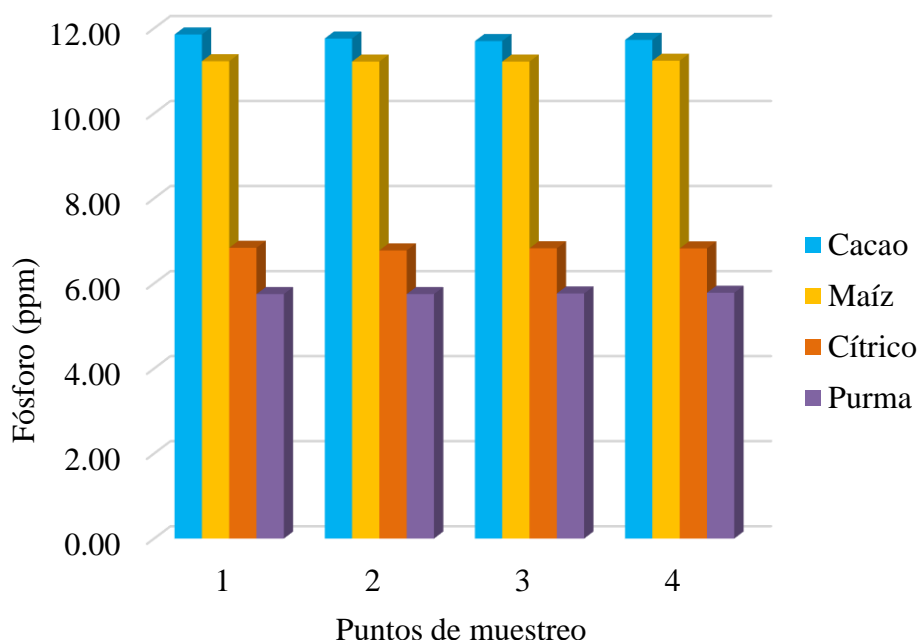


Figura 12. Valores de fósforo disponible del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge.

4.1.2.5. El potasio disponible del suelo

Fassbender (1984), aunque el potasio total en el suelo es relativamente abundante y su contenido (como K_2O) varía según la textura, la solución del suelo contiene solo

una pequeña fracción de este. En esta investigación, los niveles de potasio fueron bajos en los cuatro sistemas de uso del suelo. Tabla 11.

Tabla 11. Potasio disponible del suelo en los sistemas de uso (SUS).

Muestreo	Cacao	Maíz	Cítrico	Purma
1	82.54	123.34	212.13	133.64
2	82.51	123.35	212.11	133.62
3	82.22	123.33	212.10	133.62
4	82.51	123.32	212.09	133.62
Promedio	82.44	123.34	212.11	133.63
Desv. estándar	0.15	0.01	0.02	0.01
Coef. variación	0.18	0.01	0.01	0.01

El potasio es el catión más importante en la fisiología vegetal debido a su concentración en los tejidos y sus múltiples funciones esenciales, tales como, la translocación de azúcares, formación de almidón, regulación estomática, resistencia fitosanitaria y optimización de la calidad de las cosechas (Navarro y Navarro, 2013; Taiz et al., 2015). El efecto favorable del suministro del potasio al suelo resulta cuando sus tenores en el suelo son bajos (Havlin et al., 2014). Coincidiendo con el autor ya en la figura 13 de muestran los niveles bajo de potasio disponible del suelo de los cuatro sistemas de uso.

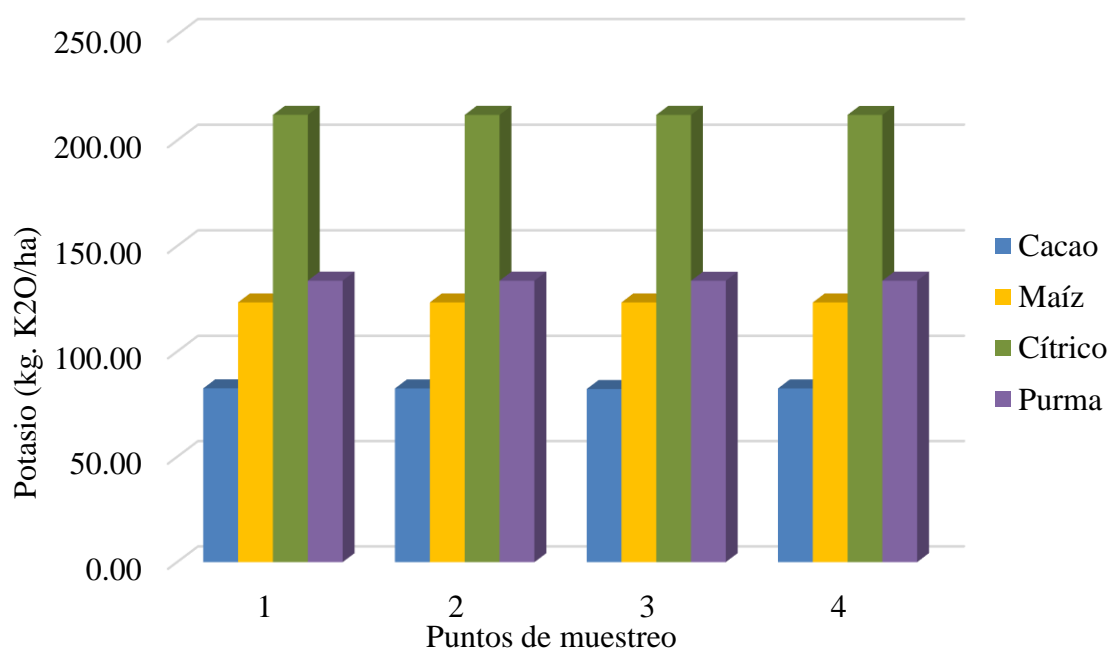


Figura 13. Valores de potasio disponible del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge.

4.1.2.6. Capacidad de intercambio del suelo (CIC)

Según Arévalo y Gauggel (2014), la CIC es agrónomicamente importante porque el suelo actúa como reserva de nutrientes, y una mayor CIC permite un mayor depósito

de iones nutritivos, facilitando así la absorción de nutrientes esenciales por las raíces. En esta investigación, solo el cacao y el maíz mostraron una CIC baja. Tabla 12.

Tabla 12. Capacidad de intercambio del suelo (CIC) en los sistemas de uso (SUS).

Muestreo	Cacao	Maíz	Cítrico	Purma
1	5.53	6.68	0.00	0.00
2	5.52	6.66	0.00	0.00
3	5.50	6.60	0.00	0.00
4	5.46	6.58	0.00	0.00
Promedio	5.50	6.63	0.00	0.00
Desv. estándar	0.03	0.04	0.00	0.00
Coef. variación	0.58	0.67	0.00	0.00

Fassbender & Bornemisza (1987) señalan que la CIC es mayor en suelos de textura fina y menor en suelos de textura gruesa. Esto se debe a la escasez de arcilla coloidal y humus en las arenas y margas arenosas, lo que establece una relación directa entre la textura del suelo y su CIC. La figura 14 muestra los valores de CIC para los cuatro sistemas de uso del suelo en el caserío Vista Alegre, sector Supte San Jorge.

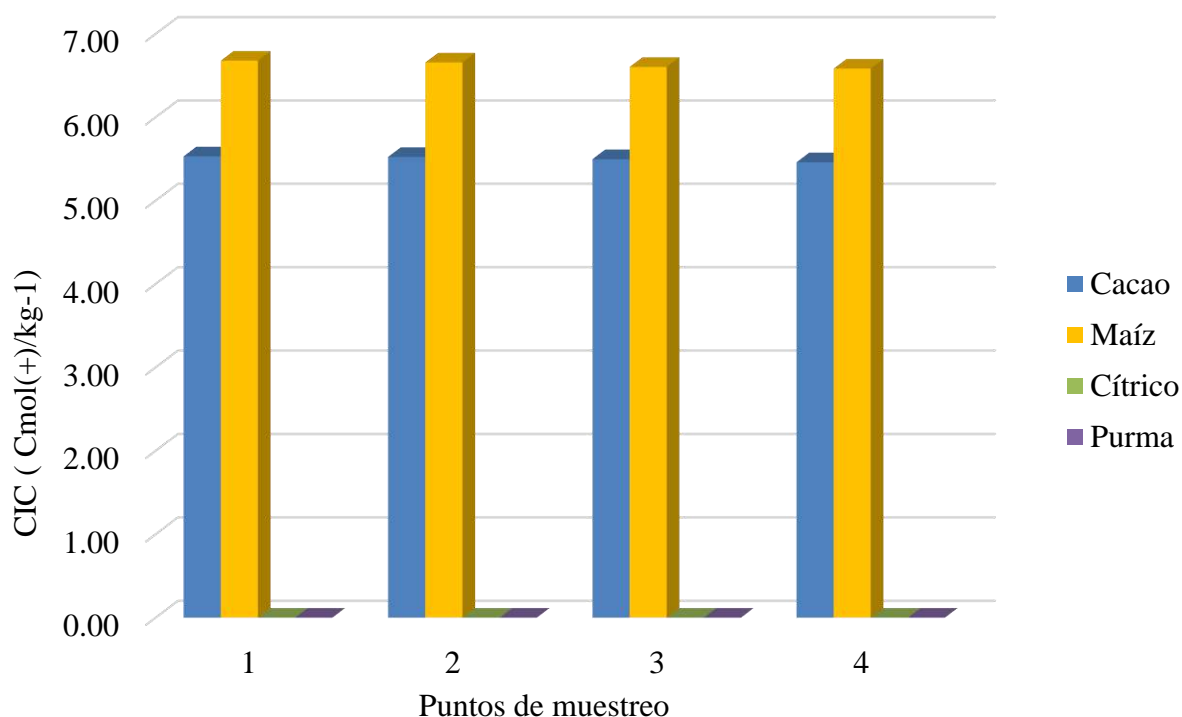


Figura 14. Valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo en el centro poblado, Supte San Jorge.

4.2. Identificar y cuantificar la macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado

Con base en una caracterización fisicoquímica previa de los cuatro SUS, se diseñó el presente muestreo integrado para evaluar las relaciones funcionales entre atributos del suelo y la macrofauna edáfica. Cabrera (2014) sugiere que la cuantificación de variables biológicas permite indicar la tendencia del suelo a ganar o perder materia orgánica y, por ende, reflejar rápidamente el efecto de cambios y prácticas de manejo. Estos cambios suelen afectar la población microbiana, aunque algunos estudios no han encontrado diferencias significativas.

Para evaluar la macrofauna como indicador biológico en los SUS, se determinaron variables físicas, químicas y biológicas, recolectadas en los cuatro SUS (cacao, maíz, cítrico y sotobosque).

4.2.1. Análisis de la diversidad y abundancia de la macrofauna del suelo

La abundancia total (ind/m²) representa la biomasa o actividad biológica directa, y proporciona una visión clara de la cantidad de organismos presentes, lo cual resulta fundamental para funciones ecológicas como la aireación del suelo, el ciclado de nutrientes y la fragmentación de la MO. Constituye un excelente medidor del estado de salud o de degradación del suelo. Peña (2016) menciona que los microorganismos del suelo son responsables de la mayor parte de la liberación de nutrientes a partir de materia orgánica. Tabla 13 y figura 15 y 16.

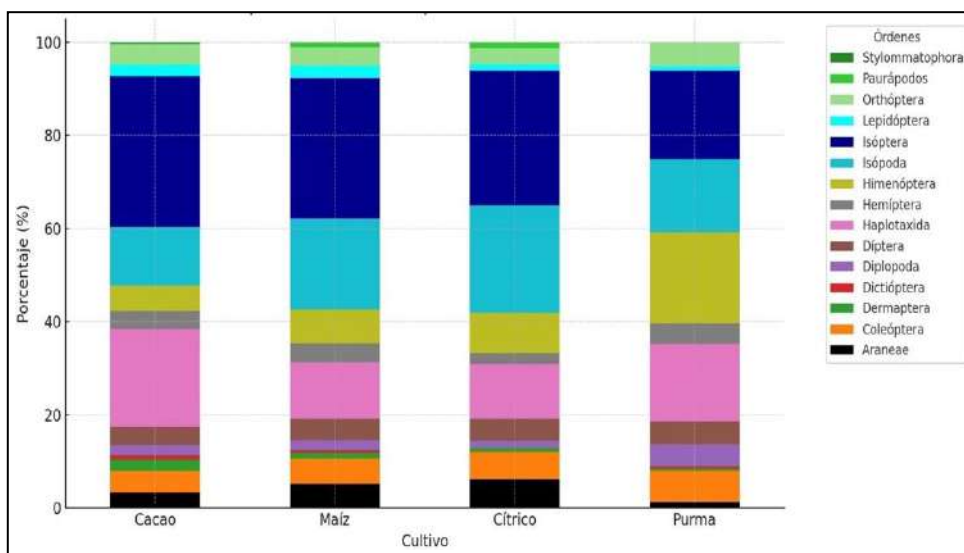


Figura 15. Proporción de individuos por orden en cada sistema de uso (SUS) en el centro poblado, Supte San Jorge.

Tabla 13. Análisis de la abundancia total (ind/m²) de la macrofauna del suelo en los sistemas de uso (SUS).

Individuos (m2)	Filo	Orden	Sistemas de uso del suelo				
			Caca o	Maí z	Cítric o	Purm a	Tota l
Arañas		Araneae	38	51	51	19	159
Escarabajos	Arthropod a	Coleóptera	56	53	49	105	263
Tijeras		Dermaptera	29	13	7	8	57
Cucarachas		Dictióptera	10	5	0	6	21
Milpiés	Annelida	Diplopoda	26	22	13	75	136
Moscas y mosquitos		Díptera	46	45	39	76	206
Lombrices de tierra		Haplotaxida	250	120	98	258	726
Chinches y salta hojas		Hemíptera	45	40	19	69	173
Hormigas		Himenóptera	64	72	72	303	511
Cochinillas	Arthropod a	Isópoda	149	192	192	245	778
Termitas		Isóptera	382	300	241	295	1218
Oruga		Lepidóptera	30	25	11	15	81
Grillos		Orthóptera	52	40	29	79	200
Miriápodos minúsculos		Paurápodos	3	10	10	0	23
Caracoles y babosas	Mollusca	Stylommatóphor a	2	0	0	0	2
Total			1182	988	831	1553	4554

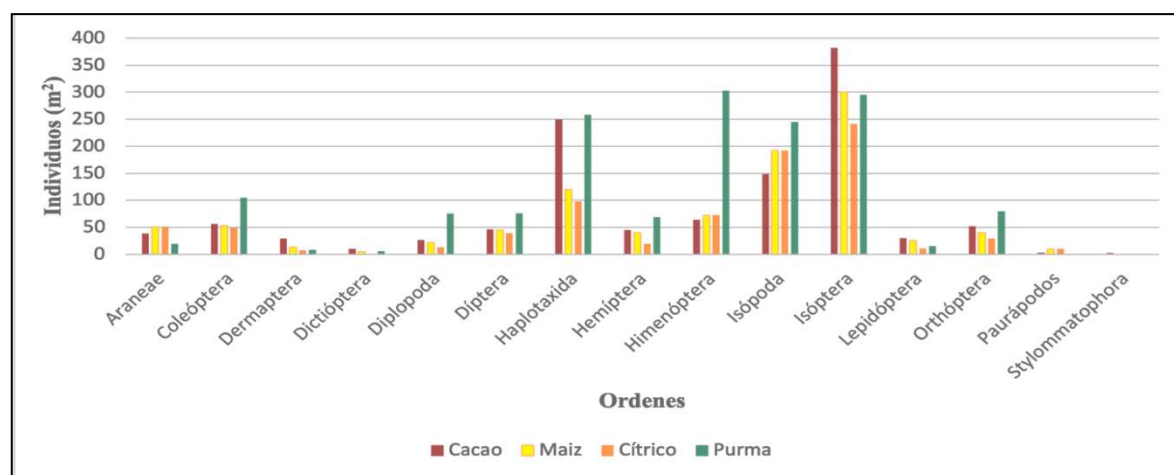


Figura 16. Análisis visual de la distribución de grupos de macrofauna en el suelo según cada SUS en el centro poblado, Supte San Jorge.

