

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN CONSERVACION DE
SUELOS



**CALIDAD DEL SUELO EN TRES SISTEMAS DE USO CASERIO BIJAO, DISTRITO
JOSE CRESPO Y CASTILLO – AUCAYACU**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA

PRESENTADO POR:

BAUTISTA MARIÑO YORVY RONAL

Tingo María - Perú 2026



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 020-2026-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 23 de enero de 2026, a horas 11:00 a.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 EN TRES SISTEMAS DE USO CASERÍO BIJAO,
DISTRITO JOSE CRESPO Y CASTILLO – AUCAYACU”**

Presentado por el Bachiller: **BAUTISTA MARIÑO, YORVY RONAL** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“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, 17 de febrero de 2026

Dr. WILFREDO ALVA VALDIVIEZO
PRESIDENTE

Ing. MSc. ANDY WILLIAMS VELA ZEVALLOS
MIEMBRO

Ing. JAIME TORRES GARCIA
MIEMBRO



Dr. HECTOR AGUIRRE ESPINOZA
ASESOR

Ing. MSc. JUAN PABLO BENGIFO 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 Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 091 - 2026 - CS-RIDUNAS

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

CERTIFICA QUE:

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

Programa de Estudio:

Ingeniería 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 EN TRES SISTEMAS DE USO CASERIO BIJAO, DISTRITO JOSE CRESPO Y CASTILLO – AUCAYACU	BAUTISTA MARIÑO YORVY RONAL	13 % Trece	Menor a 20 %

Tingo María, 20 de marzo de 2026.


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

C.C. Archivo

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



TESIS Y/O INVESTIGACIÓN

Título : Calidad de suelo en tres sistemas de uso Caserío Bijao,
distrito Jose Crespo y Castillo - Aucayacu.

Área de investigación : Ciencias Básicas

Grupo de investigación : Ciencias Básicas

Línea (s) de investigación : Física y química de suelos.

Autor : Bautista Mariño, Yorvy Ronal

Asesor (es) : Ing. M. Sc. Juan Pablo Rengifo Trigozo.

Lugar de ejecución : Caserío Bijao, distrito José Crespo y Castillo -
Aucayacu.

Duración del trabajo : 6 meses

Financiamiento : S/ 5 870,70

FEDU : No

Propio : Si

Otros : No

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J.P. Rengifo'.

Tingo María – Perú Mayo, 2026

DEDICATORIA

A Dios, fuente infinita de sabiduría y fortaleza, gracias por guiar mis pasos en cada momento de este camino. Por ser mi luz en los momentos de incertidumbre y por darme la perseverancia para alcanzar esta meta. Que esta tesis sea un testimonio de gratitud por tu amor y fidelidad incondicionales.

A mis padres Javier Bautista Cerrón y Martha Mariño Sedano, a mi hermana Génesis Romina Bautista Mariño, pilares fundamentales de mi vida, les dedico con todo mi corazón este logro. Gracias por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Cada sacrificio, cada consejo y cada sonrisa han sido el motor que me impulsó a seguir adelante. Esta tesis es también suya, porque sin ustedes, nada de esto habría sido posible

AGRADECIMIENTOS

- A mi alma mater, la Universidad Nacional Agraria de la Selva, institución que forjó mi formación académica y profesional. Gracias por brindarme las herramientas, los conocimientos y los valores que hoy me permiten alcanzar este logro.
- A los docentes de la carrera profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua, quienes con dedicación y pasión compartieron sus saberes y experiencias.
- A mi asesor MSc. Juan Pablo Rengifo Trigozo, por su invaluable guía, paciencia y apoyo durante todo el proceso de investigación. Sus conocimientos, críticas constructivas y motivación fueron fundamentales para culminar este trabajo.
- A mis jurados evaluadores Dr. Wilfredo Alva Valdiviezo, MSc. Andy Williams Vela Zevallos, al Ing. Jaime Torres García y, por honrarme con su tiempo, experiencia y valiosas aportaciones para enriquecer esta tesis.

INDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Marco teórico.....	3
2.1.1. El uso de suelo.....	3
2.1.2. La calidad del suelo.....	4
2.1.3. Indicadores de la calidad del suelo.....	4
2.1.4. Inventario de la macrofauna edáfica.....	6
2.1.5. Importancia de macrofauna en el suelo.....	6
2.1.6. Densidad de macrofauna en el suelo.....	7
2.1.7. Diversidad de especies.....	7
2.1.8. Cuantificación de la diversidad de especies.....	8
2.1.9. Factores que influyen en la densidad y diversidad de la macrofauna del suelo.....	10
2.1.10. Biomasa microbiana.....	10
2.1.11. La biodiversidad.....	10
2.1.12. Diversidad de especies.....	10
2.1.13. Riqueza biológica.....	11
2.1.14. Diversidad alfa.....	11
2.2. Estado del arte.....	11
2.2.1. Antecedentes.....	11
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.1. Lugar de ejecución.....	14
3.1.1. Ubicación geográfica y política.....	14
3.1.2. Descripción del área.....	14
3.1.3. Datos climáticos.....	15

3.1.4. Relieve.....	16
3.1.5. Hidrografía.....	16
3.1.6. Accesibilidad	17
3.2. Materiales y equipos	17
3.2.1. Materiales y equipos	17
3.2.2. Métodos	17
3.2.2.1. Componentes de investigación.....	17
3.2.2.2. Caracterización de las propiedades físicas y químicas del suelo en tres sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao.....	22
3.2.2.3. Evaluación de la diversidad y abundancia de la macrofauna edáfica presente en los tres sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao.....	24
3.2.2.4. Análisis de la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la macrofauna edáfica en los tres sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao.....	27
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
4.1. Caracterización de las propiedades físicas y químicas del suelo en tres sistemas de uso en el caserío Bijao	29
4.1.1. Propiedades físicas del suelo.....	29
4.2.1. Propiedades químicas del suelo en el caserío bijao	30
4.2. Evaluación de la abundancia y diversidad de la macrofauna edáfica presente en los tres sistemas de uso en el caserío Bijao	42
4.2.1. Abundancia de la macrofauna edáfica.....	42
4.2.2. Composición taxonómica de la macrofauna edáfica.....	46
4.2.3. Riqueza de especies	47
4.3. Análisis de la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la macrofauna edáfica en los tres sistemas de uso en el caserío Bijao	49
4.3.1. Correlación de las propiedades físicas con la macrofauna edáfica.....	49
4.3.2. Correlación de las propiedades químicas con la macrofauna edáfica	50

4.3.3. Correlación entre las propiedades físicas y químicas	51
V. CONCLUSIONES	54
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	55
VII. REFERENCIAS.....	56
ANEXO.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Rangos de interpretación de propiedades físicas y químicas del suelo.....	5
2. Coordenadas UTM (Datum WGS 84, UTM/UPS) del área de investigación.....	14
3. Variables en estudio.....	20
4. Determinación de los indicadores físicos y químicos evaluados.....	24
5. Textura del suelo en los sistemas de uso del caserío Bijao.....	29
6. Valores obtenidos de la densidad aparente del suelo (g/cm^3) en los sistemas de uso del caserío Bijao.....	30
7. Resistencia a la penetración del suelo (kg/cm^2) en los sistemas de uso del caserío Bijao.....	32
8. Valores de pH del suelo en los sistemas de uso del caserío Bijao.....	33
9. Variación del contenido de materia orgánica (%) en los sistemas de uso del suelo.....	34
10. Contenido de nitrógeno total del suelo (%) en los sistemas de uso del caserío Bijao.....	35
11. Fósforo disponible (ppm) en los sistemas de uso del suelo del caserío Bijao.....	36
12. Potasio disponible (ppm) en los sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao.....	37
13. Capacidad de intercambio catiónico del suelo (cmol/kg) en los sistemas de uso del caserío Bijao.....	38
14. Calcio intercambiable (cmol/kg) en los sistemas de uso del caserío Bijao.....	39
15. Magnesio intercambiable (cmol/kg) en los sistemas de uso del caserío Bijao.....	40
16. Abundancia de macrofauna edáfica en los sistemas de uso del suelo del caserío Bijao.....	42
17. Diversidad de Shanon, Wiener y Simpson de la macrofauna edáfica en el caserío de Bijao.....	47
18. Correlación entre propiedades físicas y abundancia/diversidad de la macrofauna.....	49
19. Correlación entre propiedades químicas y la macrofauna.....	51
20. Correlación entre propiedades físicas y químicas del suelo.....	52

21. Valores de la macrofauna en el sistema de uso con <i>P. aquilinum</i>	61
22. Valores de la macrofauna en el sistema de uso con <i>A. bicornis</i>	61
23. Valores de la macrofauna en el sistema de uso con <i>E. coca</i>	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Valores de la textura del suelo entre los sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao....	30
2. Variación de la densidad aparente entre los sistemas de uso del suelo.....	31
3. Intensidad de resistencia mecánica del suelo por sistema de uso.....	32
4. Variación del pH del suelo entre los sistemas de uso del caserío Bijao.....	34
5. Materia orgánica del suelo (%) en los sistemas de uso del caserío Bijao.....	35
6. Distribución del nitrógeno total (%) en los sistemas de uso del suelo.....	35
7. Variación del fósforo disponible (ppm) entre los sistemas de uso del suelo.....	37
8. Variación del potasio disponible (ppm) entre los sistemas de uso del suelo.....	38
9. Capacidad de intercambio catiónico efectiva del suelo (cmol/kg) entre los sistemas de uso del suelo.....	39
10. Distribución del calcio intercambiable (cmol/kg) en los sistemas de uso del suelo.....	40
11. Variación del magnesio intercambiable (cmol/kg) en los sistemas de uso del suelo.....	41
12. Abundancia total de macrofauna edáfica en los sistemas de uso del suelo del caserío Bijao.....	44
13. Análisis de caracterización de suelos del caserío Bijao.....	63

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar la calidad del suelo en tres sistemas de uso del suelo del caserío Bijao, distrito de José Crespo y Castillo – Aucayacu, mediante el análisis de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, así como la relación entre estas y la macrofauna edáfica. El estudio se desarrolló bajo un enfoque no experimental, descriptivo, comparativo y correlacional. Se establecieron parcelas representativas en los sistemas dominados por *Pteridium aquilinum*, *Erythroxylum coca* y *Andropogon bicornis*, donde se realizó el muestreo de suelo para el análisis fisicoquímico y la evaluación de la macrofauna edáfica mediante el método TSBF.

Los resultados evidenciaron diferencias significativas en la calidad del suelo entre los sistemas evaluados. El sistema con *Andropogon bicornis* presentó las condiciones edáficas más desfavorables, caracterizadas por mayor compactación y menor fertilidad, mientras que *Erythroxylum coca* mostró mejores atributos químicos del suelo y *Pteridium aquilinum* condiciones físicas y biológicas más favorables. En cuanto a la macrofauna edáfica, se registró mayor abundancia y diversidad en el sistema con *Pteridium aquilinum* y los valores más bajos en *Andropogon bicornis*.

El análisis correlacional mostró que la compactación del suelo se relaciona negativamente con la abundancia y diversidad de la macrofauna edáfica, mientras que variables químicas como la materia orgánica, el fósforo disponible y la capacidad de intercambio catiónico efectiva presentan asociaciones positivas. Se concluye que la calidad del suelo varía en función del sistema de uso del suelo y que la macrofauna edáfica constituye un indicador sensible del estado edáfico.

Palabras clave: calidad del suelo; macrofauna edáfica; uso del suelo; propiedades edáficas; correlación.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate soil quality in three land-use systems in the Bijao village, José Crespo y Castillo district – Aucayacu, through the analysis of physical, chemical, and biological soil properties, as well as their relationship with soil macrofauna. The research followed a non-experimental, descriptive, comparative, and correlational approach. Representative plots were established in land-use systems dominated by *Pteridium aquilinum*, *Erythroxylum coca*, and *Andropogon bicornis*. Soil samples were collected for physicochemical analysis, and soil macrofauna was assessed using the TSBF method.

The results revealed significant differences in soil quality among the evaluated systems. The *Andropogon bicornis* system exhibited the most unfavorable soil conditions, characterized by higher compaction and lower fertility, whereas the *Erythroxylum coca* system showed better chemical soil attributes and *Pteridium aquilinum* presented more favorable physical and biological conditions. Regarding soil macrofauna, higher abundance and diversity were recorded in the *Pteridium aquilinum* system, while the lowest values were observed in *Andropogon bicornis*.

Correlation analysis indicated that soil compaction was negatively related to macrofauna abundance and diversity, whereas chemical variables such as organic matter, available phosphorus, and effective cation exchange capacity showed positive associations. These findings confirm that soil quality varies according to land-use system and that soil macrofauna is a sensitive indicator of soil condition.

Keywords: soil quality; soil macrofauna; land use; soil properties; correlation.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, los sistemas de uso del suelo cumplen un rol decisivo en el funcionamiento de los ecosistemas rurales, especialmente en zonas agrícolas donde la tierra sostiene procesos esenciales como la producción de cultivos, la filtración y regulación del agua, el almacenamiento de carbono y el mantenimiento de la biodiversidad. La calidad del suelo varía según el tipo de uso y manejo implementado, ya que cada sistema bosque, agroforestería o agricultura modifica de manera distinta sus propiedades físicas, químicas y biológicas. En sistemas más conservacionistas, como los bosques secundarios o los sistemas agroforestales, la calidad del suelo suele mantenerse más estable, mientras que los sistemas agrícolas intensivos pueden generar degradación cuando no se aplican prácticas sostenibles. Este escenario evidencia la necesidad de comprender cómo el uso y manejo de la tierra repercute directamente en la salud del suelo, especialmente en territorios donde la actividad agrícola es la base de la economía local.

Las propiedades físicas y químicas del suelo son indicadores clave para evaluar su capacidad de sostener plantas, regular los flujos hídricos y mantener comunidades biológicas. Estas propiedades cambian de acuerdo con las actividades humanas que se llevan a cabo en cada sistema de uso, pudiendo mejorar o deteriorar el recurso suelo según la intensidad, tipo de cultivo y prácticas de manejo. En el caserío Bijao, distrito José Crespo y Castillo – Aucayacu, conviven distintos sistemas de uso del suelo que, por sus características, podrían estar afectando de manera desigual la calidad edáfica. Ante este escenario surge la interrogante central que guía esta investigación: ¿Cómo varía la calidad del suelo en los tres sistemas de uso presentes en el caserío Bijao, distrito José Crespo y Castillo – Aucayacu? Comprender esta variación permitirá identificar posibles procesos de degradación y oportunidades para fortalecer el manejo sostenible de la tierra.

Esta investigación se justifica porque la evaluación de las propiedades físicas y químicas del suelo en distintos sistemas de uso constituye un elemento fundamental para promover prácticas sostenibles, conservar los recursos naturales y garantizar la seguridad alimentaria de las comunidades rurales. Un análisis comparativo de estas propiedades aporta información valiosa para comprender la dinámica del suelo, su resiliencia y su capacidad de respuesta frente a presiones humanas o ambientales. Además, genera evidencia científica que puede servir de base para políticas locales de manejo del suelo, estrategias de conservación y acciones orientadas a mitigar procesos de degradación. La investigación fortalece la toma de decisiones informada y se alinea con la necesidad de proteger los ecosistemas terrestres, asegurar la

productividad agrícola y preservar los servicios ecosistémicos esenciales.

Considerando la importancia de aportar una visión integral y comparativa de la calidad del suelo en diferentes sistemas de uso, esta investigación busca analizar sus variaciones, incorporar criterios técnicos para su evaluación y proporcionar información útil para mejorar el manejo local. Asimismo, reconoce la relevancia de incluir la percepción y participación de la comunidad para hacer que los resultados sean aplicables y beneficiosos en el territorio. Bajo este enfoque, se establece como hipótesis de estudio que la calidad del suelo varía entre los tres sistemas de uso presentes en el caserío Bijao, distrito José Crespo y Castillo – Aucayacu, lo cual orienta el análisis comparativo que se desarrollará a lo largo de la investigación., por tanto, se plantea los siguientes objetivos:

1.1. Objetivo general

Evaluar la calidad del suelo en tres sistemas de uso presentes en el caserío Bijao, distrito José Crespo y Castillo – Aucayacu,

1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físicas y químicas del suelo en tres sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao, distrito José Crespo y Castillo – Aucayacu.
- Evaluar la diversidad y abundancia de la macrofauna edáfica presente en los tres sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao, distrito José Crespo y Castillo – Aucayacu.
- Analizar la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la macrofauna edáfica en los tres sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao, distrito José Crespo y Castillo – Aucayacu.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. El uso de suelo

El término "uso" se refiere a las distintas formas de ocupación y aprovechamiento de la tierra por parte de los seres humanos, como la agricultura, la ganadería, el desarrollo urbano o el uso recreativo. Las condiciones socioeconómicas y culturales de una comunidad determinan las formas en que se utilizan los recursos naturales del territorio, y a su vez, estos recursos tienen un impacto directo en la sociedad que los utiliza

Examina la relación entre el cambio en el uso del suelo y la pérdida de biodiversidad, ofreciendo una visión global sobre cómo las transformaciones del paisaje, especialmente en regiones tropicales, están acelerando la pérdida de especies (Vliet, 2020).

En su investigación reviso el estado del uso del suelo a nivel global, analizando las tendencias recientes y las políticas necesarias para abordar los desafíos futuros, como la deforestación y la expansión agrícola (Hansen, 2020).

Los usos del suelo se refieren a las diversas maneras en que se utiliza un terreno y su cobertura vegetal. Estos usos y el grado en que se explotan tienen un impacto significativo en la apariencia y características del paisaje. Cuando se producen modificaciones en los usos del suelo, se generan cambios en la forma en que se utiliza la tierra y su vegetación. Estos cambios pueden resultar en alteraciones notables en el paisaje y en las funciones ecológicas de la zona en cuestión (López *et al.*, 2015).

Redefine el uso del suelo como un proceso dinámico influenciado no solo por la demanda humana, sino también por la necesidad de adaptar los paisajes a los desafíos del cambio climático. Enfatizan la importancia de integrar la planificación del uso del suelo con estrategias de mitigación y adaptación climática. El uso del suelo como una herramienta crítica para garantizar la provisión de servicios ecosistémicos esenciales. Destacan la necesidad de enfoques integrados que equilibren las demandas agrícolas con la conservación de suelos y la biodiversidad. (Tuner, 2024),

El uso del suelo se refiere a los efectos de las actividades socioeconómicas que se llevan a cabo sobre una determinada área de cobertura. Estas actividades están vinculadas a la explotación de los recursos naturales para la producción de bienes y servicios. Es importante considerar que el territorio no puede ser visto como un sistema aislado de los procesos sociales. Debe ser concebido como un conjunto integrado compuesto tanto por aspectos naturales como sociales, los cuales son dinámicos y están sujetos a cambios a lo largo

del tiempo.

Los métodos de clasificación suelen evaluar el suelo como un recurso productivo, centrándose en indicadores directamente relacionados con su capacidad de producción, como la fertilidad, la textura, el drenaje y el contenido de nutrientes. Según el Reglamento de Clasificación de Tierras para Usos Mayores (MIDAGRI, 2022), la capacidad inherente de producir de forma consistente bajo tratamientos continuos y usos específicos define su capacidad de uso mayor. La clasificación de un área debe garantizar la sostenibilidad mediante una productividad óptima y sistemas de gestión establecidos.

