

**MANEJO DEL SUELO Y SU EFECTO EN LA MACROFAUNA EDÁFICA DEL
DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO, COLOMBIA**

**SOIL MANAGEMENT AND ITS EFFECT ON EDAPHIC MACROFAUNA IN THE
DEPARTMENT OF ATLÁNTICO, COLOMBIA.**

Macrofauna y sistemas de manejo

Saudy Royero Mesino^{1,3}, Raúl Zapata Hernández², Rodian Fonseca-Campuzano³
(<https://orcid.org/0000-0003-3475-0830>), Yamileth Domínguez-Haydar^{3,*}
(<https://orcid.org/0000-0002-0774-8391>)

¹ Maestría en Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Agronómicas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

² Escuela Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

³ Grupo GICMARA. Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico, Puerto Colombia, Colombia.

* Autora de contacto: yamilethdominguez@mail.uniatlantico.edu.co

RESUMEN

La ganadería causa degradación de los ecosistemas por el cambio de uso del suelo, deterioro ambiental y reducción de la biodiversidad. Como alternativa se han implementado los sistemas silvopastoriles, que ayudan a evitar la degradación del medio natural y mejorar las características físicas, químicas y biológicas del suelo. La macrofauna edáfica como un elemento integral de los ecosistemas, puede verse afectada por estos cambios e intensificación de las prácticas agrícolas o ganaderas que modifican la estructura de la vegetación y las propiedades del suelo. En este estudio se evaluó el efecto de diferentes sistemas de manejo: ganadería convencional (SC), silvopastoril (SSP) y regeneración natural (SRN) sobre la macrofauna edáfica y en las características del suelo de fincas del departamento del Atlántico, Colombia. Para evaluar la densidad y riqueza de los macroinvertebrados del suelo, se empleó el protocolo de muestreo estándar ISO 26611-5, se tomaron muestras de suelo para determinar las variables físicas y químicas: densidad aparente (D.A), resistencia a la penetración (R.P.), permeabilidad (Perm.) y materia orgánica (M.O.). También se midió La cobertura arbórea (C.A.) en cada punto de muestreo. Los mayores valores de densidad y riqueza de la macrofauna edáfica se registraron en los SSP y SRN. Estos sistemas presentaron mayor porcentaje de C.A., menor compactación del suelo, mayor permeabilidad y acumulación de materia orgánica. En este estudio, se observó como la riqueza taxonómica y densidad de la macrofauna edáfica varió en cada sistema de manejo. A pesar de que no se presentó una correlación significativa entre las variables evaluadas ($R.V. = 0,254$, $p > 0,05$), se observó que las unidades de paisaje con menor deforestación, como los SSP, pueden actuar como sistemas de manejo que ofrecen recursos favorables para el establecimiento de comunidades del suelo con mayor densidad y riqueza taxonómica en comparación con los sistemas convencionales.

PALABRAS CLAVE: cobertura vegetal, agroecosistemas, macroinvertebrados edáficos, variables del suelo.

ABSTRACT

Livestock farming causes ecosystem degradation through land-use change, environmental

deterioration, and biodiversity loss. As an alternative, silvopastoral systems have been implemented to prevent natural resource degradation and improve the physical, chemical, and biological characteristics of the soil. Edaphic macrofauna, as an integral element of ecosystems, can be affected by these changes and by the intensification of agricultural or livestock practices, which modify vegetation structure and soil properties. This study assessed the effect of implementing different management systems (livestock farming (SC), silvopastoral system (SSP), and natural regeneration (SRN)) on the edaphic macrofauna and soil characteristics of farms in the Atlantic department of Colombia. In the study areas, a standard Tropical Soil Biology and Fertility (ISO/TSBF 26611-5) methodology was used to assess the density and richness of soil macroinvertebrates. Soil samples were taken to determine physical and chemical variables: bulk density (D.A.), penetration resistance (R.P.), permeability (Perm.), and organic matter (M.O.). Vegetation cover (C.A.) was also measured at each sampling point. The highest values of edaphic macrofauna density and richness were recorded under SSP and SRN. Such systems showed a higher percentage of C.A., lower soil compaction, greater permeability, and organic matter accumulation. This study evidenced how taxonomic richness and density of the edaphic macrofauna varied under each management system. Although no significant correlation was found between the evaluated variables ($R.V. = 0.254$, $p > 0.05$), landscape units with less deforestation, such as SSPs, can function as management systems that provide favorable resources for the establishment of soil communities with higher density and taxonomic richness compared to conventional systems.