4.3. Determinar la densidad (ind.m²), biomasa (g.m²) y diversidad (Índice H') de especies de macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado

4.3.1. Densidad de macrofauna presente en los cuatro sistemas de uso del suelo

En la tabla 14 se muestran la densidad de la macrofauna donde la purma como sistema de uso del suelo registró mejor valor presentando 1553 (ind.m⁻²), seguido del sistema cacao con 1182 (ind.m⁻²) y menor valor respecto a la presencia de macrofauna lo presentaron los sistemas maíz 988 (ind.m⁻²) y cítrico 861 (ind.m⁻²). Correia y Oliveira (2000, citado por Valdez, 2016) indican que la densidad (ind/m⁻²) se calcula multiplicando por 16 los datos obtenidos en cada punto de muestreo, donde se utiliza un cuadrado de 0,25 m x 0,25 m (1/16 m²).

Tabla 141. Densidades de macrofauna edáfica en los diferentes sistemas de uso.

Cultivos	Densidad (ind.m ⁻²)
Cacao	1182
Maíz	988
Cítrico	861
Purma	1553

4.3.2. Biomasa de macrofauna presente en los cuatro sistemas de uso del suelo

Cárdenas, (2008) manifiesta que la riqueza y biomasa de los macroinvertebrados cambia fundamentalmente según el aprovechamiento de la materia orgánica (tratamiento) y la profundidad (capas), mayores poblaciones y biomasa se presentan en la capa superficial (hojarasca y 0-10 cm). Para el caso de la biomasa, se reporta mayor peso de la macrofauna con 506.34 (g.m²), seguido de cacao con 478.83 (g.m²) y en menor cantidad el sistema de uso maíz 251.28 (g.m²) y cítrico 201.32 (g.m²) respectivamente, cpincidiendo con el autor ya que en la investigación mayor densidad de macrofauna se encintraron dentro de los primeros 10 cm de profundidad (Tabla 15).

Tabla 152. Biomasa de macrofauna edáfica en los diferentes sistemas de uso.

Cultivos	Biomasa (g.m ⁻²)
Cacao	478,83

Maíz	251,28
Cítrico	201,32
Purma	506,34

4.3.3. Diversidad de especies de macrofauna

Por otro lado, el Índice de Diversidad (H') de Shannon-Weaver (Tabla 16) representa un valor ponderado de diversidad ($p * \log p$), es decir, la proporción relativa de individuos por orden multiplicada por el logaritmo de su propio valor (Anexos 17–20). Este índice considera cuántas órdenes diferentes existen (riqueza) y cuán equilibrada es la distribución entre ellas (equidad), midiendo la diversidad, y no la cantidad, por lo tanto.

Un valor alto de H' puede darse incluso con baja abundancia, siempre que las órdenes estén bien distribuidas. Por ejemplo, dos suelos pueden presentar el mismo valor de H' , aunque uno de ellos tenga el doble de individuos que el otro. Franco (1989) señala que, si bien existen numerosos índices para estimar la diversidad comunitaria, los basados en la teoría de la información, como el índice de Shannon-Wiener ajustado por Equitatividad y el índice de Heterogeneidad de Simpson, han ganado mayor relevancia a pesar de sus limitaciones.

La elección de utilizar tanto el Índice de Diversidad (H') (Tabla 16) como los datos de abundancia (ind/m²) (Tabla 14) se justifica en que representan aspectos distintos y complementarios de la macrofauna del suelo.

En un estudio comparativo entre dos praderas naturales, una irrigada con aguas residuales crudas (SIRWW) y otra con aguas residuales tratadas (SITWW), Ababsa et al. (2023) evaluaron la abundancia (densidad), biomasa y diversidad de comunidades de lombrices de tierra. Se registraron 459 individuos pertenecientes a dos familias y siete especies. La mayor densidad y riqueza de especies se observó en SIRWW, con *Nicodrilus caligenus* como especie más abundante. En SITWW, la mayoría de los parámetros comunitarios disminuyeron significativamente. Solo dos especies fueron comunes entre ambos sitios, mientras que cuatro especies se registraron exclusivamente en SIRWW y una en SITWW. En SIRWW se identificaron tres grupos ecológicos (epigeas, endogeas y anécticas), con predominio de endogeas. Los resultados destacan la relación entre la abundancia y diversidad de lombrices con la actividad biológica del suelo, señalando la necesidad de estudios adicionales sobre la contaminación del suelo y la bioacumulación en organismos edáficos.

Tabla 16. Índice de diversidad de Shannon-Wiener (H') para los diferentes SUS.

Orden	Índice de Diversidad (H') Cacao	Índice de Diversidad (H') Maíz	Índice de Diversidad (H') Cítrico	Índice de Diversidad (H') Purma
Araneae	-0.05	-0.06	-0.06	-0.03
Coleóptera	-0.06	-0.06	-0.06	-0.09
Dermaptera	-0.04	-0.02	-0.01	-0.01
Dictióptera	-0.02	-0.01	0.00	-0.01
Diplopoda	-0.04	-0.03	-0.02	-0.08
Díptera	-0.05	-0.05	-0.05	-0.08
Haplotaxida	-0.14	-0.10	-0.09	-0.14
Hemíptera	-0.05	-0.05	-0.03	0.00
Himenóptera	-0.07	-0.07	-0.07	-0.15
Isópoda	-0.11	-0.13	-0.13	-0.14
Isóptera	-0.16	-0.15	-0.14	-0.15
Lepidóptera	-0.04	-0.04	-0.02	-0.02
Orthóptera	-0.06	-0.05	-0.04	-0.08
Paurápodos	-0.01	-0.02	-0.02	0.00
Stylommatóphora	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	-0.91	-0.84	-0.74	-0.99

En un análisis de correlación, el índice H' puede correlacionarse con parámetros como el pH o la capacidad de intercambio catiónico (CIC), que influyen en la diversidad. Por su parte, la abundancia tiende a correlacionarse más con variables como la materia orgánica, la humedad o la resistencia del suelo, que afectan la presencia masiva de organismos.

Contar con ambos conjuntos de estadísticas (H' y abundancia) permite establecer correlaciones diferenciadas con los parámetros fisicoquímicos y evaluar de manera más precisa el impacto de los sistemas de cultivo en relación con la salud del suelo. De este modo, el análisis adquiere mayor solidez y respaldo científico.

4.4. Correlacionar los indicadores físicos y químicos del suelo con la densidad y biomasa de macrofauna del suelo en los sistemas de uso en el centro poblado, Supte San Jorge, provincia Leoncio Prado

4.4.1. Estadísticas descriptivas de abundancia y diversidad

Antes de realizar la correlación de los indicadores biológicos (macrofauna edáfica) con los parámetros fisicoquímicos del suelo, es fundamental asegurar que se cuente con todas las estadísticas necesarias.

Las tablas de estadísticas descriptivas para la abundancia de macrofauna edáfica (ind/m²) (Tabla 14) y el Índice de Diversidad de Shannon-Weaver (H') (Tabla 17) permitieron caracterizar la variabilidad biológica presente en los diferentes sistemas de uso del suelo (Cacao, Maíz, Cítricos y Purma). Estas estadísticas incluyeron los cuartiles (Q1 y Q3), el rango intercuartílico (IQR), los límites inferior y superior, así como los valores atípicos (outliers) para la abundancia (Tabla 14) y el índice H' (Tabla 16), lo que facilitó una interpretación más detallada de la dispersión de los datos.

En el estudio de Köninger et al. (2023) los diagramas de caja (boxplots) fueron fundamentales para visualizar la dispersión y la variabilidad en la diversidad y abundancia de eucariotas del suelo entre distintos tipos de ecosistemas a escala continental. Esta herramienta permitió identificar patrones de heterogeneidad en la composición de comunidades, facilitando la comparación entre sistemas de uso del suelo como cultivos anuales, pastizales y bosques. Los boxplots también evidenciaron la homogeneidad o variabilidad interna de cada grupo, destacando diferencias significativas en la riqueza y estructura comunitaria. Su uso fue clave para interpretar los resultados del análisis de dispersión (PERMDISP) y reforzar la relación entre los factores ambientales de largo plazo y la configuración de las comunidades eucarióticas del suelo.

En otro estudio de Nkohla & Dlaza (2025), los diagramas de caja (boxplots) fueron herramientas clave para representar la variación espacial en los índices ecológicos de macroinvertebrados asociados a los discos de fijación del alga *Ecklonia radiata*. Su uso permitió visualizar la dispersión, los valores atípicos y las diferencias en la abundancia y riqueza de especies entre los distintos sitios de muestreo a lo largo del gradiente costero. Esta representación gráfica facilitó la identificación de patrones de ensamblaje específicos en cada localidad, complementando los análisis univariados y multivariados. Además, los boxplots ofrecieron una comprensión intuitiva de los valores extremos y de la estructura interna de los datos, contribuyendo a delinear la contribución local a la diversidad beta (LCBD) y a reforzar

la interpretación de los procesos físicos que influyen en la organización comunitaria de los macroinvertebrados.

Tabla 17. Estadísticas descriptivas para la abundancia de macrofauna (ind/m²) por SUS.

Sistema de uso del suelo	Media (ind/m ²)	Desviación Estándar (ind/m ²)	Error Estándar (ind/m ²)
Cacao	78.80	105.40	27.21
Maíz	65.87	81.68	21.09
Cítrico	55.40	71.64	18.50
Purma	103.53	112.99	29.18

Tabla 18. Identificación de outliers de la abundancia de macrofauna (ind/m²) por SUS.

Sistema de uso del suelo	Q1 (ind/m ²)	Q3 (ind/m ²)	IQR (ind/m ²)	Límite Inferior (ind/m ²)	Límite Superior (ind/m ²)	Outliers (ind/m ²)
Cacao	27.50	60.00	32.50	-21.25	108.75	[250, 149, 682]
Maíz	17.50	62.50	45.00	-50.00	130.00	[192, 300]
Cítrico	10.50	61.50	51.00	-66.040	138.00	[192, 241]
Purma	11.503	175.00	163.50	-233.75	420.25	[]

Tabla 19. Estadísticas descriptivas para la diversidad (índice H') de la macrofauna en los diferentes SUS.

Sistema de uso del suelo	Media (H')	Desviación Estándar (H')	Error Estándar (H')
Cacao	-0.06	0.045	0.012
Maíz	-0.063	0.046	0.012
Cítrico	-0.059	0.05	0.013
Purma	-0.062	0.052	0.014

Tabla 20. Identificación de outliers del índice de diversidad de Shannon-Wiener por SUS.

Sistema de uso del suelo	Q1 (H')	Q3 (H')	IQR (H')	Límite Inferior (H')	Límite Superior (H')	Outliers (H')
Cacao	-0.065	-0.04	0.025	-0.103	-0.002	[-0.14, -0.11, -0.16, 0.0]
Maíz	-0.075	-0.03	0.045	-0.143	0.038	[-0.16]

Cítrico	-0.08	-0.02	0.06	-0.17	0.07	□
Purma	-0.105	-	0.09	-0.24	0.12	□
		0.015				

En el presente estudio, los diagramas de caja (boxplots) correspondientes a la distribución de la abundancia por SUS (Figura 17) y a la distribución de la diversidad por SUS (Figura 18) reflejan visualmente esta información: las cajas representan el IQR (50% central de los datos), la línea interna indica la mediana, mientras que los bigotes (extremos de los diagramas) señalan los límites calculados a partir de 1.5 veces el IQR [$Q1 - (1.5 \cdot IQR)$ y $Q3 + (1.5 \cdot IQR)$]. Los puntos que se encuentran fuera de estos límites se consideran outliers, es decir, valores anómalos que pueden indicar condiciones ecológicas particulares, perturbaciones locales o errores de muestreo.

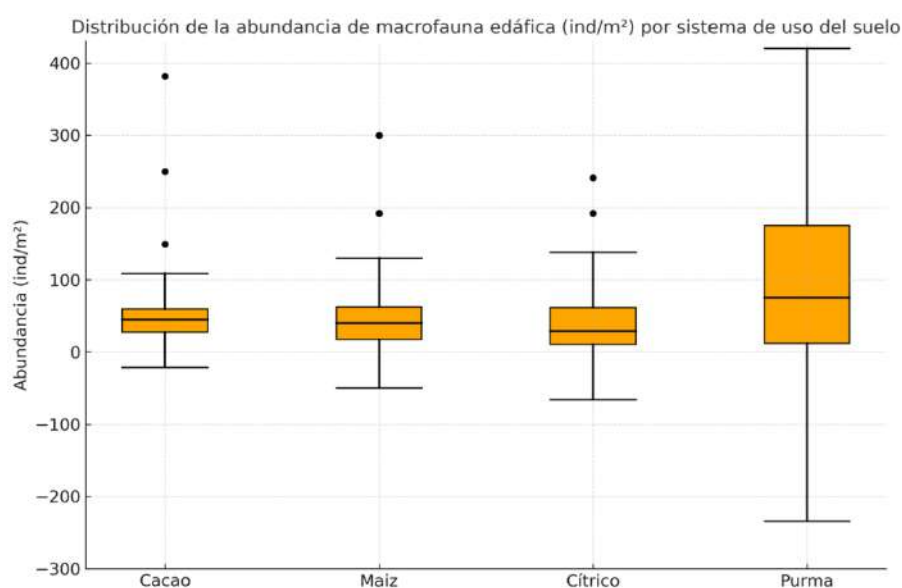


Figura 17. Gráfico tipo boxplot – Abundancia. Muestra la dispersión del número total de individuos por metro cuadrado en cada sistema de cultivo. Este gráfico permite visualizar claramente la heterogeneidad de la abundancia edáfica e identificar posibles valores extremos biológicos, como picos o reducciones marcadas en el número de individuos.

La Figura 17 muestra la distribución de la abundancia de macrofauna edáfica (ind/m²) en los cuatro sistemas de uso del suelo (SUS), evaluada mediante diagramas de caja con bigotes teóricos ($Q1 \pm 1,5 \times IQR$). Para el cálculo de los cuartiles y la mediana se utilizó interpolación lineal, lo que permitió una representación precisa de la dispersión estadística.

Los bigotes se extienden hasta los límites teóricos, independientemente de la presencia de datos en dichos extremos, con el fin de resaltar visualmente la asimetría en la distribución. Los valores atípicos (outliers) se identifican como puntos individuales ubicados fuera de estos límites.

En particular, el sistema Purma presenta una dispersión marcadamente mayor, reflejada en un rango intercuartílico (IQR) elevado y en la presencia de bigotes visualmente más largos. Esta dispersión también se evidencia en su desviación estándar (112,99 ind/m²), en comparación con sistemas como Cítrico (desviación estándar: 71,64), lo que sugiere fluctuaciones ambientales o ecológicas significativas en el sistema Purma.

El uso de este enfoque visual, complementado con estadísticos de dispersión, permite una interpretación más clara de la variabilidad de la macrofauna edáfica entre los sistemas evaluados.

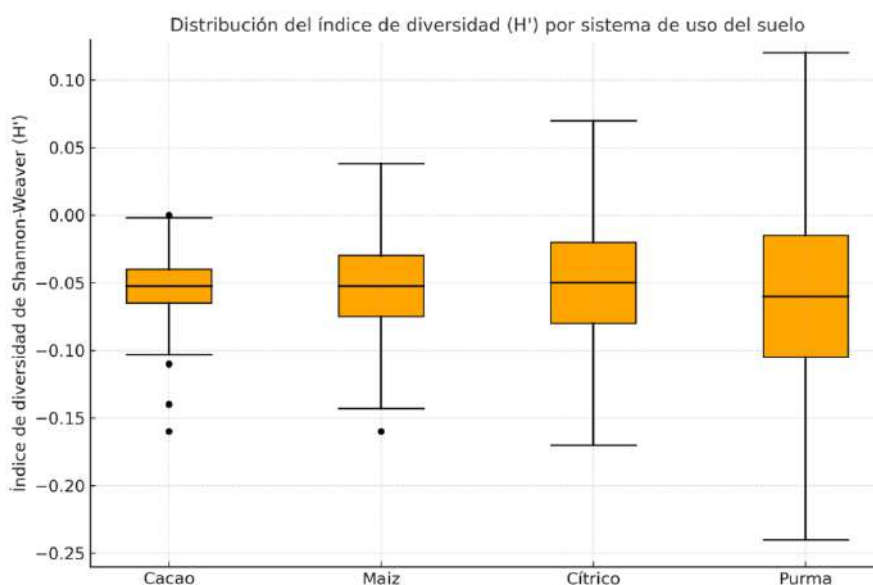


Figura 18. Gráfico tipo boxplot – Índice de diversidad (H'). Muestra la dispersión de los valores del índice H' en cada sistema de cultivo. Este gráfico permite identificar la variabilidad en la diversidad biológica edáfica y detectar posibles valores extremos asociados a cambios en el equilibrio de la comunidad.

La Figura 18 muestra la distribución del índice de diversidad de Shannon-Weaver (H') en los cuatro sistemas de uso del suelo (SUS), mediante diagramas de caja con bigotes teóricos ($Q1 \pm 1,5 \times IQR$). La interpolación lineal permitió una estimación precisa de la mediana y la identificación de valores atípicos.