El suelo, componente vital de los ecosistemas, es crucial para su sostenibilidad (Castelán et al., 2017). La tasa de descomposición de los residuos vegetales depende de factores ambientales como la temperatura y la precipitación, así como de las especies forestales (Moreno et al., 2018).

2.1.2. La calidad del suelo

La calidad del suelo se refiere a su capacidad para favorecer el desarrollo animal y vegetal, mantener la calidad del agua y el aire, y preservar la salud humana, dentro de límites ecosistémicos naturales o de manejo. Incluye la productividad y fertilidad del suelo, es decir, su habilidad para retener, atraer y liberar nutrientes, elementos químicos esenciales y agua. Esta calidad es dinámica y varía con el tiempo, dependiendo del uso y las prácticas culturales aplicadas. Los cambios en la calidad del suelo se manifiestan a través de alteraciones en sus características.

En zonas tropicales, el cultivo intensivo impacta negativamente los indicadores físicos del suelo, como la densidad aparente (D_a) y la resistencia a la penetración (R_p), incrementando ambos y provocando compactación. Químicamente, disminuye el pH, la materia orgánica (MO), el N, K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , e incrementa el Al^{3+} , el %AC y el %SAl. Estos efectos se atribuyen al uso excesivo de insumos químicos que degradan el suelo con el tiempo (Celis et al., 2020). Por ejemplo, aumentar la tasa de infiltración mejorando la estructura del suelo y adicionando materia orgánica puede conllevar la pérdida de nutrientes y afectar negativamente la densidad aparente, la resistencia a la labranza y el crecimiento radicular.

2.1.3. Indicadores de la calidad del suelo

Los índices de calidad del suelo evalúan la capacidad del suelo para sustentar la productividad de plantas y animales, así como para mantener la calidad del agua y el aire (Ramírez et al., 2022). Esta evaluación se basa en indicadores cualitativos o cuantitativos. Las propiedades físicas y químicas del suelo influyen directamente en su funcionalidad. Los indicadores físicos se relacionan con el uso eficiente del agua, los nutrientes y los agroquímicos.

Los indicadores químicos afectan las interacciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de nutrientes para plantas y otros organismos. Los indicadores biológicos, representados por la presencia y abundancia de seres vivos o sus procesos, señalan cambios o estados en las propiedades o procesos del suelo (Nuñez, Pérez, & Prado, 2023).

Hernández et al. (2014) sugieren que calidad y salud del suelo son conceptos equivalentes, aunque no sinónimos. La calidad del suelo se refiere a su utilidad a largo plazo para un propósito específico, mientras que la salud del suelo describe el estado de sus propiedades dinámicas, como la materia orgánica, la diversidad de organismos y los productos microbianos, en un momento dado. La calidad del suelo sirve como herramienta para comprender tanto la utilidad como la salud de este recurso. A pesar de su importancia, la definición precisa de la calidad del suelo aún es un desafío para la ciencia del suelo. El término comenzó a definirse al reconocer las funciones del suelo:

- Promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas.
- Atenuar contaminantes ambientales y patógenos.
- Favorecer la salud de plantas, animales y humanos.

Tabla 1. Rangos de interpretación de propiedades físicas y químicas del suelo.

Propiedad	Bajo	Medio	Alto	Fuente
Densidad aparente (g/cm ³)	< 1.30	1.30–1.60	> 1.60	USDA Soil Survey (2014), Lal & Shukla (2004)
Resistencia a la penetración (MPa)	< 1.0	1.0–2.0	> 2.0	USDA-NRCS Soil Quality Institute (2001)
pH (1:1 agua)	< 5.5 ácido	5.5–7.2 adecuado	> 7.2 básico	FAO (2006)
Materia orgánica (%)	< 2 %	2–4 %	> 4 %	Brady & Weil (2016), FAO (2019)
Nitrógeno total (%)	< 0.10	0.10–0.20	> 0.20	Hazelton & Murphy (2016)
Fósforo disponible (mg/kg)	< 8	8–15	> 15	Hazelton & Murphy (2016), FAO (2004)
Potasio intercambiable (cmol/kg)	< 0.20	0.20–0.40	> 0.40	Brady & Weil (2016)
Calcio (cmol/kg)	< 5	5–10	> 10	USDA-NRCS (2014)
Magnesio (cmol/kg)	< 1	1–3	> 3	USDA-NRCS (2014)
CIC efectiva (CICe) (cmol/kg)	< 12	12–25	> 25	FAO (2006), Hazelton & Murphy (2016)

2.1.4. Inventario de la macrofauna edáfica

- Recolecta por transecto lineal

El método lineal estándar de Anderson e Ingram (1993), citado por Cabrera et al. (2017) y basado en el Programa de Biología y Fertilidad de Suelos Tropicales (TSBF), para el estudio de la macrofauna del suelo consta de los siguientes pasos:

1. Extraer de 8 a 10 monolitos de suelo (25 x 25 x 30 cm) por área, distribuidos diagonal y aleatoriamente cada 5 metros. Esto implica marcar un cuadrante de 25 x 25 cm y excavar el suelo en su interior.
2. Recolectar todo el contenido de suelo y colocarlo en bandejas o recipientes plásticos de polietileno grandes para la cuantificación manual y la recolección de la macrofauna con pinzas y cepillos.
3. Conservar la macrofauna extraída en frascos de plástico etiquetados que contengan formaldehído al 4% para las lombrices y alcohol etílico al 70 - 75% para el resto de la macrofauna.
4. Cada frasco etiquetado debe contener información como el número del monolito, la ubicación, la fecha y el tipo de ecosistema.
5. Para estudios de distribución vertical, separe y recolecte el monolito en capas de 0 - 10, 10 - 20 y 20 - 30 cm. La hojarasca puede incluirse en la capa de 0 - 10 cm o reconocerse como un estrato independiente.
6. El suelo extraído se deberá incorporar nuevamente en el cuadrante abierto.

2.1.5. Importancia de macrofauna en el suelo

La macrofauna comprende organismos de 2 a 20 mm de longitud que se desplazan activamente sobre el suelo, creando galerías donde habitan. Este grupo incluye neumópodos, arañas, moluscos, hormigas, isópteros, avispones y oligoquetos (lombrices de tierra de hasta 200 mm), así como quilópodos, isópodos, diplópodos, arácnidos, Formicidae, malacostráceos, isópteros y coleópteros (Diaz & Arcelis, 2019).

Los macroinvertebrados de la superficie, como lombrices de tierra y termitas, se alimentan de materia orgánica (raíces y hojarasca) y estiércol, contribuyendo a su descomposición, al ciclo de nutrientes, la porosidad y la aireación del suelo. Los detritívoros, como escarabajos y mosquitos, se alimentan de material vegetal o animal en descomposición. La macrofauna, tanto carnívora como herbívora, se desarrolla sobre y dentro del suelo,

consumiendo diversos tipos de plantas y otros invertebrados, regulando la abundancia de material vegetal, favoreciendo el equilibrio del ecosistema y actuando como reguladores biológicos (Orteja, 2018).

Comprende a los invertebrados con dimensiones de igual o mayor de 10 mm de longitud y 2 mm de ancho que es visible al ojo humano y habitan en el interior del suelo o también sobre él (hojarasca). Los microorganismos en el suelo forman relaciones simbióticas beneficiosas con las plantas, donde ambos se benefician mutuamente. Las raíces de las plantas liberan compuestos orgánicos, como polisacáridos, aminoácidos, ácidos orgánicos y compuestos fenólicos, que alimentan a los microorganismos. A cambio, los microorganismos descomponen estos compuestos y liberan nutrientes esenciales para las plantas a través de sus procesos digestivos. Este intercambio promueve la salud y el crecimiento tanto de las plantas como de los microorganismos del suelo (Gonzaga *et al.*, 2021). Su presencia y actividad son fundamentales para la salud y el funcionamiento adecuado de todos los ecosistemas.

La actividad microbiana del suelo es fundamental en los ciclos biogeoquímicos de C, N y P. Los microorganismos del suelo se clasifican según su fuente de C y energía: los heterótrofos obtienen nutrientes mediante la oxidación de compuestos orgánicos, mientras que los autótrofos utilizan CO₂ y otras fuentes inorgánicas; los heterótrofos son predominantes en la rizosfera. Géneros como *Streptotrophomonas* y *Variibacter* mineralizan P, mientras que *Rhizobium*, *Azobobacter* y *Azospirillum* son *diazótrofos* que fijan y transforman N en formas asimilables, como se ha observado en la formación de nódulos en raíces de leguminosas (Zheng, 2021).

2.1.6. Densidad de macrofauna en el suelo

La evaluación de la macrofauna implica determinar la abundancia total en el suelo y, posteriormente, la densidad para cada grupo de especies, familia o funcional (Rojas, 2019)

Para evaluar la densidad (ind/m²), se utilizó un cuadrado de 0,25 m x 0,25 m (1/16 m²). Los datos de cada sitio de muestreo se multiplicaron por 16 para calcular la cantidad de individuos por m² (Valdez, 2021).

2.1.7. Diversidad de especies

Chase (2020), señala que la diversidad de especies desde la perspectiva de las interacciones y los nichos ecológicos. Definen la diversidad de especies como un reflejo de la complejidad de las interacciones entre especies y su adaptación a diferentes nichos ecológicos y tiene dos criterios:

- a) Riqueza de especies: Se refiere al número de especies existentes en un

espacio determinado.

- b) Heterogeneidad: Se refiere a la riqueza de especies y la abundancia de cada especie en un ámbito determinado.

2.1.8. Cuantificación de la diversidad de especies

Según Jost (2021), el uso de medidas de entropía para cuantificar la diversidad de especies. Propone que la diversidad de especies debe cuantificarse usando índices que capturen tanto la riqueza como la distribución de abundancias de las especies, como el índice de diversidad de Shannon y el índice de Simpson.

- Índice de diversidad de Simpson (D)

Barton (2022), menciona que exploran métodos estadísticos avanzados para calcular e interpretar el índice de Simpson. Destacan la importancia de considerar la variabilidad y el sesgo en las estimaciones del índice cuando se trabaja con datos de muestreo. Este índice es útil para el monitoreo ambiental por lo que miden la variación de las especies más abundantes por alguna alteración. La fórmula se muestra a continuación:

$$D = \sum_{i=1}^S (p_i^2) \quad (1)$$

Donde:

p_i = cantidad de individuos total de la muestra que pertenecen la especie ($p_i = n_i/N$)

n_i = abundancia de la especie i

N = Número total de individuos en toda la comunidad

Simpson mide la dominancia dentro de una comunidad, por lo tanto, se debe restar 1 para determinar la diversidad.

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (p_i^2) \quad (2)$$

Según Simpson los valores de la diversidad se encuentran en un rango de 0 a 1, cuando se aproxima a 1 tiene mayor dominancia y si se acerca más al cero indica menor dominancia

- Índice de Equitatividad o uniformidad (E)

Teniendo en cuenta a Jost (2019), menciona que revisa diversos índices de diversidad, incluido el índice de equitatividad. Discute cómo se calcula la equitatividad usando la fórmula de Shannon, que es una forma común de medir la uniformidad en la distribución de abundancias. Donde mide la cantidad de la diversidad observada en cada muestra con relación

a la máxima diversidad esperada, se encuentra en rango de 0 a 1; la cual indica el 1 de que todas las especies son igualmente abundantes. Cuya fórmula se expresa así:

$$E = J = \frac{H'}{\ln S} \quad (3)$$

Donde:

J = índice de equidad de Pielou

Ln = logaritmo natural

S = Riqueza de especies

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

Tal como menciona Magurran (2021), ofrece una visión completa sobre diversos índices de diversidad, incluyendo el índice de Shannon-Wiener. Explica cómo calcular y utilizar H' en estudios de biodiversidad, y cómo este índice puede reflejar la complejidad y la equidad de las comunidades ecológicas. La fórmula se muestra a continuación:

$$H' = \sum_{i=1}^S (p_i \log(p_i)) \quad (4)$$

Para el cálculo se puede utilizar diversos logaritmos: ln, log₁₀ y log₂.

$$H' = \sum_{i=1}^S (p_i \ln(p_i)) \quad (5)$$

Donde:

H' = Diversidad de especies

S = Número de especies

Pi = Cantidad de individuos total de las muestras que pertenecen la especie

ln = Logaritmo natural

Cuando se calculan la diversidad con diferentes logaritmos, los resultados de los datos se tienen con las siguientes unidades:

ln: bels naturales /individuo ó nats/individuo

log₁₀: decits/individuo

log₂: bits/individuo (digito binario).

Los valores de este índice generalmente varían entre una escala de 1.5 a 3.5, en excepciones pueden llegar o puede sobrepasar al 4.5.

2.1.9. Factores que influyen en la densidad y diversidad de la macrofauna del suelo

La macrofauna del suelo (como lombrices y escarabajos) influye en la descomposición de la materia orgánica y la dinámica del carbono en el suelo. Destacan que la densidad y diversidad de la macrofauna están fuertemente influenciadas por la calidad de la materia orgánica y la estructura del suelo. Los factores como la textura del suelo, la humedad y el contenido de materia orgánica afectan la densidad y diversidad de la macrofauna del suelo. Señalan que su presencia es crucial para la aireación del suelo y la formación de estructuras de agregados, lo que a su vez influye en la biodiversidad. (Gasser & Brady, 2020)

Zhang (2021), mencionan que el uso del suelo (como la agricultura intensiva, la forestación y la urbanización) afecta la densidad y diversidad de la macrofauna del suelo. Identifican que la conversión de tierras y la perturbación del suelo tienen impactos significativos en la biodiversidad de la macrofauna y la variabilidad en la estructura del suelo, el contenido de nutrientes, y el pH son factores determinantes para la densidad y diversidad de la macrofauna.

2.1.10. Biomasa microbiana

La biomasa microbiana del suelo se refiere a la masa total de microorganismos vivos en un volumen dado de suelo. La riqueza y biomasa de macroinvertebrados varían significativamente según el uso del suelo (tratamiento) y la profundidad (capas), siendo mayores en la capa superficial (hojarasca y 0 - 10 cm).

La presencia de macroinvertebrados fluctúa en función del uso del suelo y la estabilidad del sistema biológico natural, influenciada por la insolación (temperatura), la humedad relativa, la estructura de la vegetación (separación) y la descomposición de la fitomasa (Porta et al., 1999, citado por Merino, 2021).

2.1.11. La biodiversidad

El estado actual del conocimiento sobre la relación entre biodiversidad y funcionamiento del ecosistema. Enfatizan la importancia de la biodiversidad para la estabilidad y resiliencia de los ecosistemas y discuten direcciones futuras para la investigación. Como también exploran los principales impulsores de la pérdida de biodiversidad, incluyendo el cambio en el uso del suelo, la contaminación, y el cambio climático. Ofrecen una visión integral de cómo estas amenazas impactan la biodiversidad y proponen soluciones para mitigar estos efectos (Cardinale & Hooper, 2023)

2.1.12. Diversidad de especies

La macrofauna del suelo comprende invertebrados visibles que habitan

principalmente dentro o sobre la tierra. Esta diversa fauna (gusanos, termitas, insectos, milpiés, ciempiés, arácnidos, y otros invertebrados) puede superar las 1000 especies en un solo ecosistema, alcanzando densidades de más de 1 000 000 de individuos y biomasa de más de una tonelada por hectárea. Para medir la diversidad local, los índices basados en la abundancia de datos, como los índices de heterogeneidad de Shannon-Wiener y Simpson, son los más utilizados. El índice de Simpson evalúa la probabilidad de que dos individuos elegidos al azar en un área compartan la misma especie. Dado que la conservación prioriza la riqueza de especies, es importante utilizar índices que consideren incluso las especies menos abundantes, justificando el uso del índice de Shannon-Wiener. (Jost, 2021).

2.1.13. Riqueza biológica

Una mayor riqueza biológica suele estar asociada con una mayor estabilidad y resiliencia de los ecosistemas, y que la pérdida de especies puede llevar a una disminución de estos beneficios ecosistémicos. (Hooper, 2020)

2.1.14. Diversidad alfa

La diversidad de especies en una comunidad particular influye en el funcionamiento del ecosistema. Argumentan que la diversidad alfa es crucial para la estabilidad y la capacidad de un ecosistema para ofrecer servicios ecosistémicos. Es crucial para la estabilidad y la capacidad de un ecosistema para ofrecer servicios ecosistémicos y como la diversidad de especies dentro de una comunidad, y discuten cómo diferentes métricas pueden ofrecer perspectivas variadas sobre la estructura de las comunidades (Schmind, 2023)

Definen la diversidad alfa como la variedad de especies en un hábitat específico, y enfatizan la importancia de considerar la abundancia relativa de las especies además del simple conteo de especies para obtener una visión completa de la diversidad alfa (Diaz & Cramer, 2023)

2.2. Estado del arte

2.2.1. Antecedentes

Blas (2021) investigó los indicadores de calidad del suelo en San Alejandro Irazola – Ucayali, un bosque tropical húmedo de tierras bajas (160-400 msnm) predominantemente húmedo, caracterizado por terrenos ondulados, montañas, terrazas bajas y humedales. La zona presenta una temperatura promedio de 26,8 °C (máx. 27,0 °C, mín. 26,6 °C), una humedad relativa promedio del 78,9% y una precipitación promedio de 2510,1 mm/año (estación San Alejandro), con mayor precipitación de noviembre a marzo y menor de abril a octubre. Las pendientes planas a casi planas (0-8 grados) contribuyen a las inundaciones en San Alejandro durante la temporada de lluvias. Obteniendo como resultados de las

propiedades fisicoquímicos del suelo el bosque y la siembra directa del cacao presentan textura franca, densidad aparente ($1,1 \text{ g/cm}^3$ y $1,2 \text{ g/cm}^3$), conductividad hidráulica ($35,1 \text{ cm/h}$ y $48,8 \text{ cm/h}$), humedad (26% y 22%), materia orgánica (1,63% y 1,86%), pH (5,99 y 6,35), Nitrógeno total (0,07% y 0,08%), Fósforo ($7,3 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $7,67 \text{ mg.kg}^{-1}$), Potasio ($0 \text{ Cmol}(+)^*\text{kg}^{-1}$ y $0,09 \text{ Cmol}(+)^*\text{kg}^{-1}$) y el bosque secundario y pastizal presentan textura franco arcilloso limoso, densidad aparente ($1,5 \text{ g/cm}^3$ y $1,2 \text{ g/cm}^3$), conductividad hidráulica (43 cm/h y $51,8 \text{ cm/h}$), humedad (22% y 23%), materia orgánica (1,48% y 1,63%), pH (7,06 y 5,5), Nitrógeno total (0,07% y 0,07%), Fósforo ($8,42 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $6,36 \text{ mg.kg}^{-1}$), Potasio ($0,21 \text{ Cmol}(+)^*\text{kg}^{-1}$ y $0,12 \text{ Cmol}(+)^*\text{kg}^{-1}$)

Daza (2018) estudió los indicadores de calidad del suelo y el carbono orgánico en pasturas naturales (*Paspalum conjugatum*) y mejoradas (*Brachiaria decumbens*) en Merced de Locro, distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, Huánuco, para comparar ambos sistemas de uso del suelo. La recolección de las muestras se realizó con una palana sobre los primeros 30 cm del suelo, tomando 05 (cinco) submuestras (1,0 kg) sistemáticamente en el centro de cada cuadrante. Para encontrar diferencias estadísticas entre las dos unidades exploratorias con respecto a las variables dependientes se utilizó la prueba de LSD Fisher para la inferencia basadas en dos muestras. En comparación con los pastos naturales, los suelos con pastos mejorados mostraron una mayor densidad aparente, pero menores niveles de materia orgánica y nitrógeno. Esto respalda la hipótesis de que los sistemas de pastos mejorados tienen un efecto positivo en relación con los pastos naturales. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre los dos sistemas de pastos en cuanto a fósforo, potasio y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Si bien los suelos de pastos mejorados exhibieron valores generales más altos en comparación con los pastos naturales, estos últimos mostraron mayores tasas de almacenamiento de carbono. En consecuencia, el sistema de pastos naturales almacenó más carbono orgánico del suelo que el sistema de pastos mejorados.