KEYWORDS: vegetation cover, agroecosystems, soil macroinvertebrates, soil variables.

INTRODUCCIÓN

En la región norte de Colombia, los cambios frecuentes de uso del suelo que generan la tala de bosques para la implementación de sistemas ganaderos, es una problemática que ha llevado a que los territorios se conviertan en praderas que exhiben poca cobertura arbórea, erosión, compactación del suelo y baja disponibilidad de nutrientes (Gutiérrez-

Bermúdez et al., 2020). Estos sistemas convencionales de ganadería han generado un impacto ambiental en la estructura del paisaje y con ello la pérdida de biodiversidad (Zuluaga et al., 2011; Zapata y Silva, 2020).

Como estrategia para minimizar los efectos negativos de la actividad ganadera intensiva en algunas zonas del departamento del Atlántico, Colombia, se han implementado sistemas silvopastoriles. Los cuales buscan evitar la degradación del medio natural, conservar la estructura de la vegetación, mejorar las características de los suelos y favorecer la abundancia y diversidad de organismos (Velásquez et al., 2012; Yin et al., 2015, Zapata y Silva, 2020).

Como un elemento integral de los ecosistemas se encuentra la macrofauna edáfica. Estos grupos de organismos contribuyen a la provisión de un amplio rango de servicios ecosistémicos esenciales (Barrios, 2007), como la transformación de la materia orgánica, reciclaje de nutrientes, mantenimiento de la estructura del suelo y la regulación de poblaciones biológicas, por los procesos de digestión e incorporación de materiales orgánicos, formación de estructuras biogénicas y actividades de bioturbación (Cabrera et al., 2021; Lavelle et al., 2022).

La composición taxonómica y abundancia de la macrofauna edáfica está relacionada con la estructura de la vegetación y las propiedades físicas y químicas del suelo, variables que suelen verse afectadas por el grado de perturbación o intensidad en el manejo de la tierra (Bufebo et al., 2021; Vanolli et al., 2023). Los cambios en el uso del suelo y la intensificación de las prácticas agrícolas y ganaderas son factores lo suficientemente graves que pueden influir en las comunidades vegetales y sus porcentajes de cobertura arbórea, probablemente afectando las redes tróficas del suelo y las interacciones entre las comunidades que habitan en él (Vasconcelos et al., 2020; Lavelle et al., 2022; Yin et al., 2022).

Estas complejas interacciones entre los macroinvertebrados del suelo y los factores abióticos y bióticos de los ecosistemas donde habitan; han permitido que los artrópodos del

suelo se propongan como indicadores biológicos en el estudio de sistemas agroforestales (Cabrera et al., 2021; Chamorro-Martínez et al., 2022; Mamabolo et al., 2024)

Lo anterior, lleva a considerar que, en el proceso de establecimiento e implementación de nuevos sistemas agroforestales sustentables en el departamento del Atlántico, es importante conocer la respuesta de los diferentes componentes que integran el sistema. Por lo tanto, en esta investigación se busca evaluar el efecto de la implementación de diferentes sistemas de manejo (sistema convencional de ganadería, silvopastoril, regeneración natural) en la macrofauna edáfica y en las características del suelo de fincas del departamento del Atlántico, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Esta investigación se desarrolló en el departamento del Atlántico, Colombia, en tres fincas ubicadas en los municipios de Baranoa, Piojó y Luruaco. Cada finca presentaba diferentes sistemas de manejo de suelo en su territorio, como son, sistemas convencionales de ganadería (SC), sistemas silvopastoriles (SSP) y sistema de regeneración natural (SRN) (Figura 1). Los lugares seleccionados pertenecen a fincas pilotos del programa de Ganadería Colombiana Sostenible de la Federación Colombiana de Ganaderos (FEDEGAN) y el Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV).