Los sistemas Cítrico y Purma presentaron mayor dispersión, mientras que en Cacao se observaron varios outliers por debajo del límite inferior. Estas variaciones reflejan posibles

respuestas ecológicas a condiciones edáficas específicas, como contenido de MO, pH, resistencia a la penetración (RPS) y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

La presencia de outliers no debe interpretarse como anomalías estadísticas, sino como señales funcionales relevantes. Por ello, la integración de análisis exploratorios y correlaciones inferenciales (como la de Pearson) resulta esencial para comprender la dinámica edáfica y biológica bajo distintos usos del suelo. Este enfoque fortalece la identificación de indicadores integrados de salud del suelo, útiles para una gestión sostenible en contextos agrícolas, agroforestales o de conservación.

En el estudio de Misgana et al. (2024), realizado en plantaciones de café en el suroeste de Etiopía, se evaluó el efecto de diferentes especies de árboles de sombra y variedades de café sobre las propiedades físico-químicas del suelo. Se identificó que los parámetros clave como la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el pH y la resistencia a la penetración (PR) variaron significativamente según la combinación entre especie arbórea y variedad de café. *Albizia gummifera* y *Acacia abyssinica* presentaron asociación con mayores niveles de nutrientes, mayor capacidad de almacenamiento de agua y valores elevados de CIC, en contraste, *Millettia ferruginia* evidenció una correlación negativa con el pH del suelo. Los diagramas de caja (boxplots) facilitaron la visualización de estas variaciones, destacando diferencias significativas entre especies arbóreas y reforzando la utilidad de estas herramientas gráficas para interpretar la dispersión y el comportamiento de las variables edáficas.

4.4.2. Correlación entre la macrofauna del suelo y las variables fisicoquímicas

Para el análisis de correlación de Pearson, con el objetivo de comprender la dinámica funcional del suelo bajo diferentes usos agrícolas o forestales, las variables biológicas (representatividad de cada orden por SUS – Tabla 22), las variables físicas (resistencia a la penetración en kg/cm² y densidad aparente en g/cm³ – Anexos 40–41) y las variables químicas (pH, MO%, N%, P ppm, K kg K₂O/ha, CIC cmol(+) kg⁻¹ – Anexos 42–47) fueron consolidadas en términos de sus Densidades Relativas (%) por SUS en la Tabla 21.

A partir de la Tabla 21 consolidada, se aplicó la correlación de Pearson con el objetivo de identificar potenciales bioindicadores de calidad del suelo. Se efectuó una evaluación exhaustiva para identificar las órdenes taxonómicas cuyas densidades relativas presentaron coeficientes de correlación fuertes y estadísticamente significativos en asociación con los atributos fisicoquímicos del suelo ($|r| > 0.9$; es decir, $r > 0.9$ o $r < -0.9$; $p < 0.05$) (Tabla 22).

Tabla 21. Indicadores consolidados con base en los valores por SUS.

Indicador	Cacao	Maíz	Cítrico	Purma
Araneae	3.215	5.162	6.137	1.223
Coleóptera	4.738	5.364	5.897	6.761
Dermaptera	2.453	1.316	0.842	0.515
Dictióptera	0.846	0.506	0.000	0.386
Diplopoda	2.200	2.227	1.564	4.829
Díptera	3.892	4.555	4.693	4.894
Haplotaxida	21.151	12.146	11.793	16.613
Hemíptera	3.807	4.049	2.286	4.443
Himenóptera	5.415	7.287	8.664	19.511
Isópoda	12.606	19.433	23.105	15.776
Isóptera	32.318	30.364	29.001	18.995
Lepidóptera	2.538	2.530	1.324	0.966
Orthóptera	4.399	4.049	3.490	5.087
Paurápodos	0.254	1.012	1.203	0.000
Stylommatóphora	0.169	0.000	0.000	0.000
Da (g/cm ³)	1.499	1.558	1.574	1.459
RPS (kg/cm ²)	1.717	1.732	1.768	1.639
pH	5.713	5.067	5.067	5.985
MO (%)	0.960	0.750	0.750	1.249
N (%)	0.053	0.039	0.039	0.067
P (ppm)	24.675	18.586	183586	19.963
K (kg K ₂ O/ha	76.320	47.722	47.722	59.533
CIC (cmol(+) kg ⁻¹)	7.068	6.991	6.991	7.173

En el estudio de Gachhadar (2024), la significancia estadística desempeñó un papel clave para identificar los factores ambientales que influyen en la riqueza de especies y en la biomasa vegetal a lo largo del gradiente altitudinal. El uso de modelos lineales generalizados permitió detectar relaciones significativas entre variables como la altitud, la humedad del suelo, la biomasa de raíces finas y la masa de hojarasca con la diversidad de árboles, arbustos y hierbas, evidenciado por valores de $p < 0.05$, < 0.01 y < 0.001 . Estos resultados estadísticamente significativos no solo validan las asociaciones observadas, sino que también aportan una base científica sólida para orientar estrategias de manejo forestal y conservación en ecosistemas tropicales.

A partir de los coeficientes destacados ($|r| > 0.9$, $p < 0.05$) obtenidos en la matriz de correlación de la Tabla 22, se realizó una interpretación técnica orientada a identificar posibles bioindicadores edáficos. Esta interpretación considera la fuerza de las asociaciones

entre órdenes taxonómicas y atributos fisicoquímicos del suelo, permitiendo establecer analogías funcionales con indicadores biológicos de calidad edáfica.

Tabla 22. Matriz de correlación que incluye únicamente coeficientes de correlación fuertes y estadísticamente significativos ($|r| > 0.90$; $p < 0.05$).

Indicador	Da (g/cm ³)	RSP (Kg/cm ²)	pH	MO (%)	N (%)	P (ppm)	K (Kg K ₂ O/ha)	CIC (cmol(+) Kg-1)
Araneae	0.9953 90908	0.96233 3157	0.97234 1735	0.9781 5069	981880 926			0.97510155 2
Coleóptera								
Dermáptera								
Dictióptera								
Diplopoda		0.98984 0706						
Díptera								
Haplótaxida						0.9637 88778	0.998783 18	
Hemíptera								
Himenóptera								
Isópoda								
Isóptera								
Lepidóptera								
Orthóptera	0.9643 6713	0.97959 8151						
Paurápodos	0.9912 26278		0.98916 2964		0.9578 0752			
Stylomma tóphora						0.9682 35713		

En el presente estudio, el mapa de calor (heatmap) de la Figura 9 ilustra la totalidad de los coeficientes de correlación calculados. Se destacan en rojo los coeficientes con correlación positiva y en azul aquellos con correlación negativa.

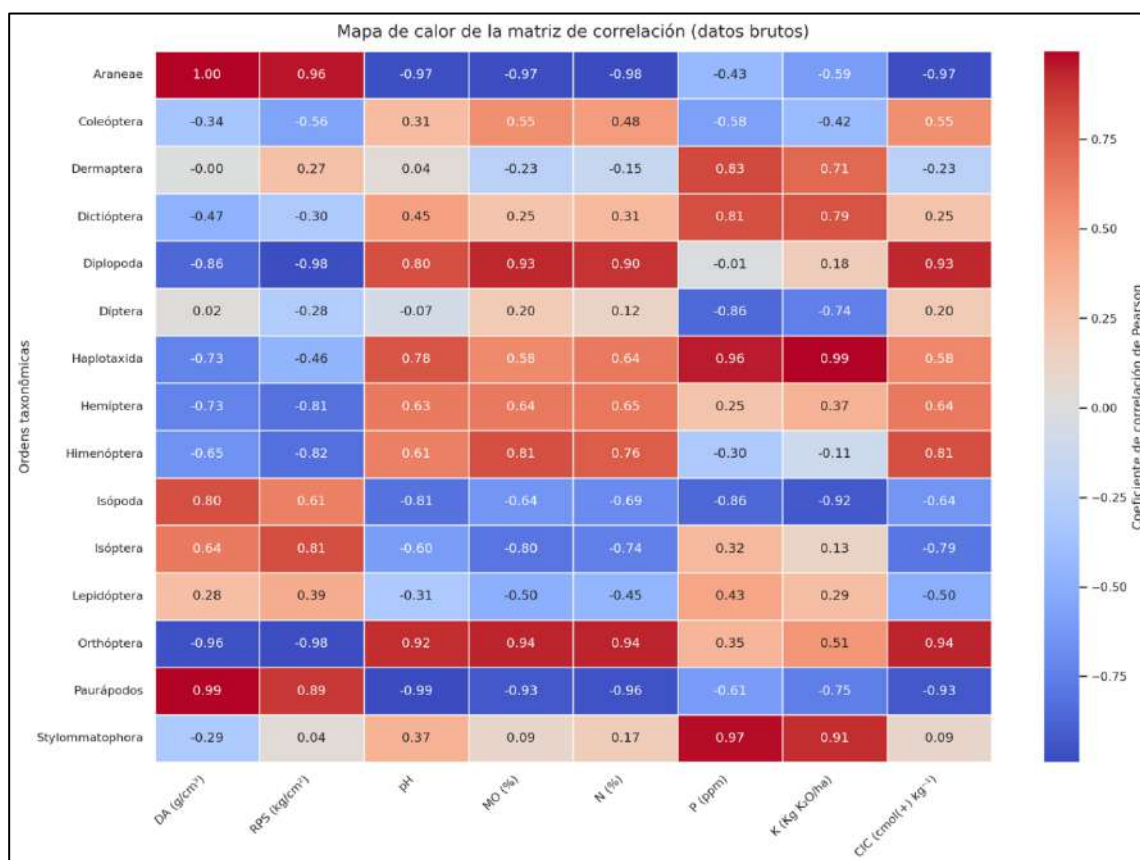


Figura 19. Heatmap. Mapa de calor generado a partir de la matriz de correlación de Pearson de la Tabla 22. Cabe señalar que los datos de la tabla consolidada (Tabla 21), utilizados para el cálculo de la matriz, no fueron transformados (datos brutos).

La Tabla 23 resume los principales bioindicadores de la macrofauna edáfica en relación con la calidad del suelo, con base en los coeficientes de correlación fuertes y estadísticamente significativos identificados previamente. Entre los grupos más destacados se encuentran Araneae, cuya presencia se asoció positivamente con suelos densos y compactados, y negativamente con pH, materia orgánica, nitrógeno y capacidad de intercambio catiónico (CIC), lo que sugiere su utilidad como potencial bioindicador negativo de calidad edáfica. Orthoptera mostró correlaciones negativas con la densidad aparente y la resistencia a la penetración, lo que indica una mayor presencia en suelos estructuralmente más sueltos y menos degradados, posicionándose como potencial bioindicador de suelos estructurados o en mejor estado. De manera similar, Diplopoda evidenció una clara evitación de suelos compactados, lo cual respalda su uso como bioindicador de estructura física favorable. Por otro lado, Haplótaxida presentó correlaciones positivas muy fuertes con fósforo y potasio, nutrientes esenciales para la productividad agrícola, lo que le confiere un papel como bioindicador robusto de fertilidad edáfica y eficiencia en el reciclaje de nutrientes. Finalmente, Pauropoda fue

asociado a suelos densos, ácidos y con bajo contenido de nitrógeno. Aunque las correlaciones fueron fuertes, el bajo número de individuos y su distribución limitada sugieren la necesidad de cautela en su interpretación, considerándolo un posible indicador de condiciones edáficas restrictivas, sujeto a verificación con bases muestrales más amplias.

Tabla 23. Interpretación de los coeficientes destacados de la matriz de correlación (Tabla 22) y su analogía con bioindicadores edáficos.

Orden taxonómica	Variable edáfica	r (pearson)	Interpretación
Araneae	DA	0.995	Presencia fuertemente asociada a suelos densos
Araneae	RSP	0.962	Presencia elevada de en suelos compactados
Araneae	pH	-0.972	Evitan suelos con pH más elevado
Araneae	MO	-0.978	Presencia reducida con mayor contenido de materia orgánica
Araneae	MO	-0.982	Relación negativa con nitrógeno total
Araneae	CIC	-0.975	Asociadas negativamente a suelos más fértiles
Diplopoda	RPS	-0.99	Preferencia por suelos menos compactados
Orthóptera	DA	-0.964	Menor presencia en suelos densos
Orthóptera	RPS	-0.98	Evitan suelos compactados
Paurápodos	DA	-0.991	Ocurren en suelos más densos
Paurápodos	pH	-0.989	Asociados a suelos más ácidos
Paurápodos	N	-0.958	Relación negativa con nitrógeno
Haplotaxida	P	0.964	Presencia asociada a disponibilidad de fósforo
Haplotaxida	K	0.999	Relación fuerte con potasio disponible en el suelo
Stylommatóphora	P	0.968	* Correlación estadística fuerte, pero con base frágil (baja frecuencia)

La Tabla 21 consolida, con base en la densidad relativa (%) por sistema de uso del suelo (SUS), los datos biológicos necesarios para interpretar ecológicamente el papel de cada grupo taxonómico. Al integrarse con los datos absolutos de abundancia (ind/m²) presentados en la Tabla 22, fue posible identificar los organismos (insectos o no) correspondientes a cada orden taxonómica, estimar el número total de individuos y evaluar la robustez muestral de las correlaciones observadas. Esta base consolidada permitió realizar una interpretación técnica rigurosa de los posibles bioindicadores edáficos, considerando

únicamente las correlaciones muy fuertes y estadísticamente significativas ($|r| > 0.90$; $p < 0.05$) presentes en la matriz de correlación.

Tabla 24. Evaluación de la asimetría de los indicadores edáficos y decisión sobre la transformación de datos.

Indicador	Asimetría (Fisher)	Requerimiento de transformación
CIC (cmol(+) kg ⁻¹)	1.115185390540160	TRUE
Dermaptera	1.175088439069680	TRUE
K (kg K ₂ O/ha)	1.1495850946458300	TRUE
Diplopoda	1.722922504194790	TRUE
Díptera	-1.3923306905853800	TRUE
P (ppm)	1.7189103417526400	TRUE
Hemíptera	-1.5389077287986100	TRUE
Himenóptera	1.7360346784746500	TRUE
Isóptera	-1.6861095257643400	TRUE
MO (%)	1.122822165690800	TRUE
RPS (kg/cm ²)	-1.0714191094070300	TRUE
Stylommatóphora	2.1	TRUE
Da (g/cm ³)	-0.38785730938130400	FALSE
N (%)	0.8545630383279710	FALSE
pH	0.2878163123837270	FALSE
Araneae	-0.5011259777103310	FALSE
Paurápodos	-0.0701628677403378	FALSE
Orthóptera	0.262112670974205	FALSE
Coleóptera	0.3602309001852270	FALSE
Isópoda	0.1298042173961380	FALSE
Haplotaxida	0.8291798892742920	FALSE
Dictióptera	-0.18958647568022000	FALSE
Lepidóptera	-0.16424802010054400	FALSE

En total, se identificaron cinco órdenes taxonómicas cuyas densidades relativas se correlacionaron de manera fuerte y significativa con variables fisicoquímicas del suelo. Araneae estuvo positivamente asociado a suelos densos y compactados, y negativamente a pH, materia orgánica, nitrógeno y capacidad de intercambio catiónico (CIC), lo que respalda su rol como bioindicador negativo de calidad edáfica. Orthoptera mostró correlaciones negativas con la densidad aparente y la resistencia a la penetración, indicando su preferencia por suelos estructurados o menos degradados. Diplopoda evitó suelos compactados, lo que sugiere su sensibilidad a la resistencia mecánica del suelo y su potencial como bioindicador de estructura física favorable. Haplotaxida, con una abundancia total elevada (726 ind/m²),

presentó correlaciones positivas con fósforo y potasio, elementos clave para la fertilidad, lo que le confiere robustez como indicador de reciclaje de nutrientes. Por otro lado, Paupoda fue relacionado con suelos densos, ácidos y pobres en nitrógeno, aunque su baja frecuencia (23 ind/m²) limita su confiabilidad como bioindicador. Stylommatophora, a pesar de una correlación positiva con fósforo, fue registrado con solo dos individuos por metro cuadrado, resultando insuficiente para su consideración funcional. Las demás órdenes evaluadas (Coleoptera, Lepidoptera, Isoptera, Hymenoptera, Hemiptera, Dictyoptera y Dermaptera) no presentaron correlaciones fuertes ni consistentes con las variables fisicoquímicas del suelo, por lo cual fueron excluidas como bioindicadores en este análisis.