Royero (2019) estudió la macrofauna del suelo y las propiedades fisicoquímicas en diferentes zonas de manejo del departamento del Atlántico, Colombia. La macrofauna se evaluó mediante métricas como el conteo individual, la diversidad de especies, el índice de diversidad de Shannon-Wiener y el índice de uniformidad de Pielou. Se recolectó un total de 641 macroinvertebrados del suelo, que representan tres filos, siete clases y 13 órdenes, siendo Coleoptera y Formicidae los grupos más prevalentes. La macrofauna del suelo mostró respuestas variadas a las características del suelo; La mayoría de los grupos taxonómicos mostraron una asociación positiva con la presencia de materia orgánica. Ciertos grupos se asociaron con suelos con alta capacidad de filtración, niveles de humedad, estructura estable y

menor resistencia a la penetración. Este estudio sugiere que los sistemas silvopastoriles podrían tener un impacto positivo en la calidad biológica, física y química del suelo, así como en la conservación de la biodiversidad en zonas que anteriormente se dedicaban a la ganadería convencional, aunque estos beneficios podrían tardar en manifestarse.

Azañero (2020) destaca la necesidad de evaluar la calidad del suelo en áreas agrícolas frágiles. Su estudio comparó la calidad del suelo en diferentes sistemas de uso (sistema agroforestal (SAF), cocal (CO) y bosque secundario (BS)) en Rio Espino, Monzón (Huánuco-Perú), utilizando el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS). Se evaluaron indicadores como textura, densidad aparente, resistencia a la penetración, infiltración, temperatura, pH, fósforo, materia orgánica, nitrógeno total, K, Ca, Mg y la capacidad de intercambio catiónico. Los resultados indicaron una calidad aceptable para el SAF, sensible para el BS y marginal para el CO. El estudio concluyó que el SAF presentó el mayor índice de calidad SUSS, aunque sus indicadores ocasionalmente se desviaban de los valores óptimos, mientras que el CO mostró el menor índice, con indicadores alejados de los valores deseables. El SUSS demostró ser un método sencillo y eficiente para medir los cambios en la calidad del suelo en función del uso.

Huamán (2021) investigó en su tesis la influencia de sistemas de uso de diferentes edades en la calidad del suelo en Cora Cora, Luyando, Leoncio Prado. Los objetivos fueron determinar indicadores químicos y físicos, evaluar la calidad del suelo mediante el SUSS y representar la distribución cartográfica y espacial en tres sistemas de uso del suelo (coca, bosque y sistema agroforestal). Los indicadores físicos revelaron clases texturales franco arcillo limoso en el sistema coca y franco arcilloso en los sistemas agroforestal y bosque, con densidades aparentes ideales y temperaturas favorables. Los indicadores químicos mostraron niveles de pH de fuertemente ácido a neutro, y niveles bajos de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y capacidad de intercambio catiónico en todos los sistemas. La calidad del suelo fue sensible en los sistemas agroforestales y pobre en los sistemas coca y bosque. La distribución espacial de la calidad del suelo en un área de 3,61 ha se cartografió como pobre en los tres sistemas de uso.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación geográfica y política

El área de estudio se localiza en el caserío Bijao, distrito de José Crespo y Castillo – Aucayacu, en un predio con una extensión aproximada de diez (10) hectáreas, donde se identifican distintos sistemas de uso del suelo con características edáficas y de cobertura vegetal contrastantes. Estos sistemas reflejan diferentes grados de intervención antrópica y estados sucesionales, lo que los convierte en unidades representativas para evaluar la variabilidad de la calidad del suelo.

Tabla 2. Coordenadas UTM (Datum WGS 84, UTM/UPS) del área de investigación.

Sistemas de uso del suelo	Coordenadas geográficas (UTM)		Altitud (msnm)
	Este	Norte	
<i>Erythroxylum coca</i> (Coca)	372481	9004082	552
<i>Pteridium aquilinum</i> (Macorilla),	372480	9004082	554
<i>Andropogon bicornis</i> (Rabo de zorro)	372480	9004015	552

3.1.2. Descripción del área

El sistema de uso dominado por *Pteridium aquilinum* presenta un tiempo aproximado de catorce años desde su establecimiento y se ubica a una altitud promedio de 554 m s. n. m. Este sector fue intervenido y posteriormente erradicado hace alrededor de veinte años, quedando el suelo expuesto, lo que favoreció la colonización de *P. aquilinum*, especie característica de ambientes perturbados y en etapas tempranas de sucesión ecológica. La cobertura vegetal presente es homogénea y de bajo porte, condición asociada a procesos de degradación física del suelo y limitada recuperación estructural.

En áreas contiguas se desarrolla el sistema dominado por *Andropogon bicornis*, especie que suele establecerse en suelos degradados o con manejo inadecuado. Su presencia indica un estado de alteración edáfica, asociado a baja fertilidad, compactación y escasa cobertura arbórea. Este sistema representa un estadio sucesional temprano, con limitada acumulación de materia orgánica y reducida actividad biológica, lo cual permite evaluar condiciones edáficas desfavorables producto del uso intensivo previo.

El sistema de uso con *E. coca* se ubica a 552 m s. n. m., se encuentra en producción y fue establecido hace aproximadamente dos años, representando un sistema agrícola de uso intensivo en el predio.

El sistema agrícola con *Erythroxylum coca* se localiza a una altitud aproximada de 552 m s. n. m. y corresponde a un cultivo en producción, establecido hace aproximadamente dos años. Este sistema representa un uso intensivo del suelo, caracterizado por intervenciones frecuentes asociadas a prácticas agrícolas, lo que influye directamente en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Su inclusión permite contrastar el efecto del manejo agrícola reciente frente a sistemas de vegetación secundaria.

Para el desarrollo de la investigación se seleccionaron parcelas representativas de una (1) hectárea por cada sistema de uso del suelo: *Erythroxylum coca*, *Pteridium aquilinum* y *Andropogon bicornis*. Estas parcelas constituyeron las unidades de muestreo donde se realizaron las evaluaciones de la calidad del suelo, permitiendo comparar de manera directa los efectos del uso del suelo sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas, bajo condiciones ambientales similares.

3.1.3. Datos climáticos

El área de estudio se caracteriza por presentar un clima subtropical húmedo, propio de la zona de selva alta del centro oriente peruano. Las condiciones climáticas están marcadamente influenciadas por un régimen de lluvias estacional, con precipitaciones concentradas principalmente entre los meses de noviembre y junio, periodo durante el cual se registran lluvias intensas y frecuentes. Durante este intervalo, los valores mensuales de precipitación oscilan entre 150 y 250 mm.

En contraste, los meses comprendidos entre julio y septiembre corresponden al periodo de menor precipitación, configurando una estación relativamente seca. No obstante, la precipitación anual acumulada en la zona alcanza aproximadamente los 3000 mm, lo que evidencia un ambiente altamente húmedo durante la mayor parte del año.

La temperatura media anual en el caserío Bijao es cercana a los 25 °C, con valores máximos que pueden alcanzar los 32 °C y mínimos que descienden hasta aproximadamente 19 °C. Estas condiciones térmicas, combinadas con una elevada humedad relativa, favorecen una intensa actividad biológica en el suelo, así como procesos acelerados de mineralización de la materia orgánica y dinámica de nutrientes.

El régimen climático descrito influye directamente sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, condicionando procesos como la estructura edáfica, la infiltración, la lixiviación de nutrientes y la actividad de la macrofauna. En este contexto, las condiciones climáticas del área de estudio constituyen un factor determinante en la evaluación de la calidad del suelo bajo los diferentes sistemas de uso analizados.

3.1.4. Relieve

El relieve del caserío Bijao se caracteriza por una topografía predominantemente plana a ligeramente ondulada, con presencia de sectores semiplanos y colinados, rasgos típicos de los paisajes de la selva alta peruana. Esta configuración geomorfológica condiciona de manera directa los procesos de escorrentía superficial, infiltración del agua y acumulación de sedimentos, influyendo en la formación y distribución de las propiedades del suelo.

En el área de estudio se identifican pendientes suaves, generalmente inferiores al 8%, lo que favorece una moderada escorrentía y permite el desarrollo de actividades agrícolas y de vegetación secundaria. No obstante, en algunos sectores colindantes se observan elevaciones de mayor pendiente asociadas a cerros de altitud media, que forman parte del sistema orográfico vinculado a la Cordillera Azul hacia el este y a la Cordillera de los Andes hacia el oeste.

La interacción entre el relieve y el régimen climático húmedo de la zona contribuye a procesos de erosión hídrica en áreas con cobertura vegetal reducida o disturbio antrópico, especialmente en los sistemas dominados por vegetación secundaria temprana. Asimismo, las áreas más planas tienden a favorecer la acumulación de material fino y humedad edáfica, lo que influye en la compactación y en la dinámica de nutrientes del suelo.

3.1.5. Hidrografía

La hidrografía del área de estudio está dominada por la cuenca del río Huallaga, uno de los principales sistemas fluviales de la región amazónica del Perú. El río Huallaga fluye entre las cadenas montañosas de la Cordillera Central y la Cordillera Oriental de los Andes, presentando una longitud aproximada de 926 km a lo largo de su recorrido. En el tramo comprendido entre las ciudades de Tingo María y Aucayacu, el río recorre una distancia aproximada de 57 km, influyendo directamente en las condiciones hidrológicas y edáficas del entorno.

En el caserío Bijao y sus áreas adyacentes, la red hidrográfica se complementa con quebradas de régimen estacional, cuyo caudal depende principalmente de la intensidad y distribución de las precipitaciones. Durante la época de lluvias, estas corrientes incrementan su caudal, favoreciendo procesos de escorrentía superficial, transporte de sedimentos y redistribución de nutrientes; mientras que en la estación seca presentan caudales reducidos o intermitentes.

La cercanía a cuerpos de agua superficiales y la dinámica fluvial del río Huallaga influyen en la humedad edáfica, el drenaje natural y la fertilidad de los suelos,

especialmente en áreas con topografía plana o ligeramente ondulada. Estos factores hidrológicos condicionan procesos como la lixiviación de nutrientes, la acumulación de materiales finos y la actividad biológica del suelo, aspectos clave en la evaluación de la calidad edáfica.

3.1.6. Accesibilidad

El acceso al área de estudio se realiza principalmente por vía terrestre, a través de la carretera Fernando Belaunde Terry, partiendo desde la ciudad de Tingo María hacia la ciudad de Aucayacu, con un recorrido aproximado de 36 km. Desde Aucayacu, se continúa hacia el caserío Bijao mediante una vía afirmada de aproximadamente 10 km.

El tiempo estimado de desplazamiento desde la ciudad de Tingo María hasta el área de estudio es de alrededor de una hora y cincuenta minutos, utilizando transporte menor. La accesibilidad existente permitió el traslado de personal, equipos y materiales necesarios para la ejecución de las actividades de campo, así como el desarrollo oportuno del muestreo de suelos y macrofauna.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales y equipos

Para la ejecución del trabajo de campo y laboratorio se emplearon materiales y equipos adecuados para el muestreo, medición y análisis de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en los diferentes sistemas de uso evaluados. Los materiales, wincha de 50 m, libreta y fichas de campo, bolsas plásticas de 1 y 2 kg para muestreo de suelo, cuadrado muestreador, cilindro metálico para densidad aparente, pala recta y machete, Lona plástica para la extracción de monolitos, pinzas, cepillos y frascos plásticos, alcohol etílico y formol y papel secante. Los equipos, sistema de posicionamiento global (GPS), termómetro de suelo, penetrómetro, cámara fotográfica, balanza de precisión, estufa, peachímetro y estereoscopio.

3.2.2. Métodos

3.2.2.1. Componentes de investigación

a) Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo **aplicada y de campo**, debido a que utiliza principios y métodos de las ciencias del suelo para evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo bajo diferentes sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao. El estudio busca generar información útil para la comprensión del estado de la calidad del suelo y aportar criterios técnicos que contribuyan al manejo sostenible del recurso edáfico en contextos agrícolas y de vegetación secundaria.

Este enfoque es consistente con lo señalado por Tamayo (2004), quien indica que la investigación aplicada se orienta a la solución de problemas concretos de la realidad mediante el uso del conocimiento científico.

b) Nivel de investigación

El nivel de investigación es **descriptivo, comparativo y correlacional**. Es descriptivo porque caracteriza las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en cada sistema de uso evaluado; comparativo, porque permite identificar diferencias entre los sistemas de uso del suelo; y correlacional, porque analiza la relación existente entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y los indicadores de la macrofauna edáfica.

Este nivel de investigación se ajusta a lo establecido por Hernández et al. (2014), quienes señalan que los estudios descriptivos permiten detallar las características de las variables, mientras que los estudios correlacionales evalúan el grado de asociación entre ellas sin establecer relaciones de causalidad.

c) Diseño de investigación

El diseño de la investigación es **no experimental y transversal**. Es no experimental debido a que las variables no fueron manipuladas, sino observadas y medidas tal como se presentan en su contexto natural. Es transversal porque la recolección de los datos se realizó en un solo momento, permitiendo analizar el estado de la calidad del suelo bajo los diferentes sistemas de uso durante el periodo de estudio.

Este diseño resulta adecuado para evaluar condiciones edáficas y biológicas en sistemas de uso del suelo, donde el interés principal es describir y comparar las variables en un tiempo determinado, sin intervenir sobre ellas.

d) Variables de investigación

En la presente investigación se consideraron variables relacionadas con el uso del suelo y con las propiedades edáficas, las cuales permitieron evaluar la calidad del suelo y su relación con la macrofauna edáfica en los diferentes sistemas de uso analizados.

Variable dependiente (Y)

Sistemas de uso del suelo

Esta variable corresponde a los distintos tipos de uso del suelo presentes en el área de estudio, los cuales representan diferentes niveles de intervención y manejo. Los sistemas de uso evaluados fueron:

- **Y₁**: Sistema de uso con *Pteridium aquilinum*

- **Y₂**: Sistema de uso con *Erythroxylum coca*
- **Y₃**: Sistema de uso con *Andropogon bicornis*

Variable independiente (X)

Propiedades del suelo

Corresponde a las características físicas, químicas y biológicas del suelo que permiten evaluar su calidad y funcionamiento. Estas propiedades se agruparon de la siguiente manera:

a) Propiedades físicas

- Textura del suelo
- Densidad aparente (g/cm³)
- Resistencia a la penetración (kg/cm²)

b) Propiedades químicas

- pH
- Materia orgánica (%)
- Nitrógeno total (%)
- Fósforo disponible (ppm)
- Potasio disponible (ppm)
- Capacidad de intercambio catiónico (cmol(+)/kg)
- Calcio intercambiable (cmol(+)/kg)
- Magnesio intercambiable (cmol(+)/kg)

c) Propiedades biológicas

- Abundancia de la macrofauna edáfica (individuos/m²)
- Riqueza de especies
- Índices de diversidad (Shannon-Wiener y Simpson)

e) Operacionalización de variables

La operacionalización de las variables permitió definir de manera precisa las dimensiones, indicadores, métodos de medición y unidades de análisis utilizados en la investigación, garantizando la coherencia entre los objetivos planteados, la metodología aplicada y los resultados obtenidos.

La variable dependiente corresponde a los **sistemas de uso del suelo**, mientras que la variable independiente está conformada por las **propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo**, las cuales fueron evaluadas mediante indicadores específicos, siguiendo metodologías estandarizadas de análisis edáfico y biológico.

Tabla 3. Variables en estudio.

	Variable	Dimensiones	Indicadores	Índices		
Variable dependiente	Sistemas de uso del suelo	Tipos de sistemas	<i>Pteridium aquilinum</i>	ha		
			<i>Erythroxyllum coca</i>	ha		
			<i>Andropogon bicornis</i>	ha		
Variable independiente	Propiedades físicas, químicas y biológicas	Físicas	Textura	Granulometría		
			Densidad aparente	g/cm ³		
			Resistencia a la penetración	kg/cm ²		
		Químicas	pH	Rangos		
			MO	%		
			N	%		
			P	ppm		
			K	kg/ha		
			CIC	(Cmol(+).kg ⁻¹)		
			Ca	(Cmol(+).kg ⁻¹)		
			Mg	(Cmol(+).kg ⁻¹)		
		Biológicas	Abundancia total de macrofauna	(Ind/m ²)		
			Riqueza de especies	Individuos (m ²)		
					Índices de diversidad de Shannon – Wiener (H') y Simpson (1-D)	DA (g/cm ³) vs RPS (kg/cm ²)
		Variable interviniente	Indicadores de Variables	Relación entre propiedades físicas, químicas y biológicas	Propiedades físicas vs macrofauna Propiedades químicas vs macrofauna	(Ind/m ²) pH, N (%), MO (%), N (%), P (ppm), K (kg.K ₂ O/ha), CIC

f) Población y muestra

La población de estudio estuvo constituida por el área total del predio de diez (10) hectáreas ubicado en el caserío Bijao, distrito de José Crespo y Castillo – Aucayacu, donde se desarrollan los tres sistemas de uso del suelo evaluados: *Pteridium aquilinum*, *Erythroxylum coca* y *Andropogon bicornis*.

La muestra estuvo conformada por los puntos de muestreo de suelo establecidos dentro de cada sistema de uso, seleccionados en parcelas representativas de una (1) hectárea por sistema. En cada parcela se realizaron muestreos de suelo para el análisis de las propiedades físicas y químicas, así como evaluaciones biológicas de la macrofauna edáfica.

El muestreo fue de tipo **no probabilístico por conveniencia**, considerando criterios de accesibilidad, representatividad visible de la cobertura vegetal y homogeneidad edáfica relativa dentro de cada sistema de uso. Este tipo de muestreo resulta adecuado para estudios edafológicos comparativos, donde el interés principal es caracterizar y contrastar condiciones del suelo bajo distintos usos, más que realizar inferencias estadísticas a toda la población.

g) Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se realizó mediante **observación directa** y **muestreo de suelo**, con el fin de obtener información representativa de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en los diferentes sistemas de uso evaluados.

Para el registro de la información de campo se emplearon **fichas de campo**, en las cuales se consignaron datos relacionados con la ubicación de los puntos de muestreo, características de la cobertura vegetal y condiciones generales del suelo. Los análisis físicos y químicos del suelo se registraron mediante **fichas de laboratorio**, donde se consignaron los resultados obtenidos a partir de los métodos analíticos aplicados.