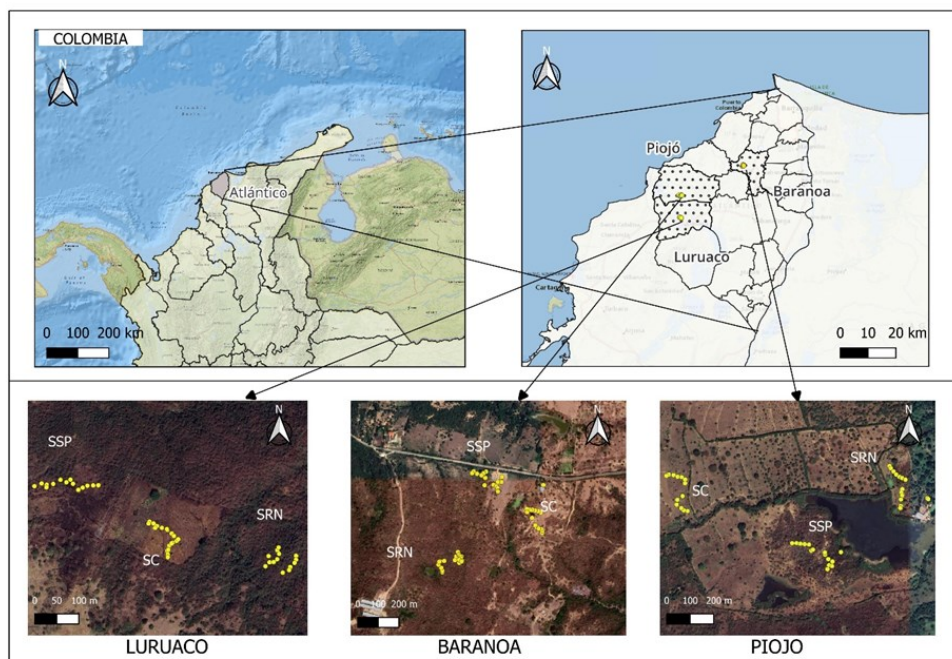


Figura 1. Localización de las áreas de estudio, Baranoa, Piojó y Luruaco en el Departamento del Atlántico, Colombia. SC: Sistema Convencional; SSP: Sistema Silvopastoril; SRN: Sistema Regeneración Natural.

Figure 1. Location of the study areas Baranoa, Piojó, and Luruaco (Department of Atlántico, Colombia). SC: Conventional System; SSP: Silvopastoral System; SRN: Natural Regeneration System.

Los SC de las áreas de estudio han presentado un uso de suelo agrícola y ganadero por más de diez años. Pero a partir de proyectos liderados por el CIPAV, en determinadas zonas de las fincas, se establecieron SSP, que al momento de esta investigación contaban con cerca de dos años de establecimiento. Por su parte, los SRN representaron áreas de referencia en las cuales la intervención humana había estado limitada por alrededor de tres años antes del muestreo realizado.

La ubicación, características y composición vegetal que presentaron los diferentes sistemas de manejo se resumen en la Tabla 1. El sistema convencional en la finca ubicada en Luruaco, en el momento del estudio, contaba con una zona de producción que alternaba la ganadería y la agricultura.

Tabla 1. Localización, características y composición vegetal de los sistemas de manejo en las fincas de estudio. Temp: Temperatura; SC: Sistema Convencional; SSP: Sistema Silvopastoril; SRN: Sistema Regeneración Natural.

Table 1. Location, characteristics, and vegetation composition of the management systems in the study farms. Temp: Temperature; SC: Conventional System; SSP: Silvopastoral System; SRN: Natural Regeneration System.

Área de estudio	Característica		Vegetación en los sistemas de uso del suelo		
Ubicación	Temp.	Topografía	SC	SSP	SRN
Baranoa 10°48'22,62"N 74° 56'57,2"O	27°C	Plana	Gramíneas,	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	<i>P. juliflora</i>
			<i>Samanea saman</i> (Jacq.) Merr.	<i>S. saman</i>	<i>Roseodendron chryseum</i> (S.F.Blake) Miranda
			<i>Prosopis juliflora</i> (Sw.) DC	<i>P. juliflora</i>	<i>Schnella glabra</i> (Jacq.) Dugand
				<i>Pereskia guamacho</i> (F.A.C. Weber)	<i>Machaerium arboreum</i> (Jacq.) Vogel
				<i>Quadrella indica</i> (L.) Iltis & Cornejo	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth
					<i>Vachellia tortuosa</i> (L.) Seigler & Ebinger
Piojó	26°C	Elevacione	Gramíneas	<i>Crescentia</i>	<i>Ceiba pentandra</i>