Posteriormente, con base en esta consolidación, se verificó la simetría de los datos mediante el coeficiente de asimetría de Fisher para cada indicador. Aquellas variables que presentaron asimetría significativa ($|\text{skew}| \geq 1$) fueron transformadas mediante logaritmo natural (base e) aplicado directamente sobre los valores de la variable, y no sobre el coeficiente. Esta transformación tuvo como objetivo corregir la asimetría positiva - como en el caso de MO, P, K y CIC - y la asimetría negativa, observada específicamente en RPS. El propósito metodológico fue aproximar las distribuciones a una forma más simétrica y normal, lo que es especialmente relevante dado que la correlación de Pearson asume linealidad y distribución simétrica de las variables.

Los resultados se presentan en la Tabla 14, que resume las variables que requirieron transformación. Cabe señalar que, aunque se aplicaron transformaciones logarítmicas a las variables con asimetría significativa, la matriz de correlación generada a partir de los datos transformados no fue incluida en esta tesis, dado que los resultados obtenidos fueron consistentes con los ya observados en la Tabla 22. Específicamente, las correlaciones fuertes y estadísticamente significativas ($|r| > 0.90$; $p < 0.05$) se mantuvieron inalteradas tras la transformación, lo que confirma la estabilidad de los patrones identificados y respalda la robustez de los bioindicadores previamente destacados.

Cabe señalar que, aunque se aplicaron transformaciones logarítmicas a las variables con asimetría significativa, la matriz de correlación generada a partir de los datos transformados no fue incluida en esta tesis, dado que los resultados obtenidos fueron consistentes con los ya observados en la Tabla 22. Específicamente, las correlaciones fuertes y estadísticamente significativas ($|r| > 0.90$; $p < 0.05$) se mantuvieron inalteradas tras la transformación, lo que confirma la estabilidad de los patrones identificados y respalda la robustez de los bioindicadores previamente destacados.

Aunque numerosos estudios reconocen la importancia de la macrofauna edáfica como herramienta bioindicadora, no se ha identificado en la literatura reciente un consenso claro sobre valores umbrales cuantitativos que definan la representatividad mínima necesaria de un taxón para su consideración como indicador confiable. La mayoría de los trabajos continúan basándose en enfoques cualitativos o proporcionales, sin establecer cifras concretas.

Por tal motivo, en esta investigación se adoptó un criterio práctico, fundamentado en referencias consolidadas (Römbke et al., 2009; Lavelle et al., 2006; Decaëns et al., 2004), que consideran la frecuencia y la abundancia como factores determinantes para evitar inferencias espurias. En este contexto, se clasificaron como órdenes con base sólida aquellas que superaron los 100 individuos/m² en el total de muestras; base moderada entre 50 y 100 individuos/m²; base débil entre 10 y 49 individuos/m²; y base inválida por debajo de 10 individuos/m². Esta clasificación fue utilizada como criterio auxiliar para validar la robustez de las correlaciones significativas detectadas, permitiendo distinguir entre asociaciones estadísticamente sólidas y aquellas con fundamento muestral limitado.

4.4.2.1. Fundamento estadístico del coeficiente de correlación utilizado

Para evaluar la relación entre la densidad relativa de los distintos órdenes taxonómicos de la macrofauna del suelo y las propiedades fisicoquímicas del suelo, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson (r). Este coeficiente mide la fuerza y dirección de la asociación lineal entre dos variables cuantitativas, variando entre -1 (correlación negativa perfecta) y +1 (correlación positiva perfecta).

Junto con el coeficiente r , se calculó el valor de p asociado, correspondiente a la prueba de significancia estadística de la correlación. Esta prueba evalúa la hipótesis nula (H_0), que postula la inexistencia de correlación real entre las variables ($r = 0$), frente a la hipótesis alternativa (H_1), que indica la existencia de una correlación significativa.

Se consideraron como estadísticamente significativas aquellas correlaciones con $p < 0.05$, lo que indica una probabilidad inferior al 5 % de que la correlación observada haya ocurrido por azar. Asimismo, para destacar las asociaciones de mayor interés ecológico, se adoptó un umbral adicional de $|r| > 0.90$, correspondiente a correlaciones de magnitud muy fuerte.

V. CONCLUSIONES

1. Los indicadores físicos de los cuatro sistemas de uso del centro poblado Supte San Jorge presentan una textura franca, densidad aparente de un suelo ideal (franco), resistencia mecánica a la penetración del suelo con moderadas a severas restricciones, mientras que los indicadores químicos presentan un pH de fuerte a moderadamente ácida, materia orgánica de bajo a medio, nitrógeno bajo, fósforo, potasio y CIC bajo.
2. Con respecto a la macrofauna en los cuatro sistemas de uso del suelo presentan una abundancia del Filo Arthropoda seguida de Annelida y Mollusca y 15 órdenes, con mayor cantidad de (ind/m²) Haplotaxida (Lombrices de tierra) seguido de las Isóteras (termitas), Isópoda (cochinillas) y las Himenóptera (hormigas).
3. Respecto a la densidad y biomasa de la macrofauna en los cuatro sistemas de uso del suelo presentan purma con 1553 (ind/m²) y 506,34 (g.m⁻²), cacao con 1182 (ind/m²) y 478,83 (g.m⁻²), maíz con 988 (ind/m²) y 251,28 (g.m⁻²) y cítrico con 831 (ind/m²) y 201,32 (g.m⁻²) y una variabilidad en la diversidad biológica, donde Cítrico y Purma presentaron mayor dispersión, mientras que en Cacao se observaron varios outliers por debajo del límite inferior.
4. Respecto a la correlación entre la macrofauna del suelo con las variables fisicoquímicas estadísticamente son significativos. Entre los grupos más destacados se encuentran Araneae, con presencia asociadamente positivamente con suelos densos y compactados, negativamente con pH, materia orgánica, nitrógeno y capacidad de intercambio catiónico (CIC) siendo un bioindicador negativo de calidad edáfica. Orthoptera mostró correlaciones negativas con densidad aparente y resistencia a la penetración, siendo un bioindicador de suelos estructurados o en mejor estado. Diplopoda evidenció una clara evitación de suelos compactados, siendo su uso como bioindicador de estructura física favorable. Haplotaxida presentó correlaciones positivas muy fuertes con fósforo y potasio, nutrientes esenciales para la productividad agrícola, siendo un bioindicador robusto de fertilidad edáfica y eficiencia en el reciclaje de nutrientes. Finalmente, Pauropoda fue asociado a suelos densos, ácidos y con bajo contenido de nitrógeno. Aunque las correlaciones fueron fuertes, el bajo número de individuos y su distribución limitada sugieren la necesidad de cautela en su interpretación, considerándolo como un indicador de condiciones edáficas restrictivas, sujeto a verificación con bases muestrales más amplias.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. En el presente estudio se adoptó un enfoque integrado entre los sistemas de uso del suelo (SUS), cuyo objetivo es identificar patrones generales entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la macrofauna edáfica. Si bien esta estrategia permitió detectar correlaciones robustas y patrones funcionales compartidos, se reconoce la importancia de avanzar hacia la identificación de bioindicadores específicos por tipo de sistema (como cacao, maíz, cítricos o purma).
2. Dar especial atención al primer estrato (0–10 cm), donde se concentra la mayor parte de la macrofauna, de modo que futuras correlaciones puedan enfocarse en las capas biológicamente más activas del suelo, así como la ubicación espacial exacta de los monolitos dentro de la parcela de 1 ha, debido a que no permite evaluar variaciones micro ambientales como sombra, proximidad a raíces, pendiente o humedad.
3. Complementar el muestreo con variables ambientales microescalares (como cobertura vegetal, distancia al tronco principal, tipo de hojarasca, temperatura y humedad del suelo), lo cual permitiría establecer si ciertas órdenes de macrofauna tienen mayor afinidad por condiciones ecológicas particulares dentro de un mismo SUS.
4. Para mejorar la robustez estadística y la capacidad predictiva de futuros estudios sobre macrofauna del suelo, ampliar el número de unidades de muestreo, con el objetivo de asegurar una representación mínima de al menos 100 individuos/m² por orden taxonómica considerada como potencial bioindicador. Esta medida permitiría reducir la variabilidad intraorden y mejorar la estabilidad de los coeficientes de correlación.

VII. REFERENCIAS

- Ababsa, N., Fellah, S., Chenchouni, H., Lallaouna, R., Bouchama, K., Baha, M., & Kribaa, M. (2023). Structure and diversity of earthworm communities in long-term irrigated soils with raw effluent and treated wastewater. *Water Science and Technology*, 88(9), 2473–2489. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.345>
- Acebedo, E., Xarrasco, A., León, O., Silva, P., Castillo, G., Borie, G., Martínez, E., Gonzales, S. & Ahumada, I., (2005). Criterios de calidad del suelo agrícola. USDA, (<http://soils.usda.gov/sqi/>).
- Aguilera, C. & Martínez E. (1996). Relaciones Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. 4a ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Adriaanse, A. (1993). Environmental policy performance indicators. A study on the development of indicators for environmental policy in the Netherlands. Sdu Uitgeverij Koninkinnergrach, The Netherlands.
- Anderson, J., & Ingram, J. (1993). *Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods*. (2nd ed.). C.A.B. International. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2164411>
- Angulo, W., Reyes P. (2015). *Calidad de sitio de cuatro especies forestales comerciales establecidas en suelo degradado en el ámbito del Bosque Alexander von Humboldt*. Estación Experimental Agraria Pucallpa. http://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/478/1/Angulo-Calidad_de_sitio_de_cuatro_especies.pdf
- Arévalo, G.E., Gauggel, C.A. (2014). Manual de laboratorio de manejo de ciencia de suelos y aguas. EAP el Zamorano, Honduras. p 79.
- Arshad, M.A. & Coen, G.M. (1992). Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American J. of Alternative Agriculture*. 7:25
- Asabe, (2008). Soil fauna and soil structure. *Aust. J. Soil Res.* 29: 745-775.
- Astier, M. Mass, M. & Etchevers, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*. 36 (5):605. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/214/214>
- Atlas, R. & Bartha, R. 2001. Ecología microbiana y microbiología ambiental. 4ta. ed. Addison Wesley. Madrid, España. 677 p.
- Barathkumar, S., Sellamuthu ,K.M., Sathyabama ,K., Malathi ,P., Kumaraperumal ,R., & Devagi, P. (2025). Advancements in Soil Quality Assessment: A Comprehensive Review of Machine Learning and AI-Driven Approaches for Nutrient Deficiency

- Analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 56(2), 251–276.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2406484>
- Bastida, F. & Zsolnay, A. (2008). Hernández, T.; García, C.: Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*. 147, 159-171.
- Bengough, O. & Mullins, Q. (1991). *Ecología y Cultura: Cambio ambiental, evolución biológica y evolución cultural*. Politeia, (28): pp. 41-56
- Bernal, G. (2010). Las buenas prácticas agrícolas desde la perspectiva de la microbiología del suelo. (G. Bernal, Intérprete) Universidad tecnológica equinoccial, Santo Domingo de los Tsachilas, Santo Domingo, Ecuador.
- Bisong, E. (2019). *Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform: A Comprehensive Guide for Beginners*. Apress. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4470-8>
- Biswal, D. (2022). Nematodes as Ghosts of Land Use Past: Elucidating the Roles of Soil Nematode Community Studies as Indicators of Soil Health and Land Management Practices. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 194(5), 2357–2417.
<https://doi.org/10.1007/s12010-022-03808-9>
- Blake, G., & Hartge, K. (1986). *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Edition | Wiley. Wiley.Com. <https://www.wiley.com/en-us/Methods+of+Soil+Analysis%2C+Part+1%3A+Physical+and+Mineralogical+Methods%2C+2nd+Edition-p-9780891188643>
- Bonato Asato, A. E., Wirth, C., Eisenhauer, N., & Hines, J. (2023). On the phenology of soil organisms: Current knowledge and future steps. *Ecology and Evolution*, 13(4), e10022.
<https://doi.org/10.1002/ece3.10022>
- Bonilla-Bedoya, S., Valencia, K., Herrera, M. Á., López-Ulloa, M., Donoso, D. A., & Macedo Pezzopane, J. E. (2023). Mapping 50 years of contribution to the development of soil quality biological indicators. *Ecological Indicators*, 148, 110091.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110091>
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465.
<https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Bone, J., Head, M., Barraclough, D., Archer, M., Scheib, C., Flight, D., & Voulvoulis, N. (2010). Soil quality assessment under emerging regulatory requirements. *Environment International*, 36(6), 609-622.
https://www.researchgate.net/publication/44611981_Soil_quality_assessment_under_

- Brady, N.C. (1990). *The nature and properties of soils*. McMillan Publishing Company. New York, USA. 621 p.
- Brown, G., Fragoso, C., Barois, I., Rojas, P. & Rodríguez, C. (2001). *Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos*. Departamento de biología de suelos, instituto de ecología. Xalapa, México. 31p.
- Buckman, H. & Brady, N. (1993). *Naturaleza y Propiedades de los Suelos*; 5ta ed.: México. U.TE.H.A.
- Budhu, M. 2007. *Soil mechanics and foundations*. 2da. ed. John Wiley & Sons Inc. New Jersey, USA. 634 p.
- Cabrera, D. (2014). *Manual práctico sobre la macrofauna edáfica como indicador biológico de la calidad del suelo, según resultados en cuba*. Disponible en: (<http://www.rufford.org/files/Manual%20Pr%C3%A1ctico%20Sobre%20la%20Macrofauna%20del%20Suelo.pdf>) (revisado 22 de junio del 2023).
- Camayo, J. (2011). *Cuantificación de la macrofauna en relación con las propiedades de los suelos residuales de la laguna Los Milagros – Aucayacu*. [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. 10 p.
- Cárdenas, P. (2008). *Determinación de la mesofauna del suelo bajo diferentes coberturas en Tingo María*. [Tesis de grado. Facultad de Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Tingo María Perú. 100 p.
- Carlile;W., Costantino, C., Zaccheo, P., (2015). *Medios de cultivo orgánicos: componentes y propiedades*. *Diario de la zona de Vadose*. 14 (6), 9-25. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.09.0125>
- Carter, R. (2002). *Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions*. *Agronomy Journal*. 94:38
- Castelán, R.; López, I.C.; Tamariz, J.V.; *et al.* (2017). *Erosión y pérdida de nutrientes en diferentes sistemas agrícolas de una microcuenca en la zona periurbana de la ciudad de Puebla, México*. *Terra Latinoamericana* 35(1), 229-235. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S01875779201700030022
- 9
- Celik, I. (2005). *Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey*. *Soil and Tillage Research*. 83, 270-277.
- Celis, R. A. O., GAMBOA, C. H., PASCUAL, J. A., & ROS, M. (2024). *Conceptual and practical challenges of assessing soil quality—Celis—2024—Soil Use and Management—Wiley Online Library*. <https://doi.org/10.1111/sum.13137>

- Conte, O.; Flores, J. P. C.; Cassol, L. C.; Anghinoni, I.; Carvalho, P. C. F.; Levien, R.; Wesp, C. L. (2011). Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, n. 10, p. 1301-1309. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000026>
- Coquet, Y., & Michelin, J. (2025). *Agricultural Soil Science: Sustainable Management of Agricultural Soils*. John Wiley & Sons.
- Correira, A. & Oliveira, P. (2000). Conservación de suelos para países de desarrollo. Boletín N° 10 FAO. Roma.
- Cristóbal-Acevedo, D., Álvarez-Sánchez, M. E., Hernández-Acosta, E., & Améndola-Massiotti, R. (2011). Concentración de nitrógeno en suelo por efecto de manejo orgánico y convencional. *Terra Latinoamericana*, 29(3), 325-332. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57321283011.pdf>.
- Cruz, D. L. de S., Júnior, J. F. do V., Neves, L. T. B. C., Carvalho, L. de B., & Ahouangbonou, O. R. K. (2024). Soil physical quality: A comprehensive analysis of its importance for agricultural production. *REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE*, 18, 1–23. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v18i00.8060>
- Chiappero, M. F., Rossetti, M. R., Moreno, M. L., & Pérez-Harguindeguy, N. (2024). A global meta-analysis reveals a consistent reduction of soil fauna abundance and richness as a consequence of land use conversion. *Science of The Total Environment*, 946, 173822. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173822>
- Chen, S., Lin, B. Li, Y and. Zhou, S. (2020). Spatial and temporal changes of soil properties and soil fertility evaluation in a large grain-production area of subtropical plain, *China. Geoderma*, 357(113937), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113937>
- Danielson, R. E., & Mazza Rodrigues, J. L. (2022). Chapter Three—Impacts of land-use change on soil microbial communities and their function in the Amazon Rainforest. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 175, pp. 179–258). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.04.001>
- Delgado-Baquerizo, M., Eldridge, D. J., Liu, Y.-R., Liu, Z.-W., Coleine, C., & Trivedi, P. (2025). Soil biodiversity and function under global change. *PLOS Biology*, 23(3), e3003093. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3003093>
- Delgado, R., España, M. (1999). Evaluación de la biomasa microbiana por los métodos fumigación-incubación y fumigación-extracción y su relación con la disponibilidad de nitrógeno en suelos de Venezuela. Instituto de Investigaciones en Recursos Agroecológicas. Apdo. 4846. Maracay 2101. Estado Aragua. Venezuela.