La evaluación de la macrofauna edáfica se realizó utilizando una **guía de identificación taxonómica**, que permitió clasificar los organismos recolectados al menos hasta nivel de orden o grupo funcional. Asimismo, se emplearon instrumentos de muestreo específicos, tales como el cuadrado muestreador y el marco metálico para la extracción de monolitos, garantizando la uniformidad del procedimiento en todos los sistemas de uso del suelo.

Estas técnicas e instrumentos permitieron la obtención de datos confiables y consistentes, asegurando la calidad de la información utilizada para el análisis de la calidad del suelo y su relación con la macrofauna edáfica.

h) Técnicas estadísticas y análisis de datos

El análisis de los datos obtenidos se realizó mediante **estadística descriptiva y análisis correlacional**, con el propósito de caracterizar las propiedades del suelo en los diferentes sistemas de uso y evaluar la relación existente entre las variables edáficas y la macrofauna del suelo.

Inicialmente, se aplicó **estadística descriptiva** para cada indicador físico, químico y biológico del suelo, calculándose medidas de tendencia central y dispersión, tales como promedios y variabilidad, las cuales fueron presentadas mediante tablas y figuras comparativas. Este análisis permitió describir el comportamiento de las variables en cada sistema de uso del suelo.

Posteriormente, para evaluar la relación entre las propiedades físicas y químicas del suelo y los indicadores biológicos de la macrofauna edáfica (abundancia, riqueza e índices de diversidad), se empleó un **análisis de correlación**. Previamente, se verificaron los supuestos de normalidad de los datos; cuando las variables cumplieron con estos supuestos se utilizó el **coeficiente de correlación de Pearson**, y cuando no se cumplieron, se aplicó el **coeficiente de correlación de Spearman**.

El procesamiento y análisis de los datos se realizó utilizando hojas de cálculo en **Microsoft Excel** y el software estadístico **SPSS**, lo que permitió organizar la información, calcular los estadísticos correspondientes y generar representaciones gráficas que facilitaron la interpretación de los resultados.

Los resultados del análisis estadístico fueron interpretados considerando criterios edafológicos y ecológicos, evitando establecer relaciones de causalidad y limitándose a identificar asociaciones entre las variables evaluadas, de acuerdo con el diseño no experimental de la investigación.

3.2.2.2. Caracterización de las propiedades físicas y químicas del suelo en tres sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao

Para la caracterización de las propiedades físicas y químicas del suelo en los tres sistemas de uso del suelo evaluados (*Pteridium aquilinum*, *Erythroxylum coca* y *Andropogon bicornis*), se establecieron parcelas representativas en cada sistema, considerando condiciones homogéneas de cobertura vegetal y manejo del suelo.

a) Delimitación y georreferenciación de las parcelas

En cada sistema de uso del suelo se delimitó una parcela de 75 m × 75 m, las cuales constituyeron las unidades de muestreo para la evaluación de las

propiedades edáficas. Las parcelas fueron georreferenciadas mediante un sistema de posicionamiento global (GPS), lo que permitió registrar su ubicación espacial y garantizar la repetibilidad del muestreo.

b) Muestreo de suelos para el análisis físico químico

El muestreo de suelos se realizó siguiendo un patrón sistemático en zigzag dentro de cada parcela, con el fin de obtener una muestra representativa de las condiciones edáficas de cada sistema de uso. En cada parcela se recolectaron doce (12) submuestras de suelo, las cuales fueron extraídas hasta una profundidad de 30 cm utilizando una pala recta.

Las submuestras recolectadas en cada sistema de uso fueron homogenizadas para conformar una muestra compuesta de aproximadamente 1 kg por sistema. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en bolsas plásticas debidamente rotuladas y trasladadas al Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva para su análisis.

c) Determinación de las propiedades físicas y químicas

Las muestras de suelo fueron analizadas aplicando métodos estandarizados y reconocidos para cada indicador físico y químico evaluado. La textura del suelo se determinó mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos; la densidad aparente se obtuvo utilizando el método del cilindro metálico; y la resistencia a la penetración se midió con un penetrómetro de campo.

En cuanto a las propiedades químicas, la reacción del suelo (pH) se determinó mediante el método potenciométrico; la materia orgánica se cuantificó utilizando el método de Walkley y Black; el nitrógeno total se determinó por el método micro-Kjeldahl; el fósforo disponible se analizó mediante el método de Olsen modificado; el potasio disponible se extrajo con acetato de amonio; y la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), así como el calcio y magnesio intercambiables, se determinaron mediante el método de saturación con acetato de amonio.

Los resultados obtenidos permitieron caracterizar el estado físico y químico del suelo en cada sistema de uso del suelo y sirvieron de base para el análisis comparativo de la calidad del suelo y su relación con la macrofauna edáfica.

Tabla 4. Determinación de los indicadores físicos y químicos evaluados.

Indicadores físicos y químicos	Método de determinación
Textura del suelo	Método del hidrómetro de Bouyoucos
Densidad aparente	Método del cilindro metálico
Resistencia a la penetración del suelo	Penetrómetro
Reacción del suelo	Método del potenciómetro
Materia orgánica	Método de Walkley y Black
Nitrógeno total	Método del micro-Kjeldahl
Fósforo disponible	Método del Olsen modificado
Potasio disponible	Extracción con acetato de amonio
CIC	Saturación con acetato de amonio

3.2.2.3. Evaluación de la diversidad y abundancia de la macrofauna edáfica presente en los tres sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao

La evaluación de la diversidad y abundancia de la macrofauna edáfica se realizó aplicando el método del Programa de Biología y Fertilidad de Suelos Tropicales (TSBF), propuesto por Anderson e Ingram (1993) y Lavelle (1997), ampliamente utilizado en estudios de macrofauna del suelo en ecosistemas tropicales.

a) Delimitación de fajas y unidades de muestreo

En cada sistema de uso del suelo (*Pteridium aquilinum*, *Erythroxylum coca* y *Andropogon bicornis*) se delimitaron cinco (5) fajas de muestreo de 75 m × 15 m, dispuestas de manera paralela dentro de cada parcela representativa. En cada faja se establecieron dos (2) unidades de muestreo, obteniéndose un total de diez (10) unidades de muestreo por sistema de uso del suelo.

b) Extracción de monolitos de suelo

En cada unidad de muestreo se extrajo un monolito de suelo utilizando un marco metálico de 25 × 25 cm, excavando hasta una profundidad de 30 cm. El monolito fue separado en tres estratos: 0–10 cm, 10–20 cm y 20–30 cm, de acuerdo con el protocolo TSBF. El suelo extraído fue colocado sobre una lona para facilitar la búsqueda manual y recolección de los organismos de macrofauna presentes.

c) Recolección y conservación de la macrofauna

La macrofauna edáfica fue recolectada manualmente empleando pinzas y cepillos, asegurando la extracción completa de los organismos presentes en cada estrato. Los individuos recolectados fueron conservados según su tipo morfológico: los organismos de cuerpo blando se preservaron en formol al 4 %, mientras que los insectos y organismos de cuerpo endurecido se conservaron en alcohol etílico al 70–80 %. Cada frasco fue rotulado con información correspondiente al sistema de uso, unidad de muestreo, profundidad y fecha de muestreo.

d) Identificación taxonómica

La identificación de los organismos recolectados se realizó inicialmente en campo y posteriormente en laboratorio, utilizando una guía taxonómica y un estereoscopio. Los individuos fueron clasificados al menos hasta nivel de orden o grupo funcional, agrupándose en grandes taxones como Annelida, Arthropoda y Mollusca.

e) Cálculo de la abundancia y diversidad

La abundancia de la macrofauna edáfica se expresó como número de individuos por metro cuadrado (ind/m²), considerando el área del monolito muestreado. Asimismo, se determinó la riqueza de especies y se calcularon los índices de diversidad alfa, específicamente los índices de Shannon-Wiener (H') y Simpson (1-D), los cuales permitieron evaluar la estructura y equitatividad de las comunidades de macrofauna en los diferentes sistemas de uso del suelo.

Los resultados obtenidos proporcionaron información fundamental para analizar el estado biológico del suelo y su relación con las propiedades físicas y químicas evaluadas en la investigación.

Índice de Diversidad de Shannon - Wiener (H')

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

Dónde:

N_i = Abundancia de género

N = Abundancia total de los géneros = $\sum n_i$

P_i = $\frac{n_i}{N}$

Índice de Diversidad de Simpson (D)

$$D = \sum_{i=1}^s p_i^2$$

Dónde:

S = Número de grupos (órdenes u otro nivel usado)

Pi = n_i/N = proporción del i-ésimo

grupo n_i = Número de individuos

del grupo i $N = \sum n_i$ = número total

de individuos

En el análisis se empleó la forma 1 - D, donde valores cercanos a 1 indican mayor diversidad y valores cercanos a 0 menor diversidad.

f) **Delimitación metodológica respecto a la biota del suelo**

Si bien la mesofauna y la microfauna del suelo forman parte de los procesos generales de degradación edáfica y dinámica erosiva, en la presente investigación se optó por no evaluar estos componentes biológicos, debido a criterios metodológicos, técnicos y de alcance del estudio.

La investigación se centró en la macrofauna edáfica como indicador biológico de la calidad del suelo, debido a que este grupo responde de manera directa y sensible a los cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo, especialmente a la compactación, pérdida de estructura y disponibilidad de nutrientes. Asimismo, la macrofauna cumple un rol clave como ingeniera del ecosistema, influyendo en procesos como la bioturbación, agregación del suelo e infiltración del agua.

La evaluación de la mesofauna y microfauna requiere metodologías especializadas, tales como extracción mediante embudos de Berlese-Tullgren, técnicas de flotación, cultivos microbiológicos o análisis moleculares, las cuales demandan condiciones de laboratorio, tiempos y equipamiento distintos a los empleados en el presente estudio. En este sentido, su inclusión hubiera implicado un diseño metodológico diferente, ampliando el alcance original de la investigación.

Por tanto, la no valoración de la mesofauna y microfauna del suelo no constituye una omisión metodológica, sino una delimitación consciente del objeto de estudio, coherente con el enfoque no experimental, los objetivos planteados y el uso del método TSBF, ampliamente recomendado para estudios comparativos de calidad del suelo en ecosistemas tropicales.

3.2.2.4. Análisis de la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la macrofauna edáfica en los tres sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao

Para analizar la relación entre las propiedades físicas y químicas del suelo y los indicadores biológicos de la macrofauna edáfica en los tres sistemas de uso del suelo evaluados (*Pteridium aquilinum*, *Erythroxylum coca* y *Andropogon bicornis*), se integró la información obtenida del análisis edáfico y del inventario de macrofauna en una matriz de datos consolidada.

a) Organización y tratamiento de los datos

Se elaboró una base de datos que incluyó los valores de las propiedades físicas (textura, densidad aparente y resistencia a la penetración), químicas (pH, materia orgánica, nitrógeno total, fósforo disponible, potasio disponible, calcio, magnesio y capacidad de intercambio catiónico efectiva) y biológicas (abundancia total, riqueza de especies e índices de diversidad de Shannon-Wiener y Simpson) correspondientes a cada sistema de uso del suelo.

Previo al análisis estadístico, los datos fueron evaluados para verificar la presencia de valores atípicos y la distribución de las variables. En los casos necesarios, se aplicaron transformaciones logarítmicas a las variables biológicas, especialmente aquellas relacionadas con abundancia, con el fin de reducir la asimetría de los datos.

b) Análisis de correlación

La relación entre las propiedades del suelo y los indicadores de la macrofauna edáfica se evaluó mediante análisis de correlación, seleccionando el coeficiente estadístico adecuado según el comportamiento de los datos. Cuando las variables cumplieron con los supuestos de normalidad, se utilizó el **coeficiente de correlación de Pearson**; en caso contrario, se aplicó el **coeficiente de correlación de Spearman**.

Este análisis permitió identificar asociaciones positivas o negativas entre las propiedades físicas y químicas del suelo y la abundancia y diversidad de la macrofauna edáfica, sin establecer relaciones de causalidad, en concordancia con el diseño no experimental de la investigación.

c) Interpretación edafológica y ecológica

Las correlaciones obtenidas fueron interpretadas considerando criterios edafológicos y ecológicos, analizando cómo variables como la compactación del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el contenido de materia orgánica influyen en la

estructura y dinámica de las comunidades de macrofauna edáfica. Este enfoque permitió comprender el papel de la calidad del suelo como factor determinante en la distribución y diversidad biológica en los diferentes sistemas de uso del suelo evaluados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de las propiedades físicas y químicas del suelo en los sistemas de uso del suelo del caserío Bijao

Se presenta la evaluación comparativa de las propiedades físicas y químicas del suelo en los distintos sistemas de uso del caserío Bijao, con el propósito de identificar cómo el manejo y el tipo de cobertura influyen en la condición edáfica y en los procesos asociados a la calidad del suelo.

4.1.1. Propiedades físicas del suelo en el caserío bijao

Los resultados obtenidos permiten distinguir diferencias claras en las propiedades físicas del suelo entre los sistemas evaluados, especialmente en lo referente a la densidad aparente, la resistencia a la penetración y la textura. Estas variaciones reflejan distintos niveles de compactación, disturbio y condición estructural asociados al tipo de uso del suelo y su historial de manejo en Bijao.

4.1.1.1. Textura del suelo

Los resultados de la textura del suelo evidencian diferencias entre los sistemas de uso evaluados (Tabla 5). Los suelos bajo *Erythroxylum coca* y *Pteridium aquilinum* presentan una textura **franca arcillo arenosa**, caracterizada por un mayor contenido de arena, mientras que el sistema dominado por *Andropogon bicornis* muestra una textura **franco-arcillosa**, con mayor proporción de arcilla.

Tabla 5. Textura del suelo en los sistemas de uso del caserío Bijao.

Sistema de uso del suelo	arena (%)	arcilla (%)	Limo (%)	Clase textural
<i>Erythroxylum. coca</i>	48	25	27	Franco arcillo arenoso
<i>Pteridium. aquilinum</i>	58	25	17	Franco arcillo arenoso
<i>Andropogon. bicornis</i>	34	39	27	Franco arcilloso

Desde el punto de vista edafológico, las texturas franco arcillo arenosas favorecen una mayor permeabilidad y drenaje, pero presentan menor capacidad de retención de agua y nutrientes, especialmente en suelos tropicales altamente meteorizados (FAO, 2006; Brady & Weil, 2016). En contraste, el mayor contenido de arcilla observado en *A. bicornis* se asocia a suelos más compactos y con menor aireación, condición típica de áreas degradadas o sometidas a disturbio prolongado.

Estos resultados Figura 1, concuerdan con lo reportado por Lal y Shukla (2004), quienes señalan que los sistemas de uso con menor cobertura arbórea y mayor

presión antrópica tienden a presentar texturas más finas y menor estabilidad estructural, afectando negativamente la calidad física del suelo.

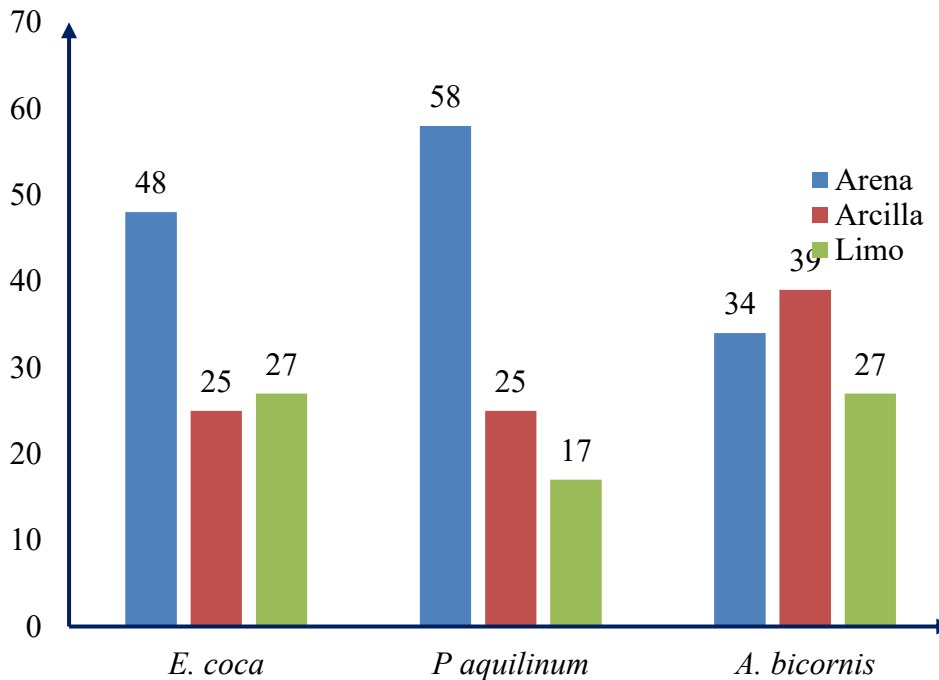


Figura 1. Valores de la textura del suelo entre los sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao.

4.1.1.2. Densidad aparente

La densidad aparente mostró variaciones entre los sistemas de uso del suelo (Tabla 6). El sistema con *Andropogon bicornis* presentó el valor más elevado, clasificándose dentro de la categoría **alta**, mientras que los sistemas con *Erythroxylum coca* y *Pteridium aquilinum* se ubicaron en la categoría **media**.

Tabla 6. Valores obtenidos de la densidad aparente del suelo (g/cm^3) en los sistemas de uso del caserío Bijao.

Sistema de uso del suelo	Da (g/cm^3)	Categoría
<i>Andropogon. bicornis</i>	1.62	Alta
<i>Erythroxylum. coca</i>	1.53	Media
<i>Pteridium. aquilinum</i>	1.48	Media
Bosque secundario	1.37	Media

USDA-NRCS (2014), Lal & Shukla (2004),

Valores elevados de densidad aparente Figura 2, indican compactación del suelo, reducción de la porosidad y limitaciones para el crecimiento radicular y la actividad biológica (USDA-NRCS, 2014; Brady & Weil, 2016). En este sentido, la mayor compactación observada en *A. bicornis* refleja un estado de degradación física del suelo, asociado a la pérdida de cobertura vegetal y a procesos de recuperación edáfica aún

incipientes.

Resultados similares fueron reportados por Huamán (2021) y Celis et al. (2020), quienes evidencian que los sistemas agrícolas degradados o con vegetación secundaria temprana presentan mayores valores de densidad aparente en comparación con sistemas más conservados.