10°70'68''N		s menores		<i>cujete</i> L.	(L.) Gaertn
75°16'24''O			Cercas vivas de <i>Swinglea</i> sp. (Merr.)	<i>P. juliflora</i> <i>G. sepium</i>	<i>Quercus</i> sp. (L.) <i>Cynophalla flexuosa</i> <i>P. guamacho</i> <i>R. chryseum</i>
			Gramíneas	<i>C. pentandra</i>	<i>Guazuma ulmifolia</i> (Lam.)
Luruaco			<i>Manihot</i>		<i>Senegalia</i>
10°63'43''N	28°C	Elevacione	<i>esculenta</i> (Crantz)	<i>C. cujete</i>	<i>polyphylla</i> (DC.) Britton & Rose
75°15'79''O		s ≤ 400 m	<i>Zea mays</i> (L.)	<i>P. juliflora</i>	<i>P. juliflora</i>
			<i>Cordia dentata</i> (Poir.)	<i>S. glabra</i>	<i>S. glabra</i>
				<i>V. tortuosa</i>	<i>V. tortuosa</i>

Macroinvertebrados del suelo

Los macroinvertebrados (tamaño > 2 mm) se recolectaron empleando la metodología estándar ISO/TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility) (ISO, 2011). En cada sistema de manejo de las fincas (SC, SSP, SRN) se realizó un solo muestreo, donde se recolectaron ocho muestras de suelo, separadas a una distancia de 10 m entre ellas, para un total de 24 muestras de suelo por finca. Cada una consistió en un monolito de 25 x 25 cm a 10 y 20 cm de profundidad del perfil del suelo, que fue almacenado en una bolsa hermética para la posterior revisión y extracción de los organismos presentes en ella. Los organismos (adultos y larvas) encontrados fueron rotulados y almacenados en alcohol al 70%, con excepción de

las lombrices de tierra, que fueron conservadas en formalina al 4% para evitar su desecación. El material recolectado fue examinado en el Museo Entomológico Francisco Luis Gallego de la Universidad Nacional de Colombia. Los ejemplares fueron identificados hasta nivel de orden. Para esto, se tuvieron en cuenta las colecciones entomológicas del museo y las claves taxonómicas propuestas por Barrientos (2004) y Triplehorn y Johnson (2005).

Análisis parámetros del suelo y cobertura arbórea

En los sistemas de manejo de las fincas (SC, SSP, SRN) se llevó a cabo un muestreo donde se recolectaron ocho muestras de suelo para determinar las variables físicas y químicas: densidad aparente (D.A) (método del cilindro biselado), resistencia a la penetración (R.P.) (penetrómetro), permeabilidad del suelo (Perm.) (método de carga constante) y materia orgánica (M.O.) (Método de Walkley Black) (Carter y Gregorich, 2008; Jaramillo, 2011). El procesamiento y análisis de las muestras se desarrolló en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. La cobertura arbórea (C.A.) fue evaluada como el porcentaje de cobertura de dosel en cada punto de muestreo (densiómetro esférico convexo) (Lemmon, 1956).

Análisis estadísticos

Para los grupos taxonómicos encontrados en las áreas de estudio se estimó la densidad de organismos (número de individuos por metro cuadrado (ind. m^{-2})) y la riqueza (número de taxones por sistema). Las variables físicas, químicas y cobertura arbórea fueron comparadas entre los sistemas empleando estadística descriptiva. Se realizó un Análisis de Coinercia (ACoi) para evaluar las covariaciones entre los conjuntos de datos (Dray et al., 2003); la significancia de la matriz de correlación fue evaluada con la prueba de Monte Carlo (Manly, 2007). Estos análisis fueron desarrollados en el programa R (R Core Team, 2018).