- De la Cruz, H. M. (2021). Influencia del cultivo de maca en la calidad físico – química de suelos en diferentes tiempos de descanso en la meseta de Bombón, Junín. [Tesis de grado]. Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú. 90 p. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4649/browse?value=Meseta+Bomb%C3%B3n&type=subject>.
- Dexter, A.R. (2004). Soil physical quality. Part I. Theory, effect of soil texture, density and organic matter, and effect on root growth. *Geoderma*. 120:201
- Díaz, B. et al. (2008). Evaluación del manejo del suelo pardo mullido medianamente lavado a largo plazo a través de la razón de estratificación de la materia orgánica y el índice de calidad del suelo. *Centro Agrícola*. 35 (3):25
- Dong, J., Qiu, K., Zeng, H., Bidegain, G., Hou, G., Chen, N., & Wang, X. (2024). *Macrobenthos in the Marine Protected Area of the Subtropical Jianjinag River Estuary: Current State and Analysis of Ecological Quality* (SSRN Scholarly Paper No. 4869884). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4869884>
- Doran, J., Lincoln, N. (1999). Guía para la evaluación de la calidad del suelo. USDA, (<http://soils.usda.gov/sqi.pdf>).
- Doran, J. & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In: *Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment*. Soil Science Society of America. Special Publication 35. Madison, Wisconsin, USA. p 3-21.
- Dumanski, J. Gameda, S. Pieri, Ch. & Fao. (1998). Indicators of land quality and sustainable land management. TheWorld Bank. Washington DC, USA. <https://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/0-8213-4208-8>
- El Behairy, R. A., El Arwash, H. M., El Baroudy, A. A., Ibrahim, M. M., Mohamed, E. S., Kucher, D. E., & Shokr, M. S. (2024). How Can Soil Quality Be Accurately and Quickly Studied? A Review. *Agronomy*, 14(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081682>
- Elliott, E. T. (1986). Aggregate Structure And Carbon, Nitrogen, And Phosphorus In Native And Cultivated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 627-633.
- Etchevers, B. (1999). Indicadores de calidad de suelos. En: *Conservación y restauración de suelos*. (Eds. C.H. Siebe et al.). Universidad Nacional Autónoma de México y Programa Universitario del Medio Ambiente. México, D.F. p. 239
- Etter, R.J. (1991). PopDyn: an ecological simulation program. *Bioscience* 41: 784-790.
- Franco, J. (1989). *Manual de ecología*. Trillas, México.

- Ferreras, L.; Toresani, S.; Bonel, B.; Fernández, E.; Bacigaluppo, S.; Faggioli, V. & Beltrán, C. (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de la calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del suelo*. 103 – 114.
- Fassbender, O. & Bornemisza, I. (1987). *Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina*. 2 ed. IICA. San José, Costa Rica. 40 p.
- Gachhadar, P. K. (2024). *Plant Species Diversity and Biomass in the Forests of Morang District, east Nepal*. <https://elibrary.tucl.edu.np/items/cc44e13a-42fb-4ca2-bc43-163cab83e09d>
- Galantini, J. & Rosell, R. (2006). *Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils* *Soil and Tillage Research*. 87, 72-79.
- Galarnyk, M. (2024, November 25). *What Is a Boxplot? (Definition + How to Use One)*. Built In. <https://builtin.com/data-science/boxplot>
- García, Y. Ramírez, W & Sánchez S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. Estación Experimental de Pastos y Forrajes “Indio Huatey”. Cuba. 15 p. <https://www.redalyc.org/pdf/2691/269125071001.pdf>.
- Gregorich, E.G. Carter, M. R. Angers, D. A. Monreal, C. M. & Eliert, B. H. (1994). Towards a minimum data set to asses soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian J. of Soil Science*. 74:367. <https://cdnscepub.com/doi/abs/10.4141/cjss94-051>
- Gómez, A. B., & Hoyos, W. Y., (2020). Evaluación de la calidad de un suelo sometido a diferentes usos. [Tesis de grado]. Universidad de los llanos. Villavicencio. 57 p. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21860/1/UPS-CT009562.pdf>.
- Guayasamin, J. M., Ribas, C. C., Carnaval, A. C., Carrillo, J. D., Hoorn, C., Lohmann, L. G., Riff, D., Ulloa Ulloa, C., & Albert, J. S. (2024). Evolution of Amazonian biodiversity: A review. *Acta Amazonica*, 54, e54bc21360. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202103601>
- Guerrero, A. (2000). Diseño de programas de conservación del suelo y agua a nivel de finca, usando modelos de simulación de erosión y su análisis financiero. pp. 259-294. In: J. F. Ruiz F. (ed.). *Evaluación de tierras para una agricultura sostenible en México*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx., México.
- Hameed Ologunde, O., Kehinde Bello, S., & Abolanle Busari, M. (2024). Integrated agricultural system: A dynamic concept for improving soil quality. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 23(5), 352–360. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2024.03.002>

- Halfpter, G., Moreno, C.E., Pineda, E.O. (2001). Manual para evaluación de la biodiversidad en Reservas de la Biosfera. Manuales & Tesis vol. 2.
- Hartemink, A. E., & Barrow, N. J. (2023). Soil pH - nutrient relationships: The diagram. *Plant and Soil*, 486, 209–215. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- Havlin, J.L. Tisdale, S. L. Nelson, W. L. y Beaton, J. D. (1999). Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management. Prentice Hall. New Jersey, USA. 499 p. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/soil-fertility-and-fertilizers-an-introduction-to-nutrient-management/P200000001208/9780137593392>
- Havlin, J.L., Tisdale, S.L., Nelson, W.L. And Beaton, J.D. (2014). Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 8 ed. New Jersey (USA): Pearson, 516 p.
- Hawkesford, M.; Horst, W.; Kichey, T.; LamberS, H.; Schjoerring, J.; Skrumsager Moller, I.; White, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition*. ed. ElSevier Ltd. [https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=yqKV3USG41cC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Function+of+macronutrients.+In:+Marschner,+P.+\(Comp.\).+Marschner%E2%80%99s+mineral+nutrition.+&ots=Vc5D_6yYcK&sig=znGwglViltWn1y0ai7eW_tbbYs&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=yqKV3USG41cC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Function+of+macronutrients.+In:+Marschner,+P.+(Comp.).+Marschner%E2%80%99s+mineral+nutrition.+&ots=Vc5D_6yYcK&sig=znGwglViltWn1y0ai7eW_tbbYs&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- He, Y., Wang ,Haoming, Liu ,Yuan, Zuo ,Mingbo, Wang ,Xueying, Shen ,Yuanyuan, Li ,Guangwen, Hu ,Youning, Zhao ,Minjuan, Yang ,Yinli, Zhao ,Youyi, & and Gao, T. (2023). Distribution and Variation of Soil Bacterial Community of Two Lead-Zinc Tailings in Qinling Mountains. *Geomicrobiology Journal*, 40(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/01490451.2022.2124330>
- Hemraj, D. A., & Carstensen, J. (2025). Towards ecosystem-based techniques for tipping point detection. *Biological Reviews*, 100(2), 892–919.
- Henríquez, C. y Cabalceta, A. (1999). Guía Práctica para el Estudio Introductorio de los Suelos con un Enfoque Agrícola. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José. C.R.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6a. ed. --.). México D.F.: McGraw-Hill. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacionsextaedicion.compressed.pdf>
- Herrick, J. E., & Jones, T. L. (2002). A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4), 1320–1324. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1320>

- Huamán, J. H., (2021). Influencia de los sistemas de uso en la calidad del suelo sector Cora Cora distrito Luyando, provincia de Leoncio Prado. [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María - Perú. 71 p. https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/2034/TS_HMJH_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=yInstituto Nacional de Estadística e Informática. (2013). resultados definitivos. IV Censo nacional agropecuario 2012. Recuperado de <http://sinia.minam.gob.pe/index.php?accion=verelemento&idelementoInformacion=1378&verPor=&idTipoElemento=&idTipoFuente>
- Huerta, E. Rodríguez-Olán, J. Evia-Castillo, I. Montejo-Meneses, E, De la Cruz-Mondragón, M y García-Hernández, R. (2008). Relación entre la fertilidad del suelo y su población de macroinvertebrados. *Terra Latinoamericana*. 26 (2):171. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000200010.
- Hünemeyer, J.A. et al. (1997). Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. San José, Costa Rica. 157 p.
- Isaac, M. E., Gagliardi, S., Ordoñez, J. C., & Sauvadet, M. (2024). Shade tree trait diversity and functions in agroforestry systems: A review of which traits matter. *Journal of Applied Ecology*, 61(6), 1159–1173. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14652>
- Jones, C. A. (1984). Estimation of percent aluminum saturation from soil chemical data. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15(3), 327–335. <https://doi.org/10.1080/00103628409367478>
- Juan-Ovejero, R., Bartz, M. L. C., Baretta, D., Sousa, J. P., & Ferreira, V. (2025). Effects of Eucalypt Monoculture Plantations on Soil Invertebrate Communities: A Meta-Analysis. *Land Degradation & Development*, 36(4), 1310–1325. <https://doi.org/10.1002/ldr.5431>
- Khan, A., Lu G, Ayaz, A., Zhang, H., Wang, R., Lv, F., Yang, Y., Sun, B & Zhang. S. (2018). Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping system. *Agric. Ecosyst. Environ.* 256(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.006>
- Karlen, D.L., Andrews, S.S., & Doran, J.W. (2001). Soil quality: current concepts and applications. *Advances in Agronomy*, 74(1), 1-40. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(01\)74029-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)74029-1)
- Kjeldahl, J. (1883). *A New Method for the Determination of Nitrogen in Organic Matter*. 22, 366–382. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01338151>

- Köninger, J., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A., Schmid, M. W., Orgiazzi, A., & Briones, M. J. I. (2023). Ecosystem type drives soil eukaryotic diversity and composition in Europe. *Global Change Biology*, 29(19), 5706–5719. <https://doi.org/10.1111/gcb.16871>
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(1): 5875-5895. <https://www.mdpi.com/2071-1050/7/5/5875/pdf>
- Lal, R. (1998). Soil quality and agricultural sustainability. In: Soil quality and agricultural sustainability. (Ed. R. Lal). Ann Arbor Press, Chelsea, MI. p. 3
- Lal, R. (2020). Soil quality and agricultural sustainability. In: Soil quality and agricultural sustainability. (Ed. R. Lal). Ann Arbor Press, Chelsea, MI. p. 30
- Larson, W. E.; Pierce, F. J. (1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. Defining soil quality for a sustainable environment. 37-51.
- Larson, W.E. & Pierce, F.J. (1991). Conservation and enhancement of soil quality. In: Evaluation for sustainable land management in the developing world. Proc. of the Int. Workshop on evaluation for sustainable land management in the developing world. Bangkok, Thailand. p. 175
- Lembani, R., & Knight, J. (2023). Factors Controlling Soil Organic Matter Stock: A Baseline Study for Evaluating Carbon Storage Initiatives in Miombo Woodlands, Zambia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(16), 2189–2204. <https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2211634>
- Lok, S. (2005). Determinación y selección de indicadores del sistema suelo-pasto en pastizales dedicados a la producción del ganado vacuno. [Tesis de doctorado]. Instituto de ciencia animal. Cuba.
- López, H. M. (2025). Footprints of cocaine: A bibliometric analysis and systematic review of the environmental impacts of the cocaine value chain in Latin America. *Environmental Research Letters*, 20(3), 033002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adb5a1>
- López, A. (2005). Manual de Edafología. Notas de Clases. Universidad de Sevilla. En <http://www.scribd.com/doc/51630897/46/Calculo-de-la-porosidad>.
- Malagon, D., Pulido, C., Llinas, R. D., Chamorro, C. (1995). Suelos de Colombia. Bogotá, D.C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Martin, N. & Adad, Idaybis. (2006). Generalidades más importantes de las ciencias del suelo. En: Disciplina Ciencias del Suelo. Tomo I. Pedología. Universidad Agraria de La Habana. Cuba. 504 p.
- Masters, G. (2004). Belowground herbivores and ecosystem processes. *Ecological Studies* 173:93-112.

- Masera, O. Astier, M. y López-Ridaura, S. (1999). Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS. GIRA. Mundi-Prensa e Instituto de Ecología-UNAM. México. 109 p.
https://www.researchgate.net/publication/299870632_Sustentabilidad_y_manejo_de_recursos_naturales_El_Marco_de_evaluacion_MESMIS
- Mesele, S. A.; Ocansey, C. M.; Bougma, A.; Azeez, J. O.; Ajiboye, G. A.; Logha, V.; Lloyd, J. (2024). Emerging ecological trends in West Africa: implications on soil organic matter and other soil quality indicators. *Plant and Soil*, p. 1-18, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06568-z> Revista Agro@ambiente On-line, v. 18, e8060, 20 Soil physical quality: a comprehensive analysis of its importance for agricultural production
- McKinney, W. (2017). *Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython*. O'Reilly Media, Inc.
- Mileusnić, Z. I.; Saljnikov, E.; Radojević, R. L.; Petrović, D. V. (2021). Soil compaction due to agricultural machinery impact. *Journal of Terramechanics*, v. 100, p. 51-60, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.12.002>
- Milinic, J., Vale, C., & Azenha, M. (2023). Recent advances in multivariate analysis coupled with chemical analysis for soil surveys: A review. *Journal of Soils and Sediments*, 23(3), 1085–1098. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03377-8>
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2015). Sector agrario. Cultivos de importancia nacional. Recuperado de <http://www.minag.gob.pe/portal/sctoragrario/agricola/cultivos/cultivos-de-importancia-nacional/ma%C3%ADz/ma%C3%ADz31?start=2>
- Misgana, Z., Garedew, W., Alemayehu, Y., Bekeko, Z., & Nebiyu, A. (2024). The influence of shade tree species and coffee varieties on selected soil physicochemical properties in coffee-based farming system of southwestern Ethiopia. *Trees, Forests and People*, 17, 100650. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100650>
- Moreno, C. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. Vol. 1. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe de UNESCO y Sociedad Entomológica Aragonesa. Serie Manuales y Tesis SEA.
- Moreno V., Domínguez, t., Alvarado, M., Colín, J., Corral, S., González, H., (2018). Aporte y descomposición de hojarasca en bosques templados de la región de El Salto,

- Durango. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(47), 70-93.
<http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v9n47/2007-1132-remcf-9-47-70.pdf>
- Moscatelli, G., Sobral, R., Nakama, V., V., (2005). Nueva tendencia para conocer el estado de los suelos. <http://www.inta.gov.ar/Articulo>.
- Muazu, A., Eniolorunda, N. B., & Kabiru, S. (2025). SOIL SALINITY ASSESSMENT FOR CROP PRODUCTION SUSTAINABILITY IN JIBIA IRRIGATION SCHEME, KATSINA STATE, NIGERIA. *FUDMA JOURNAL OF SCIENCES*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.33003/fjs-2025-0902-3184>
- Munera, G. & Meza, D. (2012). El fosforo elemento indispensable para la vida vegetal. Universidad Tecnológica De Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/7377066a-bac4-4402-a306-eb45caa49d1c/content>.
- Munive Cerrón, R., Cabello Torres, R. J., Carbo-Bustanza, N., & Linkolk López-Gonzales, J. (2018). Evaluación de la calidad de suelos para el cultivo de maíz (*Zea mays*) en 4 distritos representativos del Valle del Mantaro. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 1(2). <https://doi.org/10.17162/rictd.v1i2.955>
- Mustafá, a.; Minggang, x.; Shah, s. a. a.; Abrar, m. m.; Nan, s.; Baoren, w.; Núñez-Delgado. (2020). A. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China. *Journal of Environmental Management*, v. 270, p. 110-194, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j>.
- Nannipieri, P. et al. (2003). Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*. 54:655
- Navarro, O. (2003). Architectural features of agricultural habitats and their impact on spider inhabitants. *Journal of Arachnology* 27:371-377.
- Navarro, A. Figueredo, B. Martínez, M. Gonzáles, F. y Osuna, E. S. (2008). Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos. *Agricultura Técnica en México*. 34 (2):151. <https://www.redalyc.org/pdf/608/60834202.pdf>
- Navarro, G. & Navarro, S. (2013). *Química agrícola, química del suelo y de nutrientes esencial*. 3 ed. Madrid (España): Mundi-Prensa, 492 p.
- Nel, T., Bruneel, Y., & Smolders, E. (2023). Comparison of five methods to determine the cation exchange capacity of soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 186(3), 311–320. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200378>