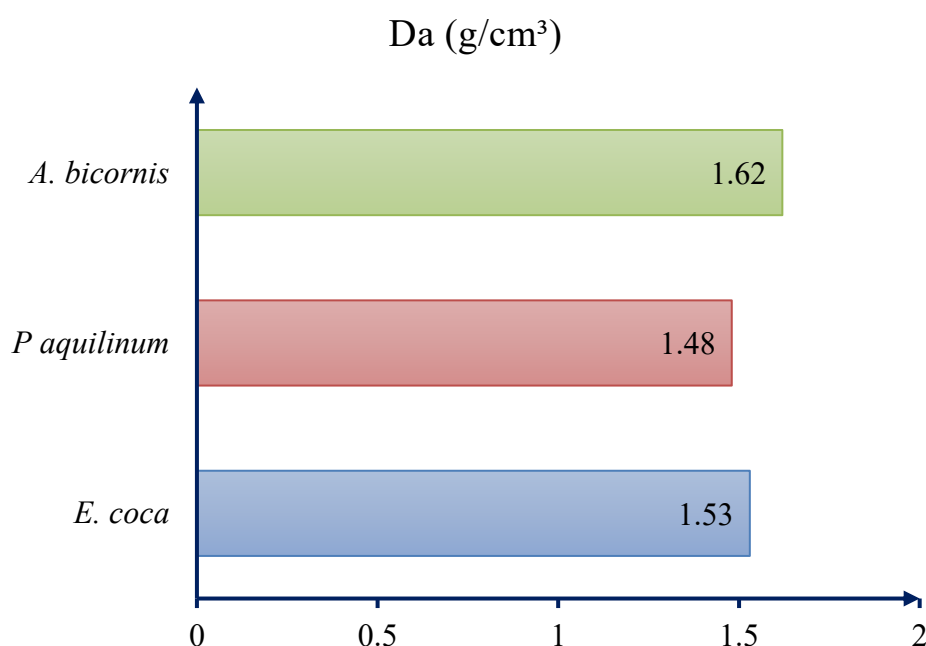


Figura 2. Variación de la densidad aparente entre los sistemas de uso del suelo.

4.1.1.3. Resistencia a la penetración del suelo

La resistencia a la penetración presentó valores altos en los sistemas con *Andropogon bicornis* y *Erythroxylum coca*, mientras que el sistema con *Pteridium aquilinum* mostró valores moderados (Tabla 7). Este comportamiento es coherente con los resultados de densidad aparente, confirmando la existencia de condiciones de compactación en los sistemas más intervenidos. Según Blas (2021), suelos bajo cobertura boscosa suelen presentar menor resistencia debido a la mayor actividad biológica y la acumulación de materia orgánica, factores que generan una estructura más mullida y estable.

Tabla 7. Resistencia a la penetración del suelo (kg/cm²) en los sistemas de uso del caserío Bijao.

Sistema de uso del suelo	RPS (kg/cm²)	Categoría
<i>Andropogon. bicornis</i>	24.47	Alta
<i>Erythroxylum. coca</i>	22.43	Alta
<i>Pteridium. aquilinum</i>	18.35	Media

USDA-NRCS. (2014).

De acuerdo con USDA-NRCS (2014), valores elevados de resistencia a la penetración restringen el desarrollo radicular y reducen la infiltración del agua, afectando la productividad del suelo y la actividad de organismos edáficos. La menor resistencia Figura 3, observada en *P. aquilinum* puede atribuirse a una mayor cobertura vegetal y aporte de residuos orgánicos, que favorecen la formación de agregados y una estructura más estable del suelo.

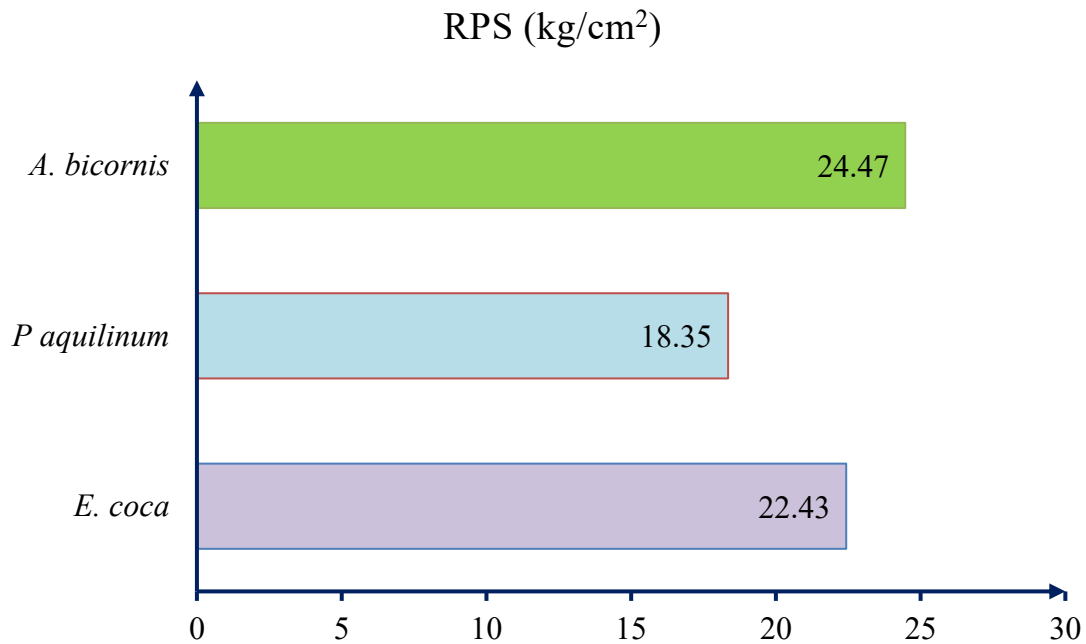


Figura 3. Intensidad de resistencia mecánica del suelo por sistema de uso.

4.1.2. Propiedades químicas del suelo en el caserío bijao

Las propiedades químicas permiten evaluar la disponibilidad de nutrientes esenciales y el grado de degradación o recuperación del suelo frente a distintos usos. Indicadores como pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y cationes intercambiables son claves para interpretar la fertilidad y la funcionalidad del ecosistema edáfico, pues reaccionan rápidamente al manejo y a la intensidad de disturbio (Ramírez et al., 2022). Con esta base, se presentan los resultados comparativos entre los sistemas del caserío Bijao.

4.1.2.1. pH

El pH del suelo en los sistemas evaluados Tabla 8 varió dentro del rango **ácido**, siendo característico de suelos tropicales de la selva alta. El sistema con *Erythroxylum coca* presentó valores ligeramente menos ácidos en comparación con *Pteridium aquilinum* y *Andropogon bicornis*.

Según FAO (2006), los suelos ácidos limitan la disponibilidad de nutrientes esenciales como fósforo, calcio y magnesio, y favorecen la solubilización de

aluminio, lo que afecta la fertilidad del suelo. No obstante, ligeras diferencias en el pH pueden reflejar efectos del manejo agrícola, como la incorporación de insumos o la remoción del suelo en sistemas cultivados.

Tabla 8. Valores de pH del suelo en los sistemas de uso del caserío Bijao.

Sistema de uso del suelo	pH	Categoría
<i>Erythroxylum. coca</i>	4.94	Fuertemente ácido
<i>Andropogon. bicornis</i>	4.54	Fuertemente ácido
<i>Pteridium. aquilinum</i>	4.41	Fuertemente ácido

Fuente: FAO (2006).

Los valores muestran un gradiente ácido marcado, donde *E. coca*, *A. bicornis* y *P. aquilinum* presentan el pH en la categoría de fuertemente ácido. Esta tendencia coincide con lo señalado por Brady y Weil (2016), quienes indican que los sistemas agrícolas sometidos a aplicaciones continuas de fertilizantes nitrogenados pueden experimentar acidificación, aunque en etapas tempranas los residuos orgánicos y la ligera renovación de bases pueden moderar dicho efecto. En contraste, coberturas forestales degradadas y sometidas a sucesión temprana suelen exhibir una acidificación más pronunciada debido al lavado constante de bases y a la acumulación de compuestos orgánicos ácidos.

La acidez uniforme en los sistemas dominados por *E. coca*, *A. bicornis* y *P. aquilinum* refleja procesos de perturbación prolongada. Celis et al. (2020) mencionan que los suelos sometidos a uso intensivo o abandono con vegetación secundaria tienden a presentar pH fuertemente ácido por la pérdida de cationes intercambiables y la disminución de la materia orgánica activa, lo que concuerda con los valores obtenidos. Estas condiciones limitan la disponibilidad de nutrientes esenciales como P, Ca y Mg, afectando la fertilidad general del suelo.

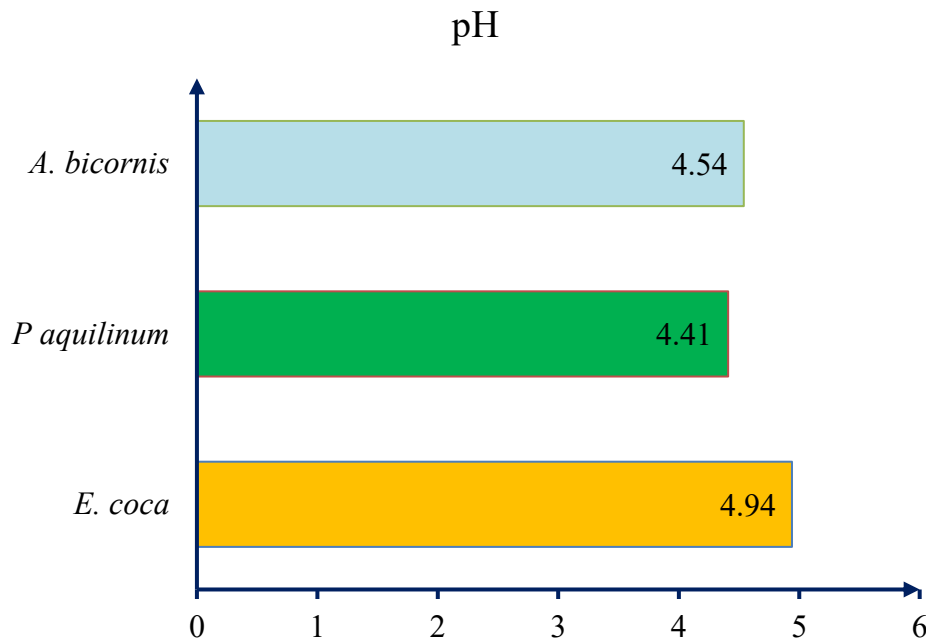


Figura 4. Variación del pH del suelo entre los sistemas de uso del caserío Bijao.

4.1.2.2. Materia orgánica

Los mayores contenidos de materia orgánica, nitrógeno total y capacidad de intercambio catiónico (CIC) Tabla 9 y Figura 5, se registraron en el sistema con *Erythroxylum coca*, mientras que el sistema con *Andropogon bicornis* presentó los valores más bajos. Este patrón indica que los sistemas con mayor aporte de residuos vegetales y manejo reciente mantienen mejores condiciones químicas del suelo.

La materia orgánica cumple un rol clave en la fertilidad del suelo, ya que mejora la estructura, incrementa la capacidad de retención de nutrientes y favorece la actividad biológica (Brady & Weil, 2016). Estudios como los de Blas (2021) y Azañero (2020) reportan tendencias similares en sistemas agrícolas amazónicos, donde los suelos con mayor intervención reciente presentan mejores atributos químicos que aquellos sometidos a degradación prolongada.

Tabla 9. Variación del contenido de materia orgánica (%) en los sistemas de uso del suelo.

Sistema de uso del suelo	Mo (%)	Categoría
<i>Erythroxylum. coca</i>	1.08	Bajo
<i>Andropogon. bicornis</i>	1.03	Bajo
<i>Pteridium. aquilinum</i>	0.72	Bajo

Hazelton & Murphy (2016)

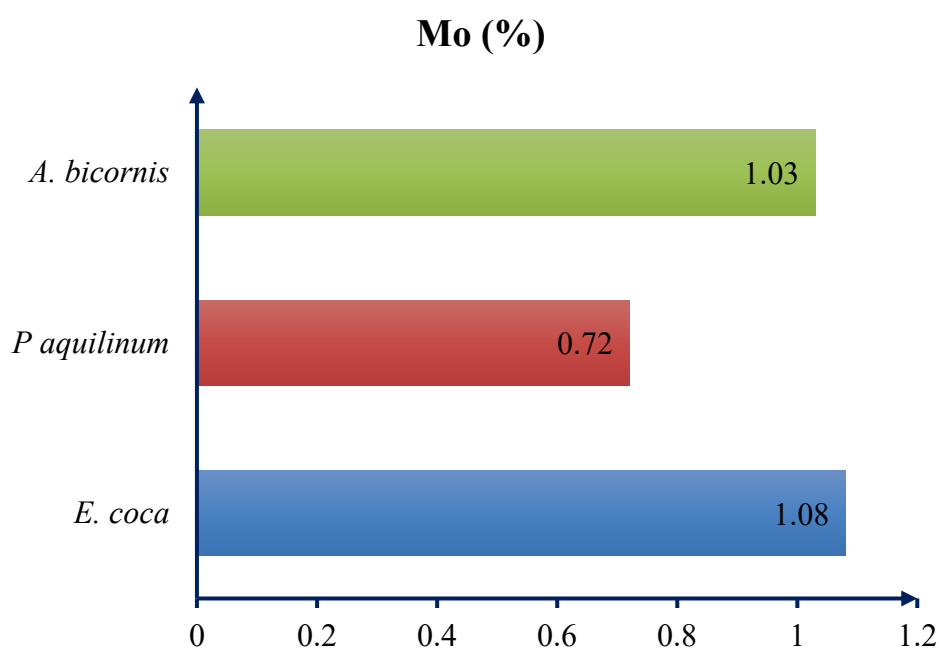


Figura 5. Materia orgánica del suelo (%) en los sistemas de uso del caserío Bijao.

4.1.2.3. Nitrógeno total

El mayor contenido de nitrógeno total se registró en el sistema *Erythroxylum coca* (0.054 %), valor que, aunque bajo, representa la disponibilidad relativa más alta entre los sistemas evaluados (Tabla 10). Según Hazelton y Murphy (2016), niveles inferiores a 0.10 % reflejan suelos con marcada limitación nitrogenada, típicos de ambientes tropicales sometidos a degradación o manejo intensivo. En este contexto, las diferencias observadas sugieren variaciones en la tasa de incorporación de residuos y en la actividad biológica superficial que caracteriza a cada cobertura.

Tabla 10. Contenido de nitrógeno total del suelo (%) en los sistemas de uso del caserío Bijao.

Sistema de uso del suelo	N (%)	Categoría
<i>Erythroxylum. coca</i>	0.054	Bajo
<i>Andropogon. bicornis</i>	0.051	Bajo
<i>Pteridium. aquilinum</i>	0.036	Bajo

Hazelton & Murphy (2016)

Asimismo, la uniformidad de valores bajos Figura 6, confirma lo expuesto por Celis et al. (2020), quienes documentan que los sistemas tropicales degradados o con historial de deforestación presentan pérdidas sostenidas de nitrógeno debido a la erosión, el lavado de bases y la disminución de la materia orgánica activa. Este patrón coincide plenamente con el comportamiento observado en los suelos del caserío Bijao, donde los sistemas evaluados comparten un déficit nitrogenado estructural.

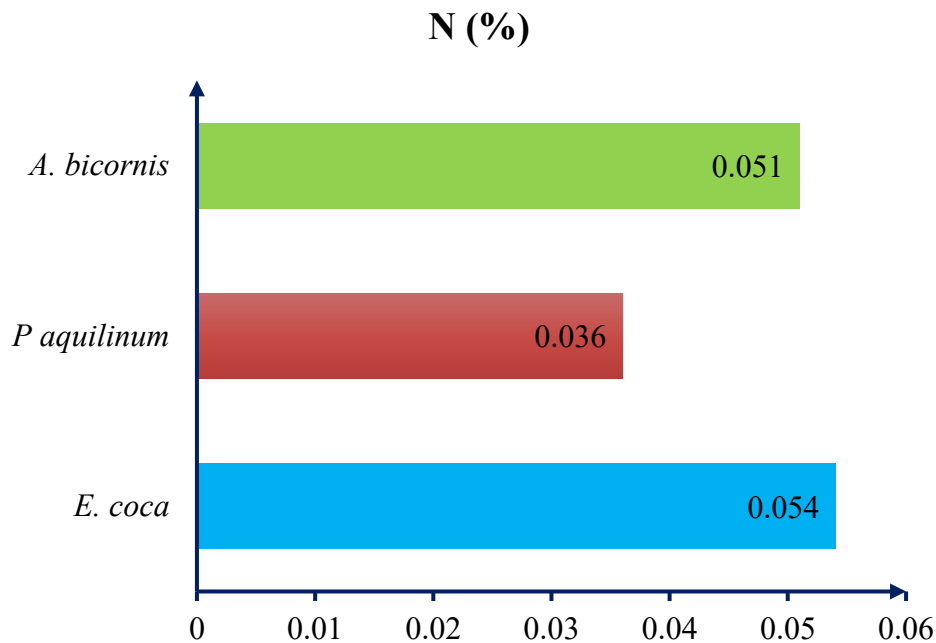


Figura 6. Distribución del nitrógeno total (%) en los sistemas de uso del suelo.

4.1.2.4. Fósforo disponible

El mayor contenido de fósforo disponible se registró en *Pteridium aquilinum* con 6.635 ppm, valor que, aunque bajo, representa el nivel relativamente más alto entre los sistemas evaluados (Tabla 11). Según Hazelton y Murphy (2016), concentraciones inferiores a 8 ppm indican disponibilidad limitada para la absorción vegetal, condición típica en suelos tropicales ácidos donde el fosfato queda fijado por hierro y aluminio. Este comportamiento inicial evidencia la escasa oferta de este nutriente esencial en Bijao.

Tabla 11. Fósforo disponible (ppm) en los sistemas de uso del suelo del caserío Bijao.

Sistema de uso del suelo	P (ppm)	Categoría
<i>Pteridium. aquilinum</i>	6.635	Bajo
<i>Erythroxyllum. coca</i>	5.654	Bajo
Bosque secundario	5.546	Bajo
<i>Andropogon. bicornis</i>	5.298	Bajo

Hazelton & Murphy (2016)

Los valores registrados como bajo en todos los sistemas Figura 7, reflejan un patrón homogéneo de deficiencia, concordante con lo expuesto por Brady y Weil (2016), quienes señalan que en suelos altamente meteorizados y fuertemente ácidos es común que el fósforo se inmovilice rápidamente, reduciendo su disponibilidad para el crecimiento vegetal. En este contexto, el comportamiento relativamente superior en *P. aquilinum* puede

explicarse por la acumulación superficial de restos vegetales y la lenta mineralización de la hojarasca característica de este tipo de vegetación secundaria.

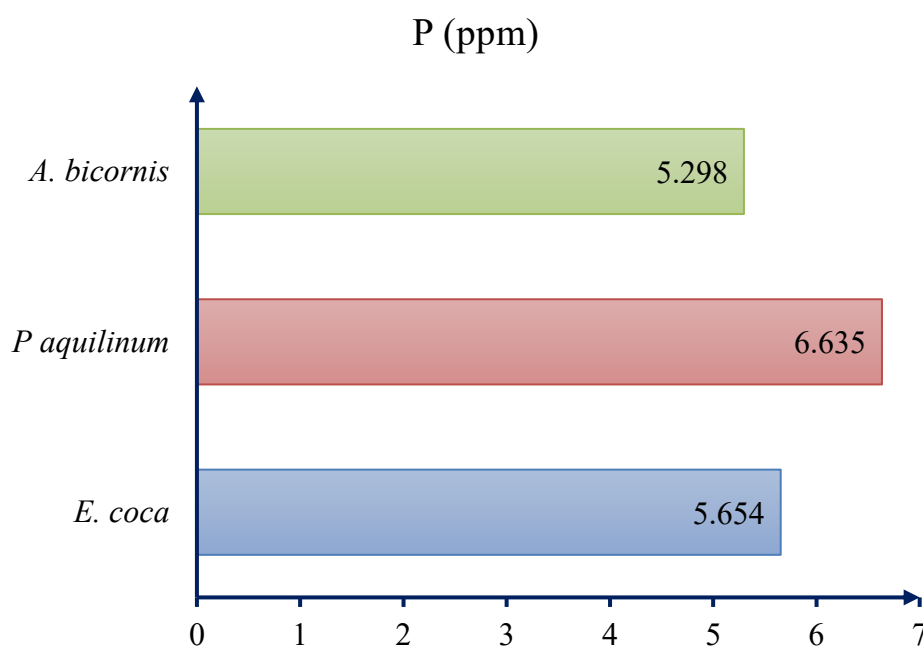


Figura 7. Variación del fósforo disponible (ppm) entre los sistemas de uso del suelo.