RESULTADOS

En los sistemas de estudio la macrofauna edáfica recolectada se distribuyó en tres filos, siete clases y 13 órdenes. De estos individuos, el 86,8% se encontraron en estado

adulto y el 13,1% en estado de larva. Los órdenes predominantes en los sistemas de manejo fueron Hymenoptera, representado en su totalidad por la familia Formicidae y Coleoptera. Mientras que el orden con menor densidad fue Lepidoptera (Tabla 2).

El sistema SSP presentó la mayor densidad de organismos (1340 ind. m⁻²) y los valores más altos de riqueza (12 órdenes). En este sistema los organismos con mayor densidad fueron Hymenoptera, y Crassicitellata. También se destacaron los órdenes Isopoda y Diplopoda.

El sistema SRN registró una densidad de 1088 ind. m⁻² clasificados en 11 órdenes, en este sistema Hymenoptera fue el orden con mayor densidad seguido de Coleóptera. Además, sobresale la presencia de macroinvertebrados de los órdenes Blattodea, Araneae, Pseudoescorpiones e Isopoda.

Por su parte, el SC obtuvo los menores valores en comparación con los sistemas anteriores, registrando 900 ind m⁻² y 9 órdenes, En esta área prevaleció la existencia de organismos pertenecientes a los grupos Coleptera, Hymenoptera, y Crassicitellata.

Tabla 2. Densidad media (ind. m⁻²) y riqueza (número de grupos taxonómicos/sistema) de la macrofauna edáfica por sistema de uso de suelo.

Table 2. Mean density (ind. m⁻²) and richness (number of taxonomic groups/system) of soil macrofauna per soil management system.

Taxon	Sistema Convencional	Sistema Silvopastoril	Sistema Regeneración Natural
ANNELIDA			
Clitellata			
Crassicitellata	37	219	11
ARTHROPODA			
Arachnida			
Araneae	21	32	59

Pseudoscorpionida	0	11	53
Chilopoda			
Scolopendromorpha	0	21	5
Diplopoda			
Polydesmida	16	80	0
Insecta			
Blattodea	16	11	107
Coleoptera	608	294	341
Hemiptera	11	21	5
Hymenoptera	181	528	384
(Formicidae)			
Lepidoptera	5	5	0
Zygentoma	0	0	32
Malacostraca			
Isopoda	5	91	59
MOLLUSCA			
Gastropoda			
Pulmonata	0	27	32
Número de grupos taxonómicos	9	12	11
Densidad	900	1340	1088

En la Figura 2 se exhibe el valor de los parámetros físicos y químicos cuando son comparados entre sistemas. Propiedades como la cobertura arbórea (C.A) y la Permeabilidad (Perm), fueron mayores en los SRN (C.A: 77,1%; Perm: 65,1 cm h⁻¹) y SSP

(C.A: 69,21%; Perm: 62,6 cm h⁻¹), mientras que, en el SC se registraron los menores valores (C.A: 12,6%; Perm: 42,6 cm h⁻¹). La materia orgánica presentó el mayor valor en el SRN (3,8%). Se destaca que la cobertura arbórea presentó valores altos, por encima del 60%, en la mayoría de los puntos de muestreo en los SSP y las áreas de los SRN, mientras que los SC se caracterizaron por una nula o baja existencia de vegetación, salvo algunas áreas con árboles aislados.

A pesar de que el valor promedio de la Densidad aparente (D.A) fue el parámetro con menos cambio entre los sistemas, este tendió a ser mayor en el SC (1,3 g cm⁻³) lo cual se correspondió con el valor más alto en la Resistencia a la penetración (R.P) (2,5 kg cm⁻²).