- Nichols, K. A., Toro, M. (2011). Whole soil stability index (WSSI) for evaluating soil aggregation. *Soil & tillage research*, 111(2), 99-104.
- Nkohla, N., & Dlaza, T. S. (2025). Macrofaunal Communities Associated with *Ecklonia radiata* Holdfast Along the Southeast Coast of South Africa. *Diversity*, 17(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/d17030203>
- Octavia, D., Murniati, Suharti, Sri, Hani, Aditya, Mindawati, Nina, Suratman, Swestiani, Dila, Junaedi, Ahmad, Undaharta, Ni Kadek Erosi, Santosa, Purwanto Budi, Wahyuningtyas, Reni Setyo, & Faubiany, V. (2023). Smart agroforestry for sustaining soil fertility and community livelihood. *Forest Science and Technology*, 19(4), 315–328. <https://doi.org/10.1080/21580103.2023.2269970>
- Olsen, S. R., Cole, C., Watanabe, F., & Dean, L. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. 939.
- Orjuela-Hernán, B. (2017). Quality and soil health influence on the nature and society. *Tendencias*, 1, 118–126.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [FAO] (2001). *Global status of salt-affected soils*. FAO; <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd3044en>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [FAO] (2024). Soil Biodiversity: What is it? Soil Biodiversity: Portal. Land and Water (AGL). FAO, (<http://www.fao.org/ag/AGL/agll/soilbiod/soilbtxt.htm>).pdf.
- Orozco, L.; Valverde, .I.; Martínez, R.; *et al.* (2016). Propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo con biofertilización cultivado con manzano. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 441 - 456. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S018757792016000400441&lng=es&nrm=iso
- Ortega, D. (1995). Consideraciones Generales para Interpretar Análisis de Suelos. En: Suelos de Colombia, origen, evolución, clasificación, distribución y uso. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Canal Ramírez Antares Ltda. Bogotá. p. 423.
- Ortiz, J., Panichini, M., Neira, P., Henríquez-Castillo, C., Gallardo Jara, R. E., Rodríguez, R., Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Ortiz, J., Panichini, M., Neira, P., Henríquez-Castillo, C., Gallardo Jara, R. E., Rodríguez, R., Mutis, A., Ramos, C., Espejo, W., Puc-Kauil, R., Zagal, E., Stolpe, N., Schoebitz, M.,

- Sandoval, M., & Dube, F. (2025). How Natural Regeneration After Severe Disturbance Affects Ecosystem Services Provision of Andean Forest Soils at Contrasting Timescales. *Forests*, 16(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/f16030456>
- Orsag, V. (2009). Manejo y conservación de suelos”. UMSA: La Paz, Bolivia. Análisis IBEP, 1(3), 1– 4. <http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/ra/v1n3/v1n3a06.pdf>
- Pagiola, L., Ota, M. (1997). La diversidad biológica o biodiversidad. Citado por ALTIERI. 33 p.
- Pan, H., Wei, D., Yang, L., Fu, X., Zhu, D., Lu, X., Liu, S., & Liu, Y. (2024). Phyllospheric fungal diversity in decomposing larch leaf litter: A comparative study of epiphytic and endophytic fungi. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1489889. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1489889>
- Parr, J.F. Papendick, R. I. Hornick, S. B. & Meyer, R. E. (1992). Soil quality: attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture. *American J. of Alternative Agriculture*. 7:5 <https://www.cambridge.org/core/journals/american-journal-of-alternative-agriculture/article/abs/soil-quality-attributes-and-relationship-to-alternative-and-sustainable-agriculture/FEB16F9D7CE013FB32EDEF98EEE5D20B>
- Pashanasi, B. (2001). Estudio cuantitativo de la macrofauna del suelo en diferentes sistemas de uso de la tierra en la Amazonía peruana. En: *Acta Amazônica*, 29 (3): 477 p.
- Passos, R. R.; Ruíz, H. A.; Mendonca, E. S.; Cantarutti, R. B.; Ssouza, A. P. (2007). Substâncias húmicas, atividade microbiana e carbono orgânico lábil em agregados de um Latossolo Vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 1119-1129.
- Peddle, S. D., Hodgson, R. J., Borrett, R. J., & Brachmann, S. (2024). *Practical applications of soil microbiota to improve ecosystem restoration: Current knowledge and future directions*. <https://doi.org/10.1111/brv.13124>
- Peña, T. (2016). *Materia orgánica y humus del suelo: todo sobre la alquimia del suelo*. España. 31 p.
- Peralta, G.; Álvarez, C. R.; Taboada, M. A. (2021). Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region of Argentina. A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, v. 211, p. 105-122, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.105022>
- Pérez, M.A. (2010). *Sistema Agroecológico Rápido de Evaluación de Calidad de Suelo y Salud de Cultivos*. Guía metodológica. Corporación Ambiental Empresarial. Bogotá, Colombia.

- Petru, B. J.; Ahn, C.; Chescheir, G. (2024). Alteration of soil hydraulic properties during the construction of mitigation wetlands in the Virginia Piedmont. *Ecological engineering*, v. 51, p. 140-150, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.073>
Revista Agro@mbiente On-line, v. 18, e8060, 21
- Pieri, C. (1989). *Fertilité des terres de savanes*. Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT. Paris, France.
- Pinos, D. E., (2022). Calidad del suelo a partir de indicadores físicos y químicos, aplicado a tres usos de suelo para la generación de propuestas de gestión por impactos en el suelo por acciones antrópicas en el bosque y vegetación protectores de Sunsun – Yanasacha. [Tesis de grado]. Universidad Politécnica Salasiana sede cuenca. Cuenca – Ecuador. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21860/1/UPS-CT009562.pdf>.
- Porta, J. et al. (2003). *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. 3ra. ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 929 p.
- Porta, M., López, A., Roquero, C. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 2ed. Ediciones Mundi Pren. Bilbao, España.
- Pratt, P. (1965). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. <https://www.scienceopen.com/book?vid=fad7ccfb-bdf7-46b6-98bf-e3d92c062846>
- Ramírez, M. (2004). Indicadores de estado: factores biológicos que limitan la calidad agrícola de los suelos. En: Primer Taller Nacional sobre indicadores de calidad de suelo. Centro Internacional de Agri- cultura Tropical (CIAT). Palmira, Colombia.
- Rawal, A., Lankau, R. A., & Ruark, M. D. (2024). How does soil organic matter affect potato productivity on sandy soil? *Soil Science Society of America Journal*, 88(5), 1748–1766. <https://doi.org/10.1002/saj2.20718>
- Reynolds, W; Bowman; B, Durylic., Tana, C., & Lu,C. (2002). Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110(1-2), 131-146. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)
- Riechman, J. & Sempere, J. (2003). *Cuidar la Tierra. Políticas agrarias y alimentarias sostenibles para entrar en el siglo XXI*. Icaria Editorial, S.A. Barcelona, España. 621 p.
- Rodríguez, A. C. Cristóbal, D. Álvarez, E. y Uribe, M. (2016). Indicadores de calidad de un suelo para la producción de maíz bajo sistema agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de ciencias agrícolas*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. Texcoco. Estado de México. 13 p. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7nspe16/2007-0934-remexca-7-spe16-3263.pdf>.

- Ross, S. M. (1993). Organic matter in tropical soils: current conditions, concerns and prospects for conservation. *Progress in Physical Geography*. 17: 265-305.
- Saab R. A., (2012). Evaluación de la calidad del suelo, en el sistema productivo orgánico la Estancia, Madrid, Cundinamarca, 2012. Utilizando indicadores de calidad de suelos. [Tesis de grado]. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. Colombia. 93 p. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8990/AbiSaabArriecheRosana2012.pdf?sequence=1>
- San Camilo. (2010). Comercializadora de granos S.A. Nuestras semillas: Maíz. EC. Consultado, 30 de oct. 2015. Formato HTML. Disponible en: <http://www.sancamilo.com.ec/maiz.html>
- Sánchez-Maranon, M. Soriano, M. Delgado, G. y Delgado, R. (2002). Soil quality in Mediterranean mountain environments: effects of land use change. *Soil Science Society of America Journal*. 66:948 <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2002.9480>
- Sari, E. (2023). *In Literature Review and Experiment: Diversity of Bacteria in Forest, Revegetated Post-Mining Land, and Active Tin Mining with A Metagenomic Approach* (Vol. 8, pp. 19–48). IJoST. <https://ejournal.kjpuipi.id/index.php/ijost/article/view/5>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. [SAGARPA]. (2012). Subíndice de Uso Sustentable del Suelo- Metodología de Cálculo. Recuperado de http://smye.info/rn/ind_fin/suelos/Documento_metodologico_suelos.pdf
- SEMARNAT. (2002). NOM-021-RECNAT-2000-. Norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial de la Nación. México, D.F. 73 p.
- Seybold, C. Mausbach, M. J. Karlen, D. J. y Rogers, H. (1997). Quantification of soil quality. In: *Soil process and the carbon cycle*. (Eds. R. Lal et al.). CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. p. 387
- Sillero, j., Hueso, p., y Ruiz, j. (2020). Differences in the Soil Quality Index for Two Contrasting Mediterranean Landscapes in Southern Spain. *Land*, 9(11), 405; <https://doi.org/10.3390/land9110405>
- Silva, H; Fonseca, R. & Guedes Filho, R. (2000). Características productivas y digestibilidad de la harina de hojas de yuca en dietas para pollos de engorde con o sin adición de enzimas. *Rev. Bras. Zootec.*, 29 (3): 823-829

- Simón, O., Luna, A., Pérez, A., Guidaldez, O. (2005). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Departamento de agricultura de los Estados Unidos. 88 p.
- Singer, M.J. & Ewing, S. (2000). Soil quality. In: Handbook of soil science. (Ed. M.E. Sumner). CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. p. 271
- Soil Survey Staff. (1993). Soil survey manual. United States Department of Agriculture. Hnbk no. 18 U.S. Gov. Printing Office, Washington, DC.
- Soil Survey Staff. (2006). Keys to Soil Taxonomy. Tenth Edition. United States Department of Agriculture. Washington, USA.
pp.http://soils.usda.gov/technical/classification/tax_keys/
- Soto, G. (2006). Calidad de los suelos: una nueva visión del suelo. I Congreso Latinoamericano de Experimentadores e Investigadores en Producción Orgánica. Managua, Nicaragua.
- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Sharma, U. C., Datta, M., & Sharma, V. (2025a). Chemistry, Microbiology, and Behaviour of Acid Soils. In U. C. Sharma, M. Datta, & V. Sharma (Eds.), *Soil Acidity: Management Options for Higher Crop Productivity* (pp. 121–322). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76357-1_3
- Sharma, U. C., Datta, M., & Sharma, V. (2025b). Recent Advances and Future Challenges. In U. C. Sharma, M. Datta, & V. Sharma (Eds.), *Soil Acidity: Management Options for Higher Crop Productivity* (pp. 523–580). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76357-1_6
- Sparling, G.P. (1997). Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling, as indicators of soil health. In: Biological indicators of soil health (Eds. C.E. Pankhursts, B.M. Doube y V.S.R. Gupta). CAB International. Oxon, UK. p. 97
- SQI-Soil Quality Institute. (1996). Indicators for soil quality evaluation. USDA natural resources conservation service. The National Soil Survey Center / The Soil Quality Institute, NRCS, USDA / The National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- Taiz, L., Zeiger, I., Moller, M. & Murphy, A. (2015). Plant Physiology and Development. 6 ed. Sunderland (USA): Sinauer Associates Inc. 761 p.
- The Global Biodiversity Information Facility. (2013). GBIF Backbone Taxonomy. Available in <http://www.gbif.org/species/5290052>
- Tian, S.; Zhu, B.; Yin, R.; Wang, M.; Jiang, Y.; Zhang, C.; Liu, M. (2022). Organic fertilization promotes crop productivity through changes in soil aggregation. *Soil Biology and*

- Biochemistry, v. 165, p. 108-533, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108533>
- Tormenta, C. A.; Barbosa, M. C.; Costa, A. C. S. (2002). Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo de solo. *Scientia Agricola*. v. 59, n. 4. p. 795-801, 2002. *Revista Agro@ambiente On-line*, v. 18, e8060, 2024 23
- Torres, M. (2008). *Fertilidad física, química y biológica*. Madrid blogs www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/01/29/83481
- Torres, M. (2008). *Fertilidad física, química y biológica*. Madrid blogs www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/01/29/83481
- Turbé, A. Toni, A. Benito, P. Lavelle, P. Lavelle, P. Ruíz, N. Van Der Putten, W. Labouze, E y Mudgal, S. (2010). Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers. Bio Intelligence Service, IRD, NIOO. Report for European Commission DG Environment. 14 p. <http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/1%20Exec%20Summ.pdf> [8/2/2010]
- Turgut, B.; Köse, B. (2016). Improvements in aggregate stability of sediments supplemented with tea waste and farmyard manure. *Spanish Journal of Soil Science* 6(2), 98-106. <file:///C:/Users/Windows/Downloads/DialnetImprovementsInAggregateStabilityOfSedimentsSupplem-6474606.pdf>
- Tsolis, V., & Barouchas, P. (2023). *Biochar as Soil Amendment: The Effect of Biochar on Soil Properties Using VIS-NIR Diffuse Reflectance Spectroscopy, Biochar Aging and Soil Microbiology—A Review*. <https://doi.org/10.3390/land12081580>
- Tudose, C., & Rîșnoveanu, G. (2023). Effects of Land Use on Millipede Communities (Subphylum Myriapoda, Class Diplopoda): A Review. *Transylvanian Review of Systematical and Ecological Research*, 25(3), 23–40. <https://doi.org/10.2478/trser-2023-0018>
- Udoh, B., & Akpan, U. (2025). Soil Clay Content and Fertility as Major Limiting Factors to Optimum Wetland Rice (ORIZA SATIVA) Production in Ini Local Government, Akwa Ibom State, Nigeria. 2025, 11(1), 2695–1894. <https://doi.org/10.56201/ijaes.vol.11.no1.2025.pg210.221>
- USDA (Natural Resources Conservation Service). (2008). Soil Quality Indicators. Soil Structure & Macropores.
- Valdés, L., Martínez, L., Bonilla, M., Castillo I. (2016). Efectos del fuego en algunas características de suelo de pinares, Macurije, Pinar del Rio, Cuba.