4.1.2.5. Potasio disponible

El valor de potasio se registró en la categoría de bajo en todos los sistemas, (Tabla 12). Hazelton y Murphy (2016) evidencian la capacidad de estos sistemas son perturbados para conservar cationes esenciales. Como refieren Castelán et al. (2017), los suelos con mayor estabilidad estructural y menor disturbio mantienen ciclos internos más eficientes de liberación y retención de nutrientes, lo que explica el comportamiento superior del bosque frente a los sistemas intervenidos. Esta tendencia reafirma el rol del bosque como reservorio nutricional clave para sostener la fertilidad en matrices de paisaje tropical.

Tabla 12. Potasio disponible (ppm) en los sistemas de uso del suelo en el caserío Bijao.

Sistema de uso del suelo	K (ppm)	Categoría
<i>Erythroxylum. coca</i>	71.86	Bajo
<i>Pteridium. aquilinum</i>	69.51	Bajo
<i>Andropogon. bicornis</i>	57.76	Bajo

Hazelton & Murphy (2016)

Los valores observados en los sistemas intervenidos indican reducciones claras en la disponibilidad de potasio, en todos los sistemas de uso, lo que coincide con lo señalado por Celis et al. (2020), quienes describen que la remoción constante de biomasa y la pérdida de cobertura favorecen el agotamiento progresivo de cationes intercambiables. Esta disminución, aunque aún dentro de categorías bajas, evidencia un deterioro químico asociado al uso intensivo del suelo, particularmente en áreas donde la

actividad antrópica limita la entrada de nuevos aportes orgánicos.

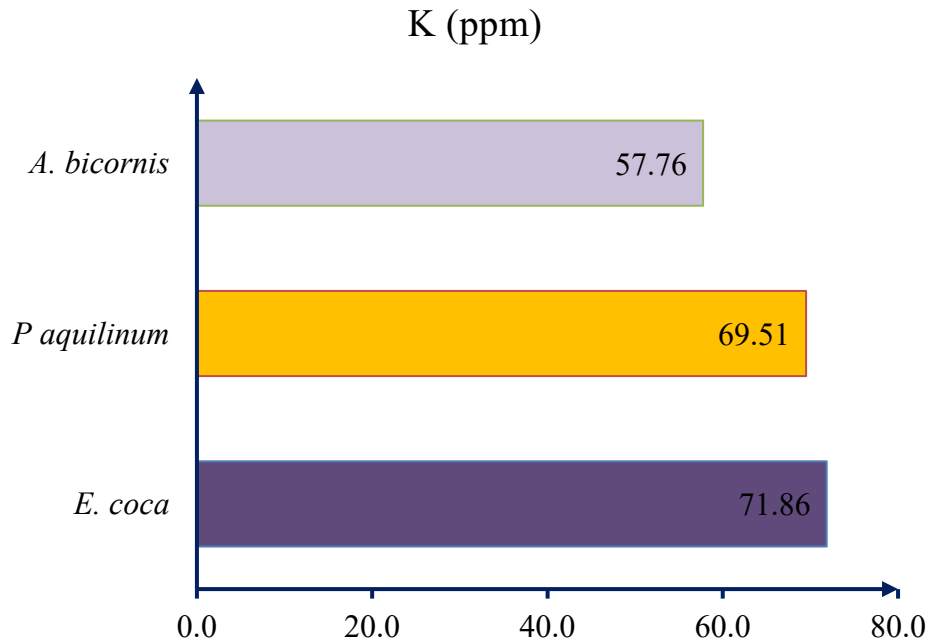


Figura 8. Variación del potasio disponible (ppm) entre los sistemas de uso del suelo.

4.1.2.6. Capacidad de intercambio catiónico

La CIC más alta se registró en el sistema *E. coca* con 6.114 cmol/kg, valor que, aunque bajo según los rangos de Hazelton y Murphy (2016), revela una mayor presencia de sitios activos capaces de retener cationes, condición que suele asociarse con suelos con mayor contenido de coloides reactivos. Este comportamiento es coherente con la influencia de residuos orgánicos finos y ciclos intensos de materia vegetal descritos por Moreno et al. (2018), quienes destacan la importancia de la descomposición para sostener la capacidad de intercambio en sistemas tropicales.

Tabla 13. Capacidad de intercambio catiónico del suelo (cmol/kg) en los sistemas de uso del caserío Bijao.

Sistema de uso del suelo	CICe (cmol/kg)	Categoría
<i>Erythroxylum. coca</i>	6.114	Baja
<i>Andropogon. bicornis</i>	5.840	Baja
<i>Pteridium. aquilinum</i>	4.647	Baja

Hazelton & Murphy (2016)

Los valores obtenidos muestran un patrón descendente desde *E.coca* con 6.114 cmol/kg y *A. bicornis* 5.840 cmol/kg, y *P. aquilinum* 4.647 cmol/kg, todos en la categoría baja. De acuerdo con Hazelton y Murphy (2016), valores inferiores a 12 cmol/kg reflejan suelos con limitada capacidad de retención de nutrientes intercambiables,

condición frecuente en áreas tropicales donde la meteorización avanzada y el lavado de bases reducen la presencia de arcillas de alta actividad. Esta tendencia coincide con los reportes de Celis et al. (2020), quienes indican que prácticas productivas intensivas pueden acentuar la pérdida de cationes y deteriorar la fertilidad base.

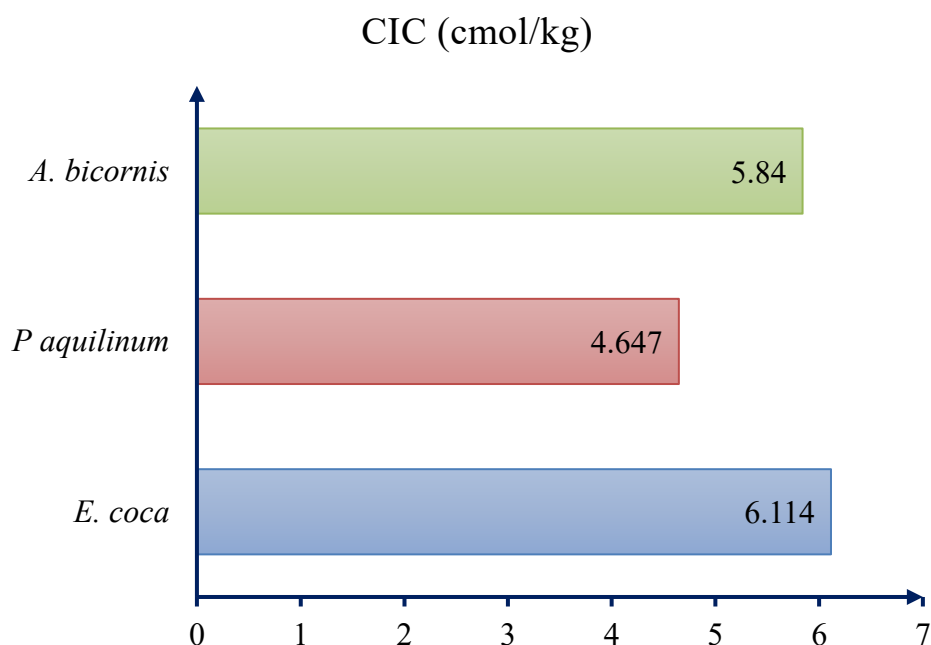


Figura 9. Capacidad de intercambio catiónico del suelo (cmol/kg) entre los sistemas de uso del suelo.

4.1.2.7. Calcio cambiante

El valor de calcio intercambiable se registró en la categoría de bajo en todos los sistemas, estos reflejan condiciones estables en el ciclo de nutrientes y mayor retención de bases, lo cual coincide con lo señalado por Blas (2021) respecto a la superioridad química de sistemas con menor alteración y mayor aporte de hojarasca.

Tabla 14. Calcio intercambiable (cmol/kg) en los sistemas de uso del caserío Bijao.

Sistema de uso del suelo	Ca (cmol/kg)	Categoría
<i>Pteridium. aquilinum</i>	1.369	Bajo
<i>Erythroxylum. coca</i>	1.102	Bajo
<i>Andropogon. bicornis</i>	0.951	Bajo

USDA-NRCS (2014).

Los suelos *P. aquilinum* con 1,369 cmol/kg y *E. coca* con 1.102 cmol/kg revelan un nivel bajo de calcio, lo que sugiere pérdida progresiva de bases intercambiables por efecto de prácticas extractivas o perturbación del horizonte superficial. Esta tendencia coincide con los hallazgos de Huamán (2021), quien señala que los sistemas agrícolas

y cocaleros presentan empobrecimiento de cationes bivalentes debido al uso repetitivo del suelo sin reposición adecuada de nutrientes.

El valor más reducido, observado en *A. bicornis* con 0.951 cmol/kg, evidencia condiciones de mayor lixiviación o menor aporte orgánico, un patrón que Azañero (2020) asocia a sistemas degradados con menor ciclado biogeoquímico. La persistencia de valores bajos en todos los sistemas sugiere que el calcio es un elemento crítico en la fertilidad local, especialmente en paisajes con alta acidez y drenaje intenso.

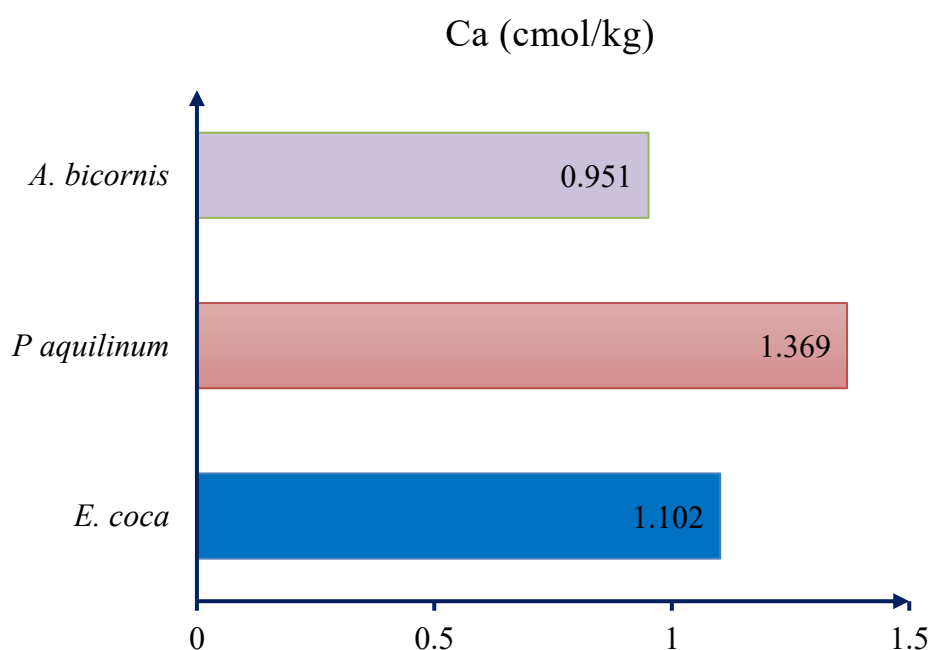


Figura 10. Distribución del calcio intercambiable (cmol/kg) en los sistemas de uso del suelo.

4.1.2.8. Magnesio cambiante

El mayor valor de magnesio intercambiable se registró en *E. coca* (0.265 cmol/kg), condición que, aunque se ubica en el rango bajo establecido para suelos tropicales, muestra una ligera ventaja relativa frente a los demás sistemas evaluados. De acuerdo con el USDA–NRCS (2014), concentraciones inferiores a 1 cmol/kg reflejan suelos con limitada capacidad para sostener procesos metabólicos básicos relacionados con la activación enzimática y la eficiencia fotosintética, lo cual explica la sensibilidad del cultivo y su dependencia de aportes externos para mantener niveles funcionales de productividad.

Tabla 15. Magnesio intercambiable (cmol/kg) en los sistemas de uso del caserío Bijao.

Sistema de uso del suelo	Mg (cmol/kg)	Categoría
<i>Erythroxylum. coca</i>	0.265	Bajo
<i>Pteridium. aquilinum</i>	0.264	Bajo
<i>Andropogon. bicornis</i>	0.180	Bajo

USDA–NRCS (2014).

Las diferencias registradas entre 0.180 y 0.265 cmol/kg evidencian un comportamiento homogéneo del Mg en todos los sistemas, mostrando la fuerte influencia que ejerce la acidez del suelo sobre su disponibilidad. Según lo descrito por Castelán et al. (2017), los suelos fuertemente ácidos tienden a presentar lixiviación acelerada de cationes básicos, entre ellos el magnesio, generando pérdidas sostenidas del nutriente y limitando la estabilidad estructural de los agregados. Esto coincide con las condiciones del caserío Bijao, donde el predominio de pH bajo favorece la desaturación de bases y restringe la retención del Mg en el complejo de cambio.

El valor menor observado en *A. bicornis* con 0.180 cmol/kg indica la mayor vulnerabilidad del sistema a la deficiencia de este nutriente, lo que podría afectar la síntesis de clorofila y el crecimiento radicular, especialmente en suelos con limitaciones en materia orgánica. Tal como señalan Nuñez, Pérez y Prado (2023), la disponibilidad de cationes bivalentes como Mg depende tanto del manejo del suelo como del aporte continuo de residuos vegetales, los cuales mejoran la CIC y amortiguan la pérdida del nutriente por lavado. Esto sugiere que los sistemas del caserío Bijao requieren prácticas que incorporen biomasa, cobertura y aporte orgánico para estabilizar la dinámica del magnesio.

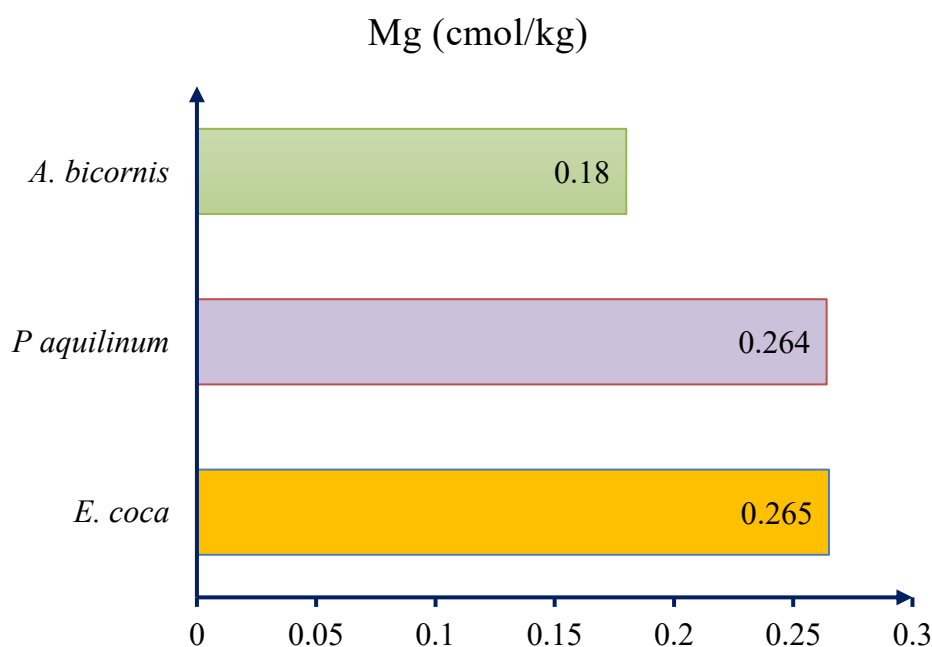


Figura 11. Variación del magnesio intercambiable (cmol/kg) en los sistemas de uso del suelo.

En conjunto, los resultados evidencian que la calidad física y química del suelo varía significativamente entre los sistemas de uso evaluados. El sistema dominado por *Andropogon bicornis* presenta las condiciones más desfavorables, asociadas a

compactación y baja fertilidad, mientras que *Erythroxylum coca* muestra mejores atributos químicos y *Pteridium aquilinum* condiciones físicas intermedias, reflejando distintos estados de intervención y recuperación edáfica.

4.2. Evaluación de la abundancia y diversidad de la macrofauna edáfica presente en los sistemas de uso del suelo del caserío Bijao

La evaluación de la abundancia y diversidad de la macrofauna edáfica permite identificar el nivel de actividad biológica del suelo y su respuesta frente a los distintos sistemas de uso existentes en el caserío Bijao. Este análisis es fundamental porque la macrofauna actúa como indicador sensible de disturbio, manejo y recuperación ecológica, reflejando variaciones en estructura, disponibilidad de nutrientes y condiciones microambientales asociadas a cada tipo de cobertura.

4.2.1. Abundancia de la macrofauna edáfica

La abundancia total de la macrofauna edáfica mostró diferencias notorias entre los sistemas de uso del suelo evaluados (Tabla 16). El sistema dominado por *Pteridium aquilinum* presentó la **mayor abundancia de individuos**, seguido del sistema con *Erythroxylum coca*, mientras que el sistema con *Andropogon bicornis* registró la **menor abundancia**, evidenciando condiciones edáficas menos favorables para el desarrollo de comunidades biológicas del suelo.

Desde una perspectiva edafológica, la mayor abundancia observada en *P. aquilinum* puede atribuirse a la presencia de una cobertura vegetal continua y a la acumulación de residuos orgánicos en superficie, lo que genera un microambiente favorable para la macrofauna, especialmente para organismos detritívoros y excavadores. En contraste, la baja abundancia registrada en *A. bicornis* refleja un estado de degradación del suelo, asociado a compactación, baja disponibilidad de materia orgánica y menor estabilidad estructural.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Royero (2019), quien señala que los sistemas con mayor cobertura vegetal y menor disturbio presentan comunidades de macrofauna más abundantes, mientras que los suelos degradados o compactados limitan significativamente la presencia de estos organismos.

Tabla 16. Abundancia de macrofauna edáfica en los sistemas de uso del suelo del caserío Bijao.