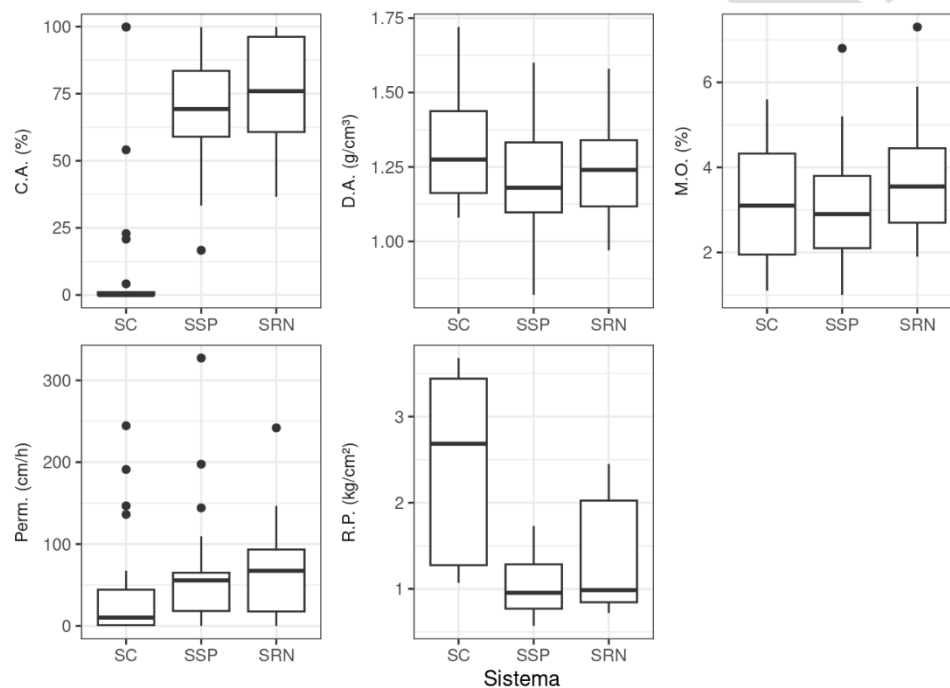


Figura 2. Parámetros físicos, químicos y cobertura arbórea evaluados en los sistemas de manejo del suelo. SC: Sistema Convencional; SRN: Sistema Regeneración Natural; SSP: Sistema Silvopastoril; C.A.: cobertura arbórea; D.A: densidad aparente; M.O: materia orgánica; Perm.: permeabilidad del suelo; R.P.: resistencia a la penetración.

Figure 2. Physical, chemical parameters, and vegetation cover evaluated under each soil management systems. SC: Conventional System; SRN: Natural Regeneration System; SSP: Silvopastoral System; C.A.: vegetation cover; D.A.: bulk density; M.O.: organic matter; Perm.: soil permeability; R.P.: penetration resistance.

La prueba de Montecarlo del análisis de Coinercia entre la macrofauna edáfica y la matriz ambiental (variables D.A., Perm., R.P., M.O. y C.A.) no mostró una correlación fuerte y significativa ($R.V. = 0,254$, $p > 0,05$). Sin embargo, al evaluar la respuesta de estos sistemas individualmente, se observó que solo el SC presentó una correlación alta entre la matriz ambiental y la matriz biológica (órdenes de la macrofauna edáfica), entre tanto, en el SSP y SRN la correlación fue baja (Figura 3).