- (file:///C:/Users/USER/Desktop/TESIS%20METODOLOGIA/v12-n2-2-efectos-del-fuego-en-algunas-caracter%C3%ADsticas-de-suelos-de-pinares-Macurije-Pinar-del-R%C3%ADo-Cuba.pdf).
- VanderPlas, J. (2022). *Python Data Science Handbook, 2nd Edition*[Book]. <https://www.oreilly.com/library/view/python-data-science/9781098121211/>
- Vallejo, V. E., (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. Grupo de investigación Agua y Desarrollo Sostenible, programa de Ingeniería Ambiental. Facultad de ingeniería. Revista Colombia Forestal. Bogotá. Colombia. 17 p. <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v16n1/v16n1a06.pdf>
- Vandermeer, J. (2011). *The Ecology of Agroecosystems*. by Jones and Barlett Publishers. Massachusetts, USA. 405 p. [file:///C:/Users/UNAS/Downloads/The_Ecology_of_Agroecosystems\(BookFi.org\)\[John_Vandermeer\]_.pdf](file:///C:/Users/UNAS/Downloads/The_Ecology_of_Agroecosystems(BookFi.org)[John_Vandermeer]_.pdf)
- Villalba Algarin, C. A. (2025). *Exploring the state of the art of tillage and its impact on soil quality and agricultural productivity: A critical review of the last 20 years*. San Lorenzo: Universidad Nacional de Asunción Facultad de Ciencias Agrarias.
- Villani, M. Allee, L. L. Díaz, A. y Robbins, P. S. (1999). Adaptive strategies of edaphic arthropods. *Annual Reviews Entomology*. 44:233. <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.ento.44.1.233>
- Visscher, A. M., Meli, P., Fonte, S. J., Bonari, G., Zerbe, S., & Wellstein, C. (2024). Agroforestry enhances biological activity, diversity and soil-based ecosystem functions in mountain agroecosystems of Latin America: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 30(1), e17036. <https://doi.org/10.1111/gcb.17036>
- Voltr, V.; Wollnerivá, J.; Fuksa, P.; Hruska, M. (2021). Influence of tillage on the production inputs, outputs, soil compaction and GHG emissions. *Agriculture*, v. 11, n. 5, p. 456-481, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agricultura11050456>
- Walkley, A., & 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(1), 29.
- Wang, L., Cheng, Y., Meftaul, I. M., Luo, F., Kabir, M. A., Doyle, R., Lin, Z., & Naidu, R. (2024). Advancing Soil Health: Challenges and Opportunities in Integrating Digital Imaging, Spectroscopy, and Machine Learning for Bioindicator Analysis. *Analytical Chemistry*, 96(20), 8109–8123. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.3c05311>

- Wardle, D., Bardgett, R. (2004). Indirect effects of invertebrate herbivory on the decomposer subsystem. *Ecological Studies* 173: 53:69.
- Wolters, V. (2000). Invertebrate control of soil organic matter stability. *Biology and Fertility of Soils*. 31 (1):1. <https://link.springer.com/article/10.1007/s003740050618>
- Xu, L., Chen, J., Xing, Y., Dai, H., Ma, X., Zhang, S., Chen, X., & Deng, L. (2025). Multi-factors monitoring enhances comprehension of the species diversity, structure and zonation patterns of Dafengjiang mangrove wetland in Beibu Gulf. *Regional Studies in Marine Science*, 81, 103954. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103954>
- Zhang, B.; Jia, Y.; Fan, H.; Guo, C.; Fu, J.; Li, S.; Ma, R. (2024) Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. *Land Degradation & Development*, v. 18, p. 108-197, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.5144>
- Zavala, S. W. (1999). Estudio Morfopedológico Como base para la recuperación de suelo Degradados en Tingo María. Tesis Ms C. UNAM la Molina Perú.
- Zavaleta, G. (1992). Edafología. El suelo en relación con la producción. Consejo Nacional de Concentración y Tecnología. Lima, Perú.
- Zeng, Y., Verhoef, A., Vereecken, H., Ben-Dor, E., Veldkamp, T., Shaw, L., Wang, Y., & Su, Z. B. (2024). *Tracking Soil Health: Monitoring and Modeling the Soil-Plant System*. <https://www.authorea.com/doi/full/10.22541/essoar.171804479.91646868?commit=1895d554009038158153628f15ff464dd7d3062d>
- Zerpa, G. 2006. Acción del pisoteo de la hacienda sobre la estabilidad estructural de un suelo. En: IV Congreso de la Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo y Reunión Internacional de Rhizosfera. 2 p.

ANEXOS

Anexo 1. Tablas para la interpretación de los indicadores físicos, químicos y biológicos

Tabla 25. Dimensión de partículas del suelo

Componente	Diámetro (mm)
Arena gruesa	2.00-1.00
Arena media	0.50-0.25
Arena fina	0.25-0.10
Arena muy fina	0.10-0.05
Limo	0.05-0.002
Arcilla	menos de 0.002

Fuente: Sistema de clasificación USDA - Laboratorio de suelos UNAS

Tabla 26. Valores de la densidad aparente para los tipos de textura del suelo

Textura	Da (g/cm ³)	Clase textural	DA (g/cm ³)
Arena	1.5 – 1.8	Migajón arcillo-limoso	1.15 – 1.3
Arena migajón	1.4 – 1.7	Arcilla arenosa	1.1 – 1.25
Migajón arenoso	1.3 – 1.5	Arcilla limosa	1.1 – 1.25
Migajón	1.2 – 1.4	Arcilla	1.05 – 1.2
Migajón limoso	1.15 – 1.4	Arcilla en agregados	0.9 – 1.1
Limo	1.15 – 1.4	Arcilla sódica	1.2 – 1.5
Migajón arcillo-arenoso	1.15 – 1.3	Arena compactada	1.8 – 1.9
Migajón arcilloso	1.15 – 1.3	Suelo orgánico	0.8 – 1.0

Fuente: Navarro, (2003).

Tabla 27. Valores interpretativos de densidad aparente

DA (g/cm ³)	Tipos de suelo
< 1.00	Orgánicos y volcánicos
1.0 – 1.19	Minerales:
1.20 – 1.32	Arcilloso
> 1.32	Franco
	Arenoso

Fuente: NAVARRO, (2003).

Tabla 28. Escala de resistencia a la penetración del suelo agrícola

Apreciación	RP (MPa)
Sin restricciones	$0 \leq RP \leq 0,9$
Leves restricciones	$0,9 < RP \leq 1,4$
Moderadas a severas restricciones	$1,4 < RP \leq 2$
Restringido para el enraizamiento	$RP > 2$

Fuente: Zerpa (2006)

Tabla 29. Niveles de pH del suelo

Descripción	Rango
Extremadamente ácido	$< 4,5$
Fuertemente ácido	4,6 – 5,4
Moderadamente ácido	5,5 – 6,5
Neutro	6,6 - 7,3
Moderadamente alcalino	7,4 – 8,5
Fuertemente alcalino	$> 8,5$

Fuente: Laboratorio análisis de suelos de la UNAS.

Tabla 30. Niveles de la materia orgánica

Nivel	Contenido (%)
Bajo o pobre	menos de 2
Medio	2 – 4
Alto	mayor de 4

Fuente: SOIL SURVEY STAFF (1993)

Tabla 31. Niveles de nitrógeno total en el suelo

Nivel	Nitrógeno (%)
Bajo	$< 0,1$
Medio	0,1 – 0,2
Alto	$> \text{de } 0,2$

Fuente: SOIL SURVEY STAFF (1993)

Tabla 32. Niveles de fósforo disponible en el suelo

Nivel	Rangos (ppm)
Muy Bajo	< 5,0
Bajo	5,1 – 15
Normal	15,1 – 30
Alto	30,1 - 40

Fuente: Soil Survey Staff (1993).

Tabla 33. Niveles de potasio en el suelo

Nivel	Rango (kg K ₂ O/ha)	Rango (ppm)
Bajo	< 300	< 100
Medio	300 - 600	100 - 240
Alto	> 600	> 240

Fuente: Soil Survey Staff (1993).

Tabla 34. Niveles de capacidad de intercambio catiónico (pH > 5.5)

Nivel	CIC (meq/100 g de suelo)
Bajo	menos de 12
Medio	12 – 20
Alto	mayor de 20

Fuente: SOIL SURVEY STAFF (1993)

Tabla 35. Niveles de capacidad de intercambio catiónico (pH < 5.5)

Nivel	CIC (meq/100 g de suelo)
Bajo	menor de 4
Medio	10 - 20
Alto	mayor de 30

Fuente: SOIL SURVEY STAFF (1993)

Tabla 36. Diversidad y densidad relativa de macrofauna en cacao según índice de Shannon – Wiener (H')

Orden	Cacao		
	Individuos (m2)	Proporción relativa de individuo por Orden	Índice de Diversidad (H') Cacao
Araneae	38	0.03	-0.05
Coleóptera	56	0.05	-0.06
Dermaptera	29	0.02	-0.04
Dictióptera	10	0.01	-0.02
Diplopoda	26	0.02	-0.04
Díptera	46	0.04	-0.05
Haplotaxida	250	0.21	-0.14
Hemíptera	45	0.04	-0.05
Himenóptera	64	0.05	-0.07
Isópoda	149	0.13	-0.11
Isóptera	382	0.32	-0.16
Lepidóptera	30	0.03	-0.04
Orthóptera	52	0.04	-0.06
Paurápodos	3	0.00	-0.01
Stylommatóphora	2	0.00	0.00
Total	1182		-0.91

Tabla 37. Diversidad y densidad relativa de macrofauna en maíz según índice de Shannon – Wiener (H')

Orden	Maíz		
	Individuos (m2)	Proporción relativa de individuo por Orden	Índice de Diversidad (H') Maíz
Araneae	51	0.05	-0.07
Coleóptera	53	0.05	-0.07
Dermaptera	13	0.01	-0.02
Dictióptera	5	0.01	-0.01
Diplopoda	22	0.02	-0.04
Díptera	45	0.05	-0.06
Haplotaxida	120	0.12	-0.11
Hemíptera	40	0.04	-0.06
Himenóptera	72	0.07	-0.08
Isópoda	192	0.19	-0.14
Isóptera	300	0.30	-0.16
Lepidóptera	25	0.03	-0.04
Orthóptera	40	0.04	-0.06

Paurápodos	10	0.01	-0.02
Stylommatóphora	0	0.00	
Total	988		-0.93

Tabla 38. Diversidad y densidad relativa de macrofauna en cítrico según índice de Shannon – Wiener (H')

Orden	Cítrico		
	Individuos (m2)	Proporción relativa de individuo por Orden	Índice de Diversidad (H') Cítrico
Araneae	51	0.06	-0.07
Coleóptera	49	0.06	-0.07
Dermaptera	7	0.01	-0.02
Dictióptera	0	0.00	
Diplopoda	13	0.02	-0.03
Díptera	39	0.05	-0.06
Haplotaxida	98	0.12	-0.11
Hemíptera	19	0.02	-0.04
Himenóptera	72	0.09	-0.09
Isópoda	192	0.23	-0.15
Isóptera	241	0.29	-0.16
Lepidóptera	11	0.01	-0.02
Orthóptera	29	0.03	-0.05
Paurápodos	10	0.01	-0.02
Stylommatóphora	0	0.00	
Total	831		-0.90

Tabla 39. Diversidad y densidad relativa de macrofauna en sotobosque o purma según índice de Shannon – Wiener (H')

Orden	Purma		
	Individuos (m2)	Proporción relativa de individuo por Orden	Índice de Diversidad (H') Purma
Araneae	19	0.01	-0.02
Coleóptera	105	0.07	-0.08
Dermaptera	8	0.01	-0.01
Dictióptera	6	0.00	-0.01
Diplopoda	75	0.05	-0.06
Díptera	76	0.05	-0.06
Haplotaxida	258	0.17	-0.13
Hemíptera	69	0.04	-0.06
Himenóptera	303	0.20	-0.14
Isópoda	245	0.16	-0.13

Isóptera	295	0.19	-0.14
Lepidóptera	15	0.01	-0.02
Orthóptera	79	0.05	-0.07
Paurápodos	0	0.00	
Stylommatóphora	0	0.00	
Total	1523		-0.93

Tabla 40. Resistencia a la penetración por SUS

SUS Cacao	SUS Maíz	SUS Cítrico	SUS Purma
RPS (kg/cm ²)	RPS (kg/cm ²)	RPS (kg/cm ²)	RPS (kg/cm ²)
1.57	1.57	1.84	1.66
1.67	1.67	1.74	1.64
1.76	1.76	1.83	1.61
1.77	1.77	1.79	1.62
1.62	1.62	1.77	1.48
1.64	1.64	1.80	1.66
1.69	1.69	1.74	1.70
1.71	1.71	1.69	1.69
1.76	1.76	1.79	1.63
1.84	1.84	1.74	1.60
1.79	1.79	1.69	1.59
1.78	1.78	1.79	1.79

Tabla 41. Densidad aparente por SUS

N° Muestra	SUS Cacao	SUS Maíz	SUS Cítrico	SUS Purma
	DA (g/cm ³)	DA (g/cm ³)	DA (g/cm ³)	DA (g/cm ³)
M1	1.52	1.52	1.52	1.38
M2	1.56	1.62	1.62	1.43
M3	1.47	1.57	1.57	1.48
M4	1.42	1.52	1.52	1.53
M5	1.52	1.57	1.57	1.53
M6	1.52	1.62	1.62	1.38
M7	1.53	1.62	1.62	1.43
M8	1.47	1.57	1.57	1.53
M9	1.57	1.57	1.57	1.48
M10	1.52	1.62	1.62	1.43
M11	1.47	1.57	1.57	1.43
M12	1.42	1.52	1.52	1.48

Tabla 42. Contenido de pH por SUS

SUS Cacao	SUS Maíz	SUS Cítrico	SUS Purma
5.78	6.72	3.55	4.39
5.68	5.25	6.08	6.08
5.55	5.32	6.21	6.21
5.60	6.00	3.50	4.30
5.65	5.85	3.55	4.40
5.64	5.60	3.50	4.45
5.50	5.80	3.40	4.20
5.55	5.70	3.45	4.30
5.60	5.60	3.50	4.40
5.40	5.60	3.30	4.20
5.45	5.50	3.40	4.25
5.50	5.55	3.45	4.20

Tabla 43. Contenido de MO% por SUS

SUS Cacao	SUS Maíz	SUS Cítrico	SUS Purma
2.13	3.94	1.71	1.49
2.12	3.80	1.70	1.45
1.13	3.70	1.68	1.44
2.1	3.90	1.70	1.45
2.15	3.80	1.69	1.43
2.14	3.70	1.65	1.43
2.05	3.85	1.65	1.43
2.04	3.80	1.63	1.42
2.03	3.70	1.62	1.41
2.02	3.80	1.63	1.42
2.01	3.70	1.61	1.41
2.02	3.60	1.55	1.42

Tabla 44. Contenido de N% por SUS

SUS Cacao	SUS Maíz	SUS Cítrico	SUS Purma
0.107	0.20	0.09	0.08
0.1	0.15	0.08	0.07
0.08	0.10	0.07	0.08
0.09	0.10	0.08	0.07
0.07	0.08	0.07	0.06

0.05	0.06	0.06	0.05
0.08	0.08	0.06	0.06
0.06	0.06	0.07	0.06
0.06	0.04	0.06	0.05
0.05	0.05	0.07	0.06
0.04	0.05	0.06	0.05
0.05	0.04	0.07	0.06

Tabla 45. Contenido de P por SUS

SUS Cacao	SUS Maíz	SUS Cítrico	SUS Puema
11.897	11.228	6.864	5.797
11.8	11.25	6.85	5.75
11.87	11.2	6.8	5.7
11.8	11.2	6.8	5.8
11.75	11.22	6.75	5.79
11.73	11.23	6.78	5.75
11.75	11.2	6.85	5.85
11.7	11.25	6.83	5.8
11.65	11.2	6.8	5.82
11.75	11.25	6.85	5.85
11.73	11.24	6.8	5.84
11.7	11.22	6.82	5.83

Tabla 46. Contenido de K por SUS

SUS Cacao	SUS Maíz	SUS Cítrico	SUS Purma
82.599	123.38	212.14	133.66
82.53	123.35	212.13	133.65
82.48	123.30	212.12	133.6
82.58	123.37	212.12	133.62
82.50	123.35	212.11	133.63
82.45	123.32	212.10	133.62
82.52	123.35	212.11	133.64
82.52	123.34	212.10	133.62
81.62	123.30	212.09	133.60
82.51	123.34	212.10	133.62
82.50	123.32	212.09	133.50
82.51	123.30	212.08	133.45

Tabla 47. Contenido de CIC por SUS

SUS Cacao	SUS Maíz	SUS Cítrico	SUS Purma
5.56	6.74	0.00	0.00
5.53	6.70	0.00	0.00
5.50	6.60	0.00	0.00
5.55	6.72	0.00	0.00
5.52	6.65	0.00	0.00
5.50	6.60	0.00	0.00
5.54	6.71	0.00	0.00
5.50	6.60	0.00	0.00
5.45	6.50	0.00	0.00
5.53	6.70	0.00	0.00
5.45	6.49	0.00	0.00
5.40	6.56	0.00	0.00