Taxonomía	Nombre común	<i>E. coca</i>	<i>P. aquilinum</i>	<i>A. bicornis</i>	Total
Diptera	Moscas y mosquitos	7	14	7	28
Coleóptera	Escarabajos	14	25	6	45

Araneae	Arañas	2	10	1	13
Haplotaxida	Lombrices de tierra	20	34	18	72
Diplopoda	Milpiés	1	2	0	3
Himenóptera	Hormigas	6	20	2	28
Isópoda	Cochinillas	15	35	4	54
<hr/>					
Dictióptera	Cucarachas	4	3	2	9
Hemíptera	Chinches y salta hojas	3	5	1	9
Isóptera	Termitas	10	36	13	59
Orthóptera	Grillos	1	8	0	9
Lepidóptera	Oruga	0	8	2	10
Dermaptera	Tijeretas	0	4	0	4
Paurápodos	NN	0	1	0	1
Total		83	205	56	344

De acuerdo| con Anderson e Ingram (1993), la macrofauna responde con mayor sensibilidad a los gradientes de disturbio, lo cual se evidencia en la reducción notable de individuos en el sistema *A. bicornis* con 56 y, en menor medida, en *E. coca* con 83, sistemas donde la compactación del suelo, el menor aporte de hojarasca y la degradación estructural limitan la actividad biológica. Este comportamiento coincide con lo descrito por Zhang (2021), quien señala que los usos agrícolas intensivos y coberturas degradadas presentan disminuciones directas en densidad faunística por alteraciones del microhábitat.

Respecto a los grupos taxonómicos, la dominancia de órdenes funcionales como Isóptera con 59 individuos, Haplotaxida con 72 individuos e Isópoda con 54 individuos, indica procesos activos de descomposición y reciclaje de nutrientes, coherentes con lo expuesto por Gasser y Brady (2020), quienes destacan que estos grupos prosperan en ambientes donde la estructura del suelo y la humedad favorecen la bioturbación. La mayor presencia de estos organismos en el bosque secundario y en *P. aquilinum* sugiere condiciones edáficas más favorables en comparación con los sistemas más degradados.

La abundancia total mostró un claro predominio *P. aquilinum* (Figura 12), donde se registraron los mayores conteos de Isóptera, Isópoda y Haplotaxida, evidenciando la fuerte relación entre cobertura vegetal densa, disponibilidad de materia orgánica y mayor

estabilidad microclimática, tal como señalan Diaz y Arcelis (2019) al describir que los ensamblajes más diversos se concentran en sistemas menos perturbados. Esta tendencia concuerda con lo planteado por Porta et al. (1999, citado por Merino, 2021), quienes indican que la mayor biomasa de macroinvertebrados se acumula en estratos con condiciones óptimas de humedad y protección del suelo.

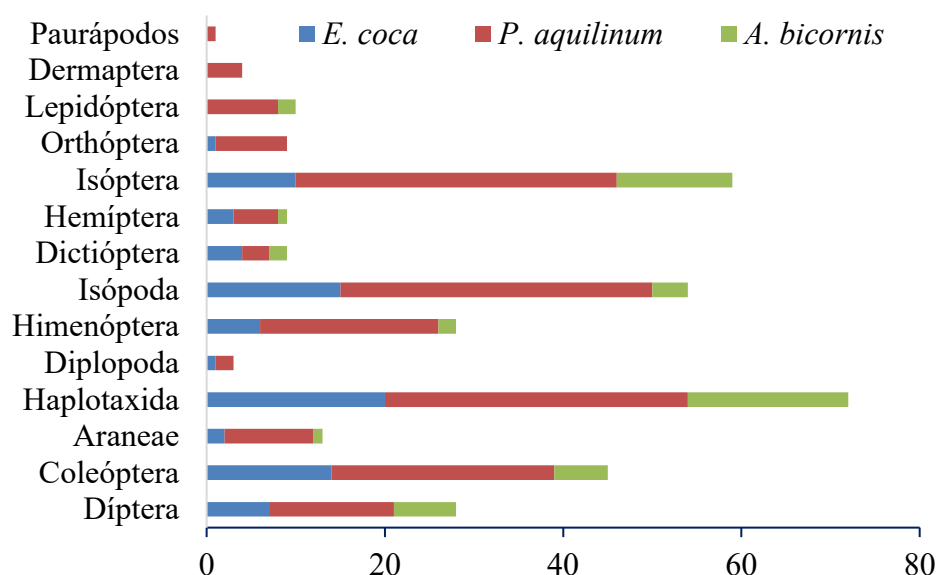


Figura 12. Abundancia total de macrofauna edáfica en los sistemas de uso del suelo del caserío Bijao.

En contraste, el sistema de *A. bicornis* presentó la menor abundancia global, reflejando condiciones restrictivas asociadas a degradación previa, baja cobertura y alteración física del suelo, patrones ya advertidos por Zhang (2021) al vincular el empobrecimiento biológico con usos del suelo sometidos a disturbios crónicos. La concentración de órdenes clave como Coleóptera, Formicidae y Oligochaeta— en los sistemas con mejor estructura vegetal reafirma lo señalado por Gasser y Brady (2020), quienes destacan que textura, humedad y calidad orgánica son determinantes en la distribución de macrofauna y su rol en la funcionalidad del ecosistema.

La mayor presencia de Isóptera, Haplotaxida, Isópoda y Himenóptera evidencia un patrón común en ambientes tropicales alterados (Figura 13), donde estos grupos responden activamente a la oferta de materia orgánica y a la estructura física del suelo. Esta tendencia coincide con lo señalado por Gasser y Brady (2020), quienes sostienen que la densidad de macrofauna está fuertemente influenciada por la calidad de la materia orgánica y el estado de los agregados del suelo. Además, la elevada abundancia registrada en estos órdenes

sugiere que los sistemas evaluados mantienen condiciones que permiten la actividad bioturbadora, aun con diferencias marcadas asociadas al tipo de uso del suelo, como también lo reporta Díaz y Arcelis (2019) para ecosistemas intervenidos.

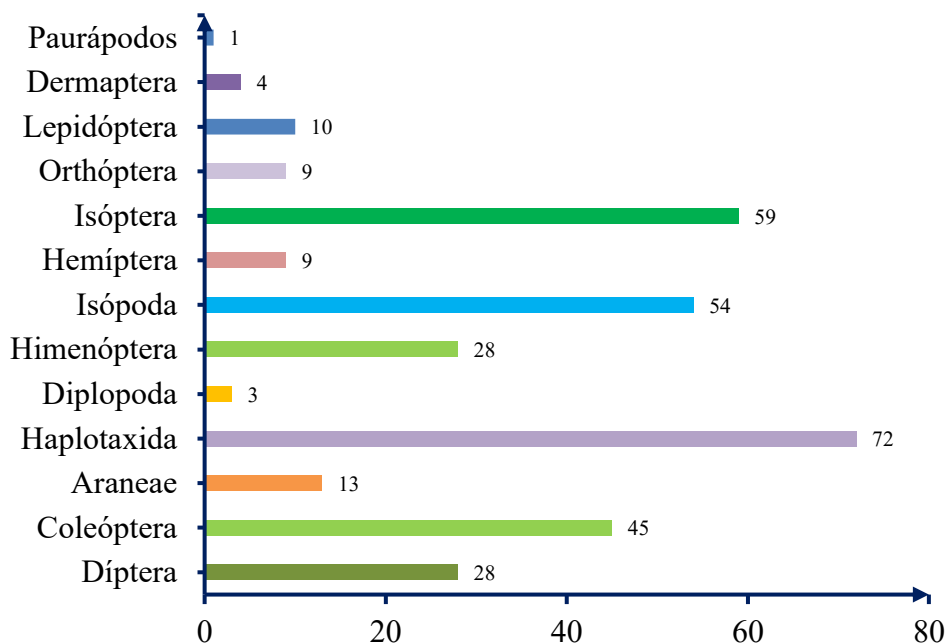


Figura 13. Distribución comparativa de los grupos taxonómicos de macrofauna en los sistemas de uso del suelo.

Por otro lado, los grupos con menor representación, como Diplopoda, Dermaptera, Paurápodos y Araneae, reflejan una mayor sensibilidad a los cambios del hábitat y a las perturbaciones derivadas de prácticas agrícolas y degradación del suelo. Esta distribución desigual es coherente con lo descrito por Zhang (2021), quien resalta que la fragmentación y el manejo intensivo reducen la diversidad funcional de la macrofauna, afectando particularmente a los organismos menos tolerantes. Tales resultados permiten inferir que la composición de macroinvertebrados responde de manera directa al nivel de disturbio y a la estabilidad ecológica de cada sistema de uso del suelo.

La distribución general de individuos muestra una clara gradiente creciente de abundancia entre los sistemas evaluados (Figura 14), siendo *P. aquilinum* el que concentra el mayor número de organismos (205 individuos). Esta tendencia concuerda con lo señalado por Royero (2019), quien indica que los sistemas con mayor cobertura vegetal y menor perturbación tienden a albergar densidades superiores de macrofauna por la mayor disponibilidad de hábitats, microclimas estables y recursos tróficos. Por el contrario, *E. coca* registra solo 83 individuos, reflejando el impacto de las actividades agrícolas intensivas sobre la estructura biológica del suelo.

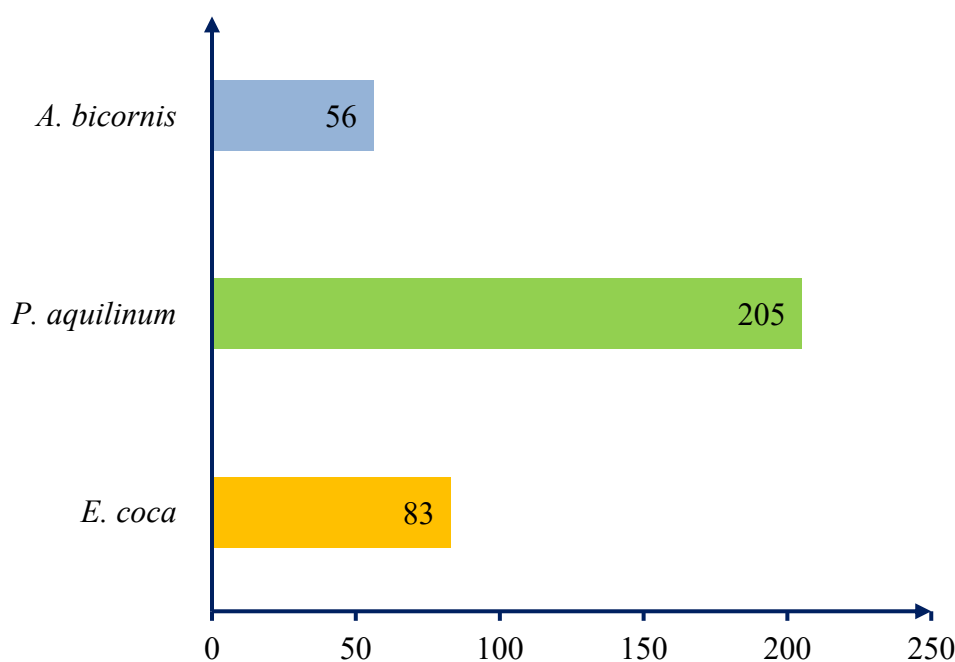


Figura 14. Distribución total de individuos de macrofauna edáfica según sistema de uso del suelo en Bijao.

Asimismo, *A. bicornis* alcanza 56 individuos, valor que sugiere un ambiente degradado y con limitaciones edáficas, coherente con lo descrito por Zhang (2021), quien destaca que los sistemas dominados por gramíneas invasoras suelen mostrar comunidades biológicas empobrecidas debido a la compactación del suelo, baja materia orgánica y reducida heterogeneidad estructural. En conjunto, los datos de la Figura 14 evidencian que la abundancia de macrofauna es un indicador sensible del manejo y del nivel de disturbio presente en cada sistema de uso.

4.2.2. Composición taxonómica de la macrofauna edáfica

En los tres sistemas de uso del suelo se identificaron organismos pertenecientes principalmente a los filos **Annelida** y **Arthropoda**, siendo estos los grupos más representativos de la macrofauna edáfica. La mayor diversidad de grupos taxonómicos se observó en el sistema con *P. aquilinum*, mientras que *A. bicornis* presentó una composición más simplificada, dominada por pocos grupos.

La dominancia de ciertos taxones en sistemas degradados ha sido reportada por Díaz y Arcelis (2019), quienes indican que la pérdida de diversidad biológica del suelo es un indicador temprano de degradación edáfica. Por el contrario, la presencia equilibrada de diferentes grupos funcionales, como lombrices y artrópodos, refleja una mayor estabilidad ecológica del suelo.

4.2.3. Riqueza de especies

La riqueza de especies fue mayor en los sistemas con *Pteridium aquilinum* y *Erythroxylum coca*, mientras que el sistema con *Andropogon bicornis* presentó el menor número de especies. Esta tendencia evidencia que los sistemas con mejores condiciones físicas y químicas del suelo favorecen la coexistencia de un mayor número de especies de macrofauna.

Según Hooper (2020), una mayor riqueza biológica está asociada con una mayor resiliencia del ecosistema y una mejor capacidad del suelo para mantener funciones ecológicas clave, como la descomposición de la materia orgánica y el reciclaje de nutrientes.

4.2.3.1. Índices de diversidad de macrofauna edáfica en Bijao

Los índices de diversidad de Shannon-Wiener (H') y Simpson ($1-D$) reflejaron diferencias claras entre los sistemas de uso del suelo (Tabla 17). El sistema con *Pteridium aquilinum* presentó los valores más altos de diversidad, seguido por *Erythroxylum coca*, mientras que *Andropogon bicornis* mostró los valores más bajos, indicando una comunidad dominada por pocos taxones.

Valores elevados de H' y de $1-D$ indican comunidades más diversas y equilibradas, mientras que valores bajos reflejan dominancia de pocas especies, característica de ambientes perturbados (Magurran, 2021; Jost, 2021). En este contexto, los resultados obtenidos confirman que la macrofauna edáfica responde de manera sensible a las condiciones físicas y químicas del suelo y al tipo de uso del suelo.

Tabla 17. Diversidad de Shannon, Wiener y Simpson de la macrofauna edáfica en el caserío de Bijao.

Sistemas de uso	Shannon - Wiener (H')	Simpson (D)
<i>Erythroxylum. coca</i>	2.07	0.849
<i>Pteridium. aquilinum</i>	2.27	0.877
<i>Andropogon. bicornis</i>	1.89	0.806

Los valores de Shannon y Simpson evidencian diferencias marcadas en la estructura de la macrofauna entre los sistemas de uso. *P. aquilinum*, con $H' = 2.27$ y Simpson = 0.877, mostró la comunidad más equilibrada y diversa, coherente con lo señalado por Magurran (2021), quien sostiene que valores elevados reflejan una mayor complejidad ecológica y distribución uniforme de abundancias. Este comportamiento sugiere

que la sucesión natural del sistema favorece la disponibilidad de microhábitats y la coexistencia de múltiples órdenes, coincidiendo con lo propuesto por Schmind (2023) respecto al rol de la diversidad alfa en el funcionamiento del ecosistema.

Por el contrario, *A. bicornis* presentó la diversidad más baja con $H' = 1.89$, Simpson = 0.806, reflejando condiciones edáficas empobrecidas y menor equidad biológica. Esta tendencia coincide con lo expuesto por Barton (2022), quien describe que valores reducidos de Simpson indican dominancia de uno o pocos grupos taxonómicos, señalando ecosistemas perturbados o en proceso de degradación. El sistema de *E. coca* mantuvo una diversidad intermedia, lo cual es consistente con Díaz y Cramer (2023), al indicar que la abundancia relativa modula la estabilidad de comunidades edáficas incluso bajo presiones ambientales. Finalmente, los patrones registrados confirman lo planteado por Jost (2021) sobre la utilidad conjunta de Shannon y Simpson para interpretar riqueza y equidad en comunidades ecológicas complejas.

Los patrones de diversidad observados muestran que *P. aquilinum* mantiene la estructura más equilibrada de macrofauna edáfica, expresada en el valor más alto de Shannon (2.27) y la mayor dominancia invertida según Simpson (0.877), lo que coincide con lo señalado por Jost (2006) respecto a la estabilidad que caracteriza a las comunidades con distribución proporcional de abundancias. En contraste, *A. bicornis* evidencia la menor diversidad con $H' = 1.89$; $D = 0.806$, reforzando su asociación con ambientes empobrecidos y dominados por pocas especies, patrón apreciable en la figura correspondiente.

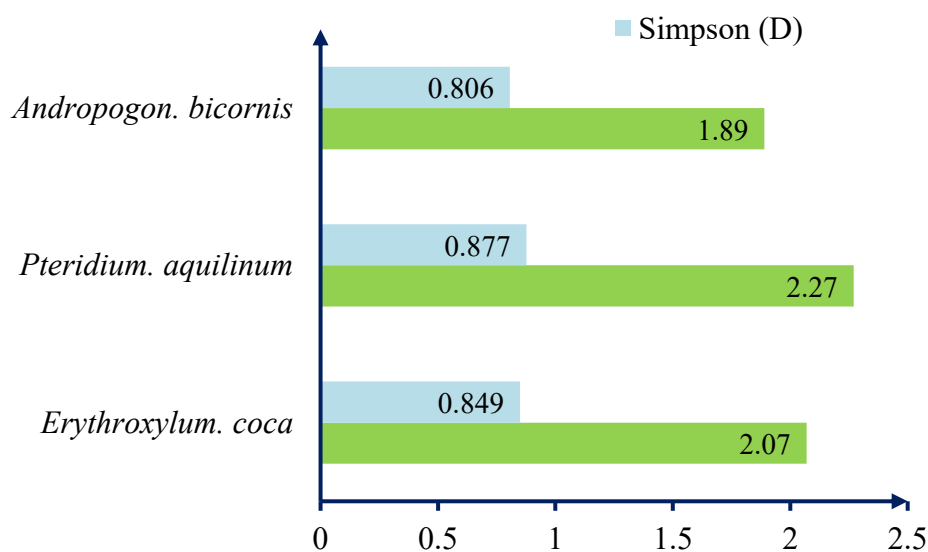


Figura 15. Diversidad de la macrofauna edáfica según los índices de Shannon Wiener y Simpson en los sistemas de uso del suelo del caserío Bijao.

Los resultados evidencian que la abundancia y diversidad de la macrofauna edáfica varían significativamente entre los sistemas de uso del suelo del caserío Bijao. El sistema dominado por *Pteridium aquilinum* presentó las condiciones biológicas más favorables, mientras que *Andropogon bicornis* evidenció un estado de degradación biológica del suelo. El sistema con *Erythroxylum coca* mostró condiciones intermedias, reflejando el efecto del manejo agrícola reciente sobre la comunidad edáfica.

4.3. Análisis de la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la macrofauna edáfica en los sistemas de uso del suelo del caserío Bijao

El análisis conjunto de las propiedades fisicoquímicas y la macrofauna edáfica permite identificar cómo el estado del suelo influye en la estructura biológica en cada sistema de uso del caserío Bijao. Esta relación resume el nivel de perturbación, recuperación o estabilidad ecológica presente en cada parcela.

4.3.1. Correlación de las propiedades físicas con la macrofauna edáfica

El análisis de correlación evidenció relaciones negativas entre los indicadores de **compactación del suelo** (densidad aparente y resistencia a la penetración) y la **abundancia y diversidad de la macrofauna edáfica** (Tabla 18). En particular, se observaron correlaciones negativas de moderadas a muy fuertes, lo que indica que a medida que aumenta la compactación del suelo, disminuye la presencia y diversidad de organismos edáficos.

Desde el punto de vista edafológico, la compactación reduce la porosidad, limita la aireación y restringe la movilidad de los organismos del suelo, afectando especialmente a grupos excavadores como las lombrices (USDA-NRCS, 2014; Brady & Weil, 2016). Este comportamiento explica la menor abundancia de macrofauna observada en el sistema con *Andropogon bicornis*, donde se registraron los valores más altos de densidad aparente y resistencia a la penetración.