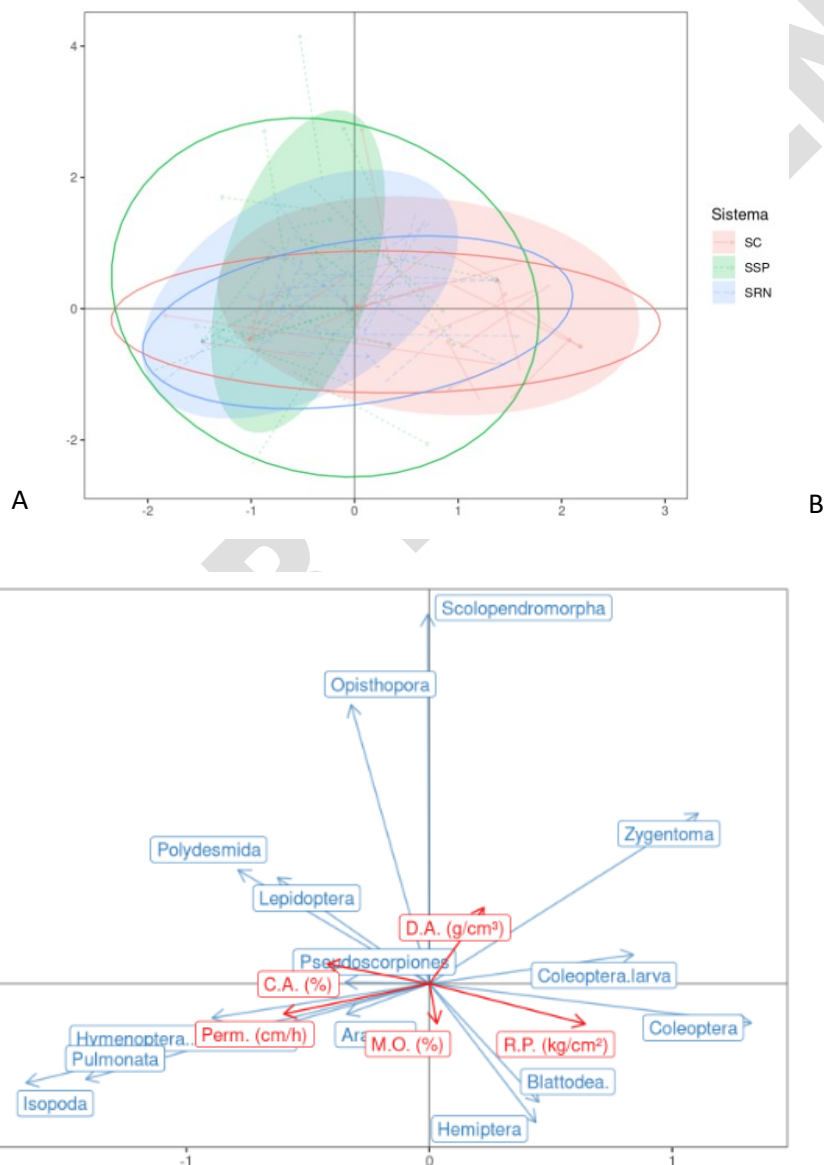


Figura 3. Resultado Análisis de Coinercia A. Elipses de confianza sobre la distribución de los puntos de muestreo según el sistema y comunidad de macrofauna. Las circunferencias con área sombreada representan la matriz ambiental y las contorneadas a la matriz de la comunidad. SC: Sistema Convencional; SSP: Sistema Silvopastoril; SRN: Sistema

Regeneración Natural. B. Ordenación de las variables ambientales (vector rojo) y la densidad media de los taxones (vector azul) registrada en los sistemas de uso de suelo. C.A.: cobertura arbórea; D.A.: densidad aparente; M.O: materia orgánica; Perm.: permeabilidad del suelo; R.P.: resistencia a la penetración.

Figure 3. Results of Coinertia Analysis. A. Confidence ellipses for the distribution of sampling points according to the management system and macrofauna community. Shaded circles represent the environmental matrix and outline circles represent the community matrix. SC: Conventional System; SSP: Silvopastoral System; SRN: Natural Regeneration System. B. Arrangement of environmental variables (red vector) and mean density of taxa (blue vector) recorded under the land use systems. C.A.: vegetation cover; D.A.: bulk density; M.O.: organic matter; Perm.: soil Permeability; R.P.: penetration resistance.

A pesar de la baja correlación en la prueba de Montecarlo, el análisis de Coinercia muestra una tendencia donde la densidad de algunos grupos taxonómicos está asociada con los parámetros físicos y químicos del suelo en los sistemas evaluados (Figura 4B). En el eje uno, Polydesmida y Lepidoptera presentaron una asociación positiva con la cobertura arbórea, pero negativa con la resistencia a la penetración; mientras que Zygentoma estuvo asociado a suelos con mayor densidad aparente y baja permeabilidad. En el segundo eje, también se observaron patrones entre las variables físicas, químicas y biológicas, por ejemplo, los grupos taxonómicos Hymenoptera, Pulmonata e Isopoda están asociados positivamente con la permeabilidad, en cambio la presencia o ausencia de Hemiptera y Blattodea está relacionada con la baja cantidad de materia orgánica. Igualmente, este ordenamiento también evidenció que la densidad de la macrofauna se ve afectada por la resistencia a la penetración de los suelos.