Tabla 48. Densidad relativa (%) por orden taxonómica y comparación con MO %

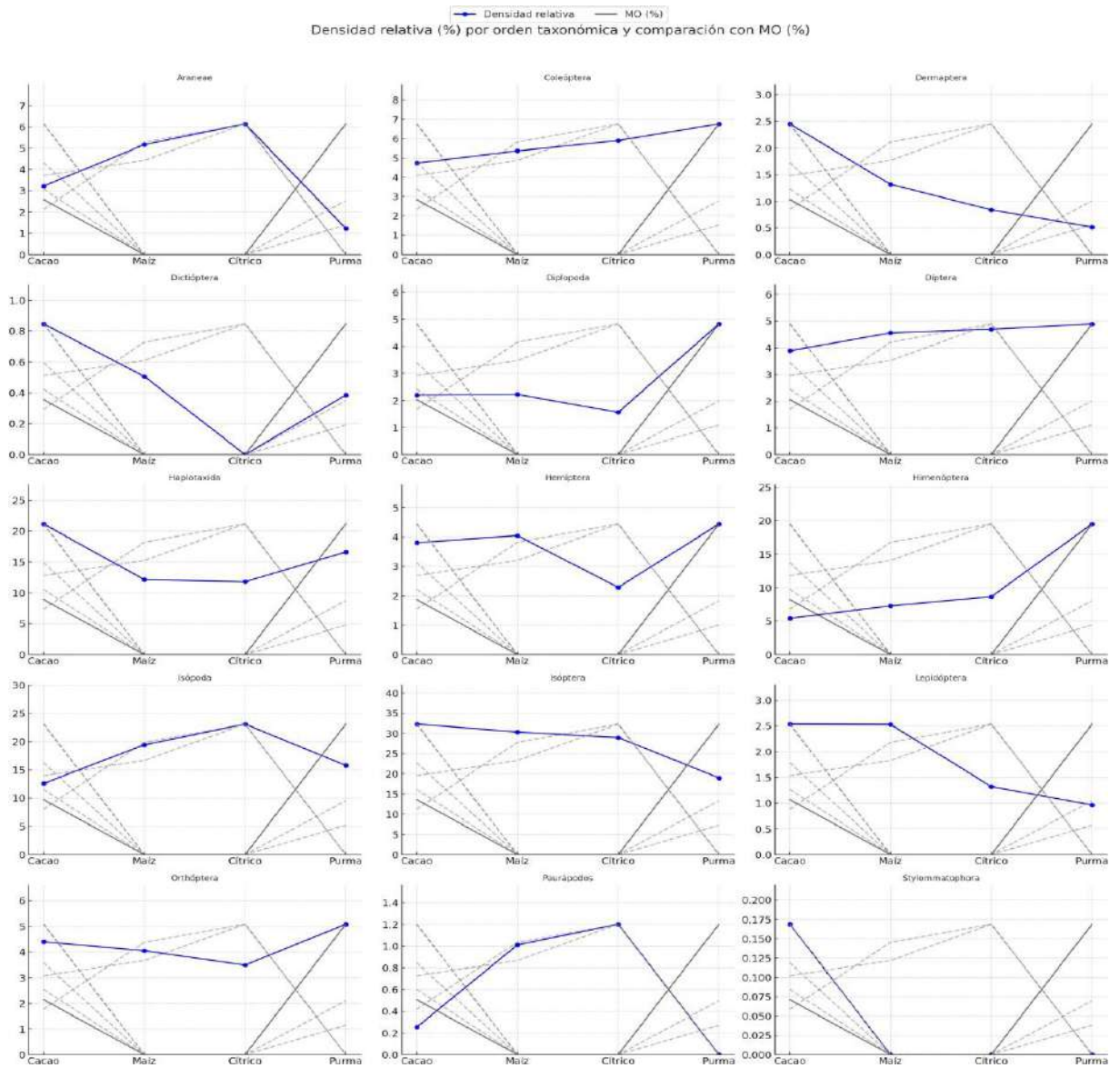


Tabla 49. Densidad relativa (%) por orden taxonómica y comparación con P

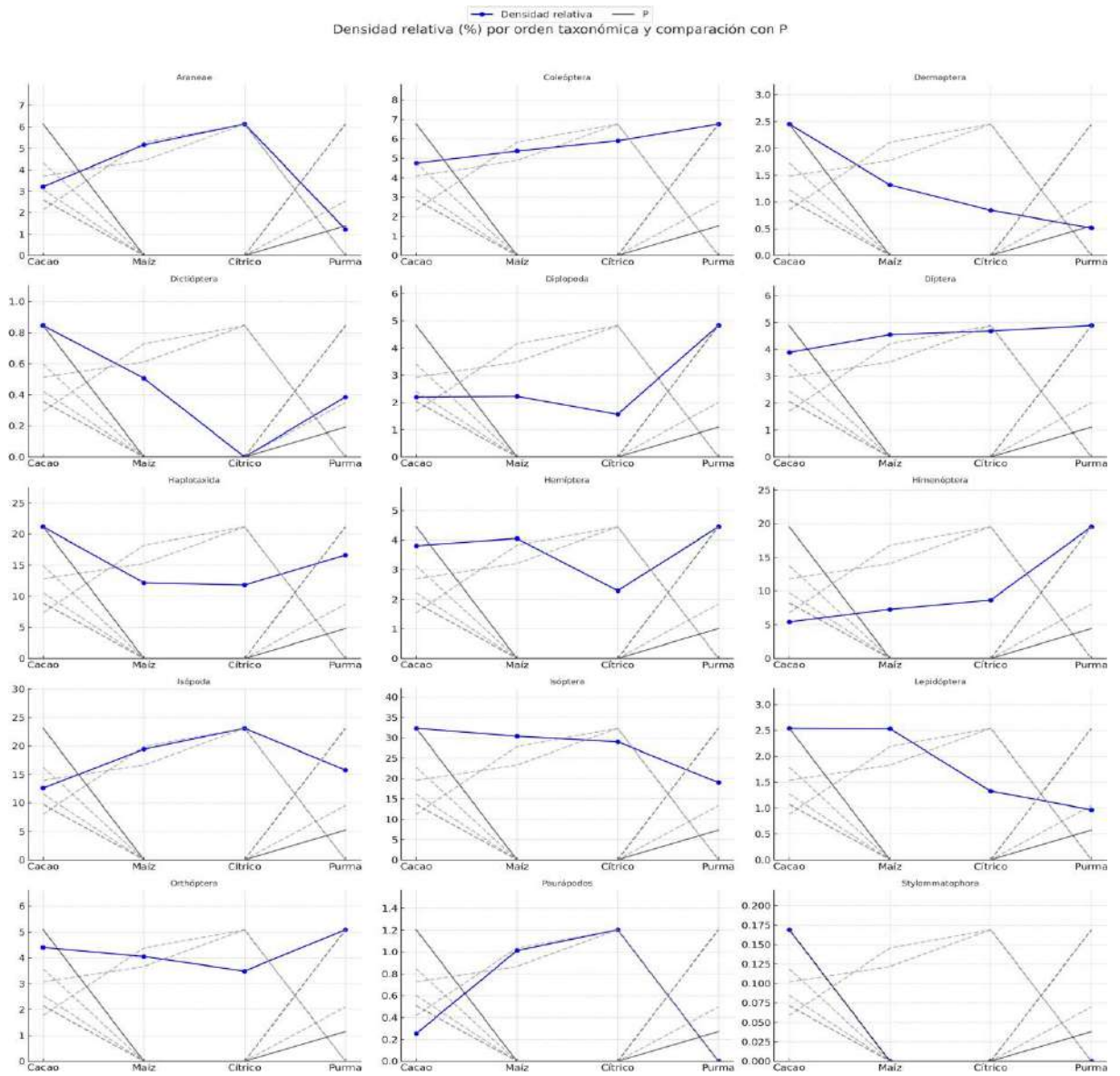


Tabla 50. Densidad relativa (%) por orden taxonómica y comparación con K

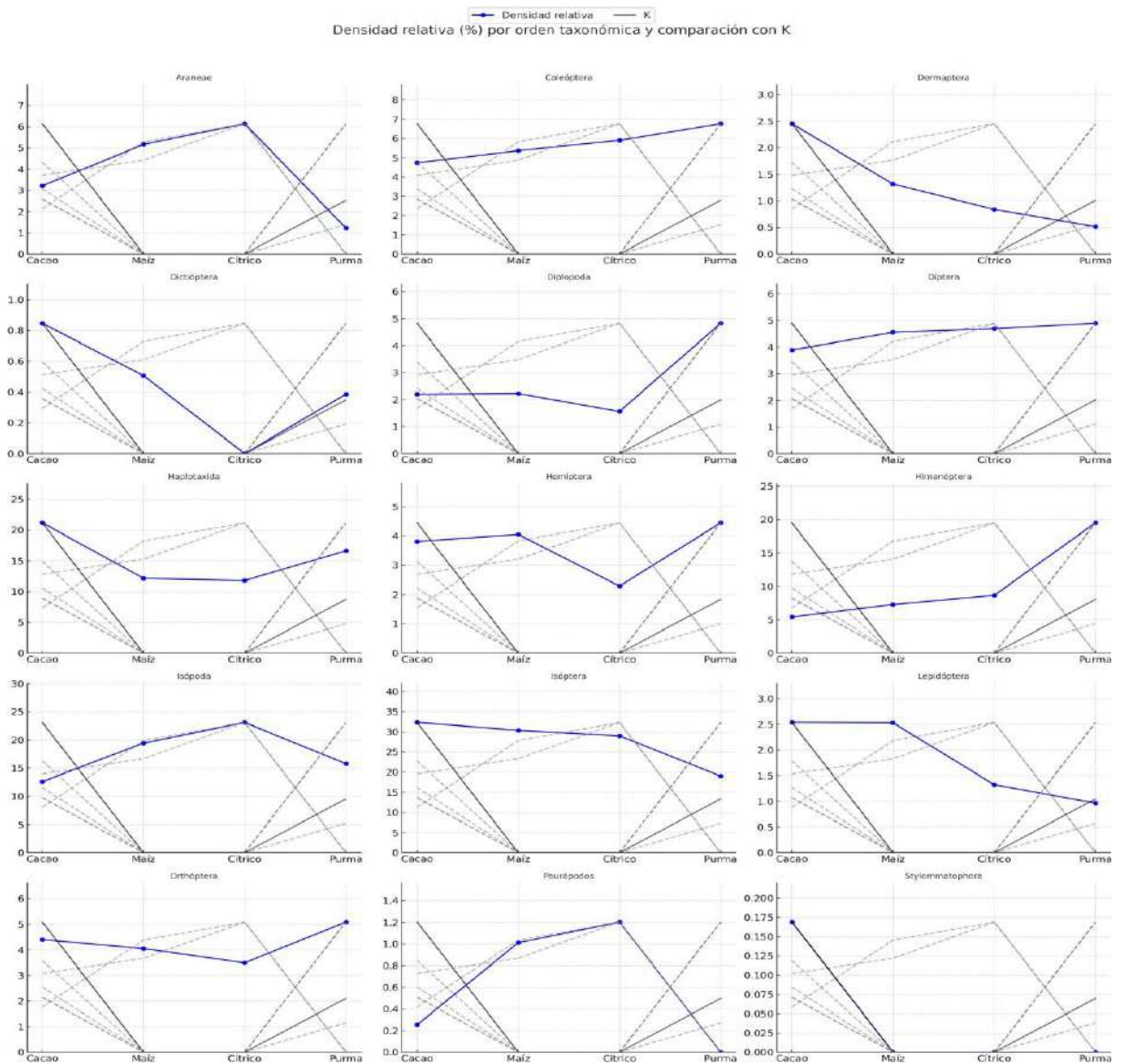
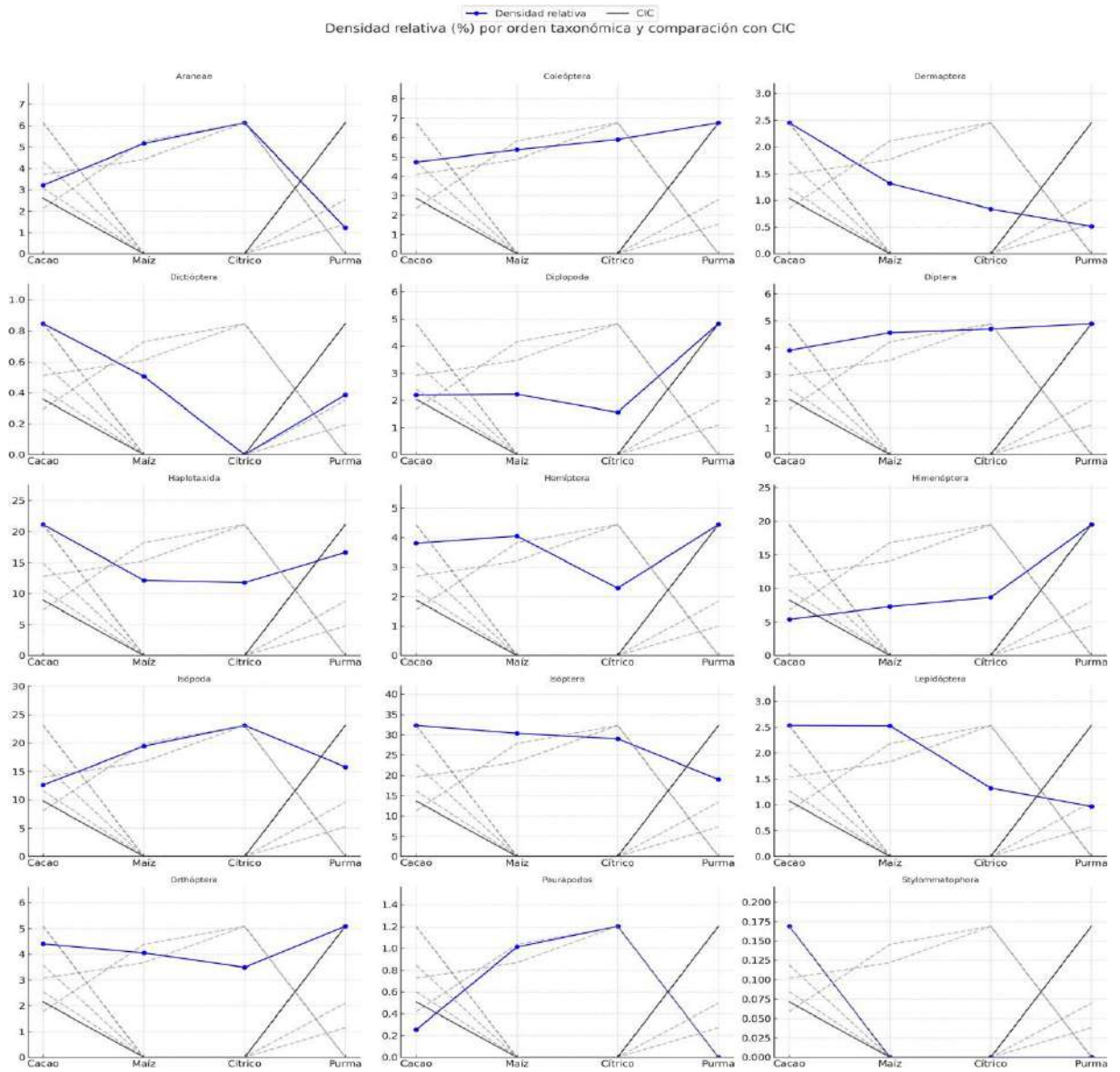


Tabla 51. Densidad relativa (%) por orden taxonómica y comparación con CIC



Anexo 2. Panel fotográfico**Figura 18.** Sistema de uso Cacao.**Figura 19.** Sistema de uso Maíz



Figura 20. Muestreo de suelo en un sistema de uso Maíz



Figura 21. Muestreo de suelo en un sistema de uso cacao



Figura 22. Muestra del perfil del suelo



Figura 23. Determinando la textura del suelo



ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	SAJAMÍ TAKIO KEVIN JHORDY	FECHA DE REPORTE:	14/12/2024
PROCEDENCIA:	CUENCA SUPTE	FECHA DE RECEPCIÓN:	25/10/2024
REFERENCIA:	TESIS	FECHA DE INICIO DE:	25/10/2024

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS					ANÁLISIS FÍSICO						ANÁLISIS QUÍMICO															
						Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	CE	pH	Materia Orgánica	N	C	P	K2O	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio
						Ao	Arc	Lo		dS/m								Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrógeno				
						CODIGO DEL LABORATORIO	FISIOLOGRAFÍA	VEGETACION	CODIGO	PROF CM	%	%	%	1:1	1:1	%		%	%	ppm	ppm	CAMBIABLES Cmol(+)/kg					
1	S25-1280-100	CBLD	Cacao	MI	0 - 30	32	24	46	Franco	0.18	5.78	2.13	0.107	1.238	11.897	82.599		5.561	4.770	0.569	0.132	0.090	1.940				
2	S25-1280-101	CBLD	Maz	MI	0 - 30	46	20	34	Franco	0.12	6.72	3.93	0.196	2.279	11.228	123.381	6.735	5.420	0.851	0.347	0.117	1.700	0.000	0.000	100.000	0.000	0.000
3	S25-1280-102	CBLD	Citrico	MI	0 - 30	42	22	36	Franco	0.79	3.55	1.71	0.085	0.992	6.864	212.145	---	1.770	0.209	0.673	0.076	1.940	0.000	0.000	100.000	0.000	0.000
4	S25-1280-104	CBLD	Sotobosque o Purma	MI	0 - 30	40	20	40	Franco	0.25	4.39	1.49	0.075	0.864	5.797	133.667	---	3.250	0.540	0.625	0.969	1.680	0.000	0.000	100.000	0.000	0.000

Figura 24. Análisis de suelo de los sistemas de uso