Resultados similares han sido reportados por Royero (2019) y Celis et al. (2020), quienes señalan que los suelos compactados presentan comunidades edáficas simplificadas y dominadas por pocos grupos tolerantes a condiciones adversas.

Tabla 18. Correlación entre propiedades físicas y abundancia/diversidad de la macrofauna.

Propiedad física	Abundancia (A)	Shannon (H')	Simpson (D)	Categoría	
Densidad aparente	-1	-0.8	-0.8	Correlación fuerte	negativa
Resistencia a la penetración	-1	-0.8	-0.8	Correlación fuerte	negativa

Adaptado de Cohen (1988) ; Brady & Weil (2016).

La correlación negativa fuerte entre la densidad aparente y la diversidad biológica evidencia que cada incremento en la compactación reduce la heterogeneidad de la comunidad edáfica, un patrón también documentado por Zhang (2021), quien señala que los suelos densos restringen la actividad de grupos funcionales clave, generando comunidades menos diversas y con menor resiliencia ecológica. Este comportamiento es consistente con la disminución simultánea de los índices de Shannon y Simpson, demostrando que la compactación afecta tanto la riqueza como la equidad de las especies presentes.

El efecto negativo de la resistencia a la penetración refuerza este mismo patrón, ya que la dificultad para excavar y desplazarse reduce la capacidad de los organismos para colonizar nuevos espacios y cumplir funciones ecológicas esenciales. Según Díaz y Cramer (2023), los sistemas con mayor dureza superficial presentan comunidades dominadas por pocas especies tolerantes al estrés físico, mientras que aquellos con menor resistencia albergan mayor variabilidad funcional. Esto explica por qué los sistemas del caserío Bijao con menor compactación mantienen valores superiores de diversidad, confirmando que la integridad física del suelo es un determinante clave del equilibrio biológico.

4.3.2. Correlación de las propiedades químicas con la macrofauna edáfica

Las propiedades químicas del suelo mostraron **correlaciones positivas** con los indicadores biológicos de la macrofauna edáfica. Variables como **fósforo disponible, potasio, calcio intercambiable y capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe)** presentaron asociaciones positivas de moderadas a fuertes con la abundancia y diversidad de la macrofauna (Tabla 19).

Estos resultados indican que suelos con mayor disponibilidad de nutrientes y mejor capacidad de retención catiónica favorecen el desarrollo de comunidades biológicas más diversas y estables. La materia orgánica también mostró una relación positiva con la macrofauna, debido a su rol como fuente de energía y sustrato para organismos detritívoros y microflora asociada.

De acuerdo con Brady y Weil (2016), la fertilidad química del suelo influye directamente en la actividad biológica, ya que mejora las condiciones del hábitat edáfico y estimula procesos como la descomposición y el reciclaje de nutrientes. En este sentido, el sistema con *Erythroxylum coca*, que presentó mejores atributos químicos, mostró también valores intermedios a altos de abundancia y diversidad de macrofauna.

Tabla 19. Correlación entre propiedades químicas y la macrofauna.

Propiedad química	Abundancia (A)	Shannon (H')	Simpson (D)	Categoría
pH	-0.8	-0.6	-0.6	Negativa fuerte, media
MO	-0.6	-0.8	-0.8	Negativa moderada fuerte
N	-0.6	-0.8	-0.8	Negativa moderada fuerte
P	0.4	0.8	0.8	Positiva media fuerte
K	0.8	0.4	0.4	Positiva fuerte media
CICe	-0.8	-0.6	-0.6	Negativa fuerte media
Ca	1	0.8	0.8	Positiva muy fuerte
Mg	0.2	0.4	0.4	Positiva débil media

Hazelton & Murphy (2016) y FAO (2006). pH, MO: materia orgánica; N: nitrógeno; P: fósforo; K: Potasio; CICe: Capacidad de intercambio catiónico efectiva; Ca: Calcio, Mg: magnesio.

La relación entre las propiedades químicas y la macrofauna mostró patrones consistentes con los procesos edáficos descritos por Hazelton y Murphy (2016), quienes señalan que los suelos ácidos y con baja fertilidad limitan la actividad biológica. En Bijao, el pH mantuvo correlaciones negativas importantes con abundancia y diversidad ($r = -0.6$ y -0.8), indicando que la marcada acidez restringe la presencia de grupos funcionales sensibles. La materia orgánica y el nitrógeno también evidenciaron asociaciones negativas moderadas ($r = -0.6$ a -0.8), lo que sugiere que la baja oferta de sustratos y nutrientes condiciona la heterogeneidad biológica observable en los sistemas más degradados.

En contraste, el fósforo y el potasio mostraron correlaciones positivas de magnitud media a fuerte con $r = 0.4-0.8$, lo cual coincide con su papel en la productividad vegetal y la provisión de recursos energéticos para detritívoros y herbívoros, tal como señalan Gasser y Brady (2020) al destacar la importancia de los nutrientes disponibles en la actividad biológica del suelo. La correlación débil observada en el magnesio de $r = 0.2-0.4$ indica un aporte secundario, mientras que la CICe presentó relaciones negativas de $r = -0.6-0.8$, un patrón típico de suelos lixiviados y con baja capacidad retentiva, condiciones que afectan la estabilidad de las comunidades edáficas según Zhang (2021).

4.3.3. Correlación entre las propiedades físicas y químicas

El análisis de correlación entre las propiedades físicas y químicas del suelo evidenció asociaciones negativas entre la **compactación** (densidad aparente y resistencia a la penetración) y variables químicas como la **materia orgánica** y la **CICe**. Esto sugiere que los suelos más compactados tienden a presentar menor contenido de materia orgánica y menor

capacidad de retención de nutrientes.

Estas relaciones reflejan procesos de degradación edáfica, donde la pérdida de estructura y la reducción de la actividad biológica limitan la acumulación de materia orgánica y la estabilidad química del suelo. Lal y Shukla (2004) señalan que estos procesos son comunes en sistemas de uso intensivo o en áreas con vegetación secundaria degradada, como se observó en el sistema dominado por *Andropogon bicornis*.

Tabla 20. Correlación entre propiedades físicas y químicas del suelo.

Propiedades	Spearman (ρ)	Interpretación
Da – pH	0.8	A mayor compactación, mayor acidez
Da – Mo	0.6	Más compactación menos aporte orgánico
CICe – pH	1	Mayor CICe asociada a menor acidez
Ca – K	0.8	Suelos más fértiles acumulan ambos

USDA-NRCS (2014), FAO (2006) y Brady & Weil (2016). Da: densidad aparente; pH, Mo: materia orgánica; K: Potasio; CICe: Capacidad de intercambio catiónico efectiva; Ca: Calcio.

La correlación positiva entre densidad aparente y acidez ($\rho = 0.8$) respalda la idea de que la compactación está asociada a condiciones que restringen la aireación y la descomposición orgánica, lo cual favorece la acumulación de protones y reduce el pH. Este comportamiento coincide con lo descrito por **Brady y Weil (2016)**, quienes indican que la compactación intensifica procesos reductores y limita la mineralización, conduciendo a ambientes edáficos más ácidos y menos favorables para la actividad biológica.

Asimismo, la relación entre densidad aparente y materia orgánica ($\rho = 0.6$) evidencia que el incremento de la compactación disminuye el aporte y renovación de residuos vegetales, afectando la estabilidad de agregados. La asociación positiva entre calcio y potasio ($\rho = 0.8$) indica una acumulación conjunta de cationes base, típica de suelos con mayor fertilidad relativa, lo que coincide con los criterios de interpretación propuestos por USDA-NRCS (2014) para sistemas con mejores reservas de nutrientes intercambiables.

Los resultados de correlación muestran un patrón consistente donde la compactación, la acidez y la baja disponibilidad de nutrientes tienden a restringir la abundancia y diversidad de la macrofauna, mientras que los elementos vinculados a la fertilidad —como fósforo, potasio y calcio— fortalecen la actividad biológica del suelo. Este comportamiento respalda la premisa de que la calidad edáfica refleja de manera directa las condiciones físicas y químicas impuestas por el uso del suelo, afectando la estructura y funcionamiento de las comunidades edáficas, tal como señalan Gasser y Brady (2020) respecto al vínculo entre la

fertilidad, estructura y dinámica biológica en ecosistemas tropicales.

En conjunto, los resultados demuestran que la macrofauna edáfica responde de manera sensible a las condiciones físicas y químicas del suelo. La compactación del suelo afecta negativamente la abundancia y diversidad de la macrofauna, mientras que una mayor disponibilidad de nutrientes y mejores condiciones químicas favorecen comunidades biológicas más diversas. Estas relaciones confirman que la calidad del suelo, entendida como la integración de atributos físicos, químicos y biológicos, varía en función del sistema de uso del suelo en el caserío Bijao.

V. CONCLUSIONES

1. Las propiedades físicas y químicas del suelo presentan variaciones significativas entre los sistemas de uso del suelo del caserío Bijao. El sistema dominado por *Andropogon bicornis* evidenció las condiciones edáficas más desfavorables, caracterizadas por mayor compactación, menor contenido de materia orgánica y baja disponibilidad de nutrientes. En contraste, el sistema con *Erythroxylum coca* mostró mejores atributos químicos del suelo, mientras que *Pteridium aquilinum* presentó condiciones físicas intermedias, reflejando diferentes grados de intervención y recuperación edáfica.
2. La abundancia y diversidad de la macrofauna edáfica varían de manera significativa según el sistema de uso del suelo. El sistema dominado por *Pteridium aquilinum* presentó los mayores valores de abundancia y diversidad, evidenciando condiciones biológicas más favorables, mientras que *Andropogon bicornis* mostró una comunidad edáfica empobrecida, asociada a procesos de degradación del suelo. El sistema con *Erythroxylum coca* presentó valores intermedios, lo que refleja el efecto del manejo agrícola reciente sobre la estructura de la macrofauna.
3. Las propiedades físicas y químicas del suelo se relacionan directamente con la estructura y dinámica de la macrofauna edáfica. La compactación del suelo mostró relaciones negativas con la abundancia y diversidad de la macrofauna, mientras que variables químicas como la materia orgánica, el fósforo disponible, el potasio y la capacidad de intercambio catiónico efectiva presentaron asociaciones positivas con los indicadores biológicos. Estos resultados confirman que la calidad del suelo, como integración de atributos físicos, químicos y biológicos, depende del sistema de uso del suelo.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Implementar prácticas de manejo y conservación del suelo en los sistemas con mayor grado de degradación, especialmente en áreas dominadas por *Andropogon bicornis*, tales como la incorporación de enmiendas orgánicas, cobertura vegetal permanente y prácticas de labranza mínima, con el fin de reducir la compactación, incrementar el contenido de materia orgánica y mejorar la disponibilidad de nutrientes del suelo.
2. Promover la restauración de la biodiversidad del suelo mediante el incremento de la cobertura vegetal y la diversificación de especies, favoreciendo ambientes edáficos que estimulen la recolonización y el desarrollo de la macrofauna edáfica. Asimismo, se recomienda realizar monitoreos periódicos de la macrofauna como indicador biológico de la calidad del suelo y de la efectividad de las prácticas de manejo implementadas.
3. Desarrollar investigaciones futuras con enfoques experimentales o de monitoreo a largo plazo que permitan profundizar en la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la macrofauna edáfica, incorporando análisis multivariados y evaluaciones temporales, con el fin de comprender mejor los procesos de recuperación edáfica y fortalecer la toma de decisiones para el manejo sostenible del suelo en el caserío Bijao.

VII. REFERENCIAS

- Blas, V. (2021). Evaluación de la calidad de suelo mediante indicadores, según el tipo de uso en San Alejandro Irazola - Ucayali. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. Obtenido de <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1999>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
- Cardinale, B., & Hooper, D. (2023). "The Biodiversity-Ecosystem Functioning Relationship: Current State and Future Directions". *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35-39.
- 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
- Chase. (2020). "Ecological Niches: Linking Classical and Contemporary Approaches". *Ecology Letters*.
- Cruz, A. B., Barra, J. E., del Castillo, R. F., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2).
- Diaz, S., & Cramer, W. (2023). "Measuring and Interpreting Alpha Diversity in Ecological Studies". *Ecology Letters*.
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813-831.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2006). *Guidelines for soil description* (4th ed.). FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2004). *Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 16.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *Soil organic carbon: The hidden potential*. FAO.
- Gasser, P., & Brady, N. (2020). *Soil Biology and Biochemistry*, Hättenschwiler y Gasser y "The Nature and Properties of Soils.

- Hansen, M. (2020). "Global land use and land cover change: Recent progress, remaining challenges, and policy options". *Nature Reviews Earth & Environment*, 32-36p.
- Hazelton, P., & Murphy, B. (2016). *Interpreting soil test results: What do all the numbers mean?* CSIRO Publishing.
- Hernández, R., Fernández, C., Baptista, M.P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGRAW-HILL/ Interamericana Editores, S.A. DE C.V. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Hooper, D. (2020). En su artículo "A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem dysfunction". *Nature*, Hooper, 62-65p.
- Jost, L. (2021). "Entropy and Diversity: Theoretical and Practical Approaches to Measure Biodiversity". *Journal of Ecology*, 40-45p.
- Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of soil physics*. CRC Press.
- Ministerio de Agricultura y Riego (MIDAGRI). (2022). Reglamento de Clasificación de Tierras según su Capacidad de Uso Mayor. <https://es.slideshare.net/jovikfernandezgarcia/reglamento-de-tierras-54314188>
- 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>
- Nuñez, J. L., Pérez, J., & Prado, J. V. (2023). Análisis de indicadores e índices de calidad de suelos en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc*, 14(6). doi:<https://doi.org/10.29312/remexca.v14i6.3148>
- Orteja, J. (2018). Determinación de la diversidad de la macrofauna edáfica en sistemas silvopastoriles con aliso (*Alnus acuminata*), acacia (*Acacia melanoxylon*) y un pastizal convencional como indicador biológico. [Tesis para obtener título profesional]. Rep.
- Ramírez, A. R., Guerrero, A., Zavala, J., García, E., Sánchez, R., & Rincón, J. A. (2022). Evaluación de la calidad de suelo de Tabasco, México, con métodos convencionales, espectroscopia de infrarrojo cercano y quimiometría. *Terra Latinoam*, 41, 1-12. doi:<https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1616>
- Reyes, E. B. S., Zabala, S. A. F., & Echeverri, L. F. G. (2018). Índices de calidad del suelo. Una revisión sistemática. *Ecosistemas*, 27(3), 130-139.
- Rojas, M. (2019). Relación de la composición de macroinvertebrados de suelo con la necromasa en bosque de varillal húmedo y seco de la reserva nacional Allpahuayo

- Mishana, Iquitos, Perú 2015. Iquitos-Peru: [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana].
- Sagarpa. (2012). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Subíndice de Uso Sustentable del Suelo – Metodología de Cálculo. FAO y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México.
- Socarrás, A. (2013). Mesofauna edáfica: indicador biológico de la calidad del suelo. *Pastos y forrajes*, 36(1), 5-13.
- Schmind, B. (2023). "Understanding Community Structure: Alpha Diversity and Its Implications for Ecosystem Functioning". 20-25: *Global Ecology and Biogeography*, Mouillot.
- Tuner, B. (2024). "The New Geographies of Land Use in the Anthropocene". *El uso del suelo como un proceso dinámico*, 5.
- United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (2001). *Soil quality test kit guide*. Soil Quality Institute.
- United States Department of Agriculture. (2014). *Soil survey manual*. USDA Natural Resources Conservation Service.
- United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (2014). *Soil chemical testing and interpretation*. USDA–NRCS.
- Valdez, A. (2021). Macrofauna en suelos con *Coffea arabica* L. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. 70 p.: "Café distrito de Moyobamba- provincia Moyobamba. [Tesis de grado]. Universidad nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. 80 p.
- Vliet, J. (2020). "Land use change and biodiversity decline" . *Global Environmental Change*, 2.
- Zheng, e. (2021). Changes of acid and alkaline phosphatase activities in long-term chemical fertilization are driven by the similar soil properties and associated microbial community composition in acidic soil. *European Journal of Soil Biology*, v., 104, 2021, p. 103312. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2021.103312>.

ANEXO

Anexo A. Tabulación de datos

Tabla 21. Valores de la macrofauna en el sistema de uso con *P. aquilinum*.

Grupo Taxonómico (Clase u Orden)	Nombre Común	<i>P. aquilinum</i> .			Total
		10 cm	20 cm	30 cm	
Díptera	Moscas y mosquitos	9	4	1	14
Coleóptera	Escarabajos	15	8	2	25
Araneae	Arañas	6	3	1	10
Haplotaxida	Lombrices de tierra	21	11	2	34
Diplopoda	Milpiés	2	0	0	2
Himenóptera	Hormigas	13	5	2	20
Isópoda	Cochinillas	19	13	3	35
Dictióptera	Cucarachas	2	1	0	3
Hemíptera	Chinches y salta hojas	4	1	0	5
Isóptera	Termitas	17	15	4	36
Orthóptera	Grillos	6	2	0	8
Lepidóptera	Oruga	5	2	1	8
Dermaptera	Tijeretas	3	1	0	4
Paurápodos	NN	1	0	0	1
TOTAL		123	66	16	205

Tabla 22. Valores de la macrofauna en el sistema de uso con *A. bicornis*.

Grupo Taxonómico (Clase u Orden)	Nombre Común	<i>A. bicornis</i>			Total
		10 cm	20 cm	30 cm	
Díptera	Moscas y mosquitos	5	2	0	7
Coleóptera	Escarabajos	4	2	0	6
Araneae	Arañas	1	0	0	1
Haplotaxida	Lombrices de tierra	11	6	1	18
Diplopoda	Milpiés	0	0	0	0
Himenóptera	Hormigas	2	0	0	2

Isópoda	Cochinillas	3	1	0	4
Dictióptera	Cucarachas	2	0	0	2
Hemíptera	Chinches y salta hojas	1	0	0	1
Isóptera	Termitas	8	4	1	13
Orthóptera	Grillos	0	0	0	0
Lepidóptera	Oruga	2	0	0	2
Dermaptera	Tijeretas	0	0	0	0
Paurápodos	NN	0	0	0	0
TOTAL		39	15	2	56

Tabla 23. Valores de la macrofauna en el sistema de uso con *E. coca*.

Grupo Taxonómico (Clase u Orden)	Nombre Común	<i>E. coca</i>			Total
		10 cm	20 cm	30 cm	
Díptera	Moscas y mosquitos	5	2	0	7
Coleóptera	Escarabajos	9	4	1	14
Araneae	Arañas	2	0	0	2
Haplotaxida	Lombrices de tierra	12	7	1	20
Diplopoda	Milpiés	1	0	0	1
Himenóptera	Hormigas	4	2	0	6
Isópoda	Cochinillas	10	4	1	15
Dictióptera	Cucarachas	3	1	0	4
Hemíptera	Chinches y salta hojas	2	1	0	3
Isóptera	Termitas	7	3	0	10
Orthóptera	Grillos	1	0	0	1
Lepidóptera	Oruga	0	0	0	0
Dermaptera	Tijeretas	0	0	0	0
Paurápodos	NN	0	0	0	0
TOTAL		56	24	3	83