DISCUSIÓN

Los valores de riqueza taxonómica de la macrofauna edáfica encontrados en este trabajo, fueron menores comparados con los registrados en otras zonas de Colombia, los

cuales se encuentran entre 15 y 25 órdenes (Ruiz-Cobo et al., 2010; Suárez et al., 2018; Domínguez-Haydar et al., 2019). Los órdenes encontrados coinciden con grupos de amplia distribución y que han mostrado responder a cambios de usos del suelo o a procesos de intensificación agrícola (Lavelle et al., 2022).

En este estudio tanto los sistemas silvopastoriles como los sistemas de regeneración natural, aunque eran las áreas con mayor cobertura vegetal, se encontraban en etapas iniciales de rehabilitación ecológica, con procesos que no superaban los dos y tres años, respectivamente. Adicionalmente, estas áreas carecían de zonas boscosas circundantes en buen estado, las cuales son esenciales como hábitats fuente para promover la conectividad del paisaje y facilitar la colonización de los sistemas por parte de la macrofauna. La recuperación de los organismos del suelo en zonas que han sufrido diferentes niveles de intervención va a depender de la colonización gradual de los individuos y su estrategia de dispersión a través de corredores de vegetación desde áreas más conservadas que funcionan como reservorio natural (Dominguez-Haydar y Ambrecht, 2011; Dominguez-Haydar et al., 2019).

La riqueza taxonómica, densidad y composición de la macrofauna fueron más similares entre los SSP y SRN en comparación con el SC, caracterizado por una mayor intensificación del uso del suelo. Los sistemas ganaderos presentan una disminución en las poblaciones de los organismos, en su mayoría, aquellos que no poseen la habilidad de adaptarse a condiciones ambientales más agrestes como menor cobertura arbórea, humedad, materia orgánica y mayor compactación del suelo (Da Rosa et al., 2015; Suárez et al., 2018).

En cuanto a la composición taxonómica, en todos los sistemas de uso de suelo estudiados, Coleoptera e Hymenoptera (Formicidae) fueron los órdenes de mayor representación, ya que son grupos diversos y abundantes, con adaptaciones morfológicas y etológicas que les permiten colonizar hábitats diversos aprovechando un amplio rango de recursos (Deloya y Ordóñez-Resendiz, 2008; Coleman y Wall, 2015). La dominancia de estos taxones en diferentes sistemas de uso del suelo (agrícolas, ganaderos, de minería y

forestales) también ha sido reportada en otros estudios realizados a nivel mundial (Vasconcellos et al.; 2013; Sanabria et al.; 2016; Gholami et al.; 2017; Lavelle et al., 2021; Cabrera et al., 2022).

La heterogeneidad del hábitat, la variabilidad de plantas y cobertura arbórea en los SRN y SSP, amplían la disponibilidad de recursos alimentarios y microhábitats para la comunidad de macroinvertebrados del suelo, permitiendo la presencia de depredadores como los taxones Araneae, Pseudoscorpionida y Scolopendromorpha en densidades mayores en comparación con los SC, donde tuvieron baja o nula representación. Estos organismos están relacionados generalmente con sitios diversos y sistemas más estables con menor efecto antrópico (Ruiz-Cobo *et al.*, 2010; Vasconcellos et al., 2013). Otros organismos epigeos con igual función detritívora, como Isopoda y Pulmonata, se registraron en mayor densidad en los SSP y SRN. Estos dos taxones son abundantes y diversos en lugares que poseen una incorporación continua de hojarasca, cobertura arbórea, bajas temperaturas y alta humedad en el suelo, ayudando al fraccionamiento de la hojarasca, favoreciendo los procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica (Zerbino et al., 2008; Cabrera et al., 2011).

La densidad de organismos en el SC, como Coleóptera, Hymenoptera (Formicidae), Isoptera y Crassiditellata, evidencia que algunas especies son más generalistas y solo necesitan condiciones físicamente estables para habitar un lugar (Lavelle et al., 2021). A pesar de que el resultado del ACoi no mostró una correlación fuerte y significativa entre la macrofauna edáfica y las variables ambientales evaluadas, se observan algunas tendencias entre los parámetros que permiten la separación y caracterización de los sitios de estudio. En el SC los menores valores de densidad de individuos y riqueza registrados pueden estar respondiendo a la poca cobertura arbórea, suelos descubiertos y con mayor compactación de este sistema, que pueden afectar la cantidad de recursos alimenticios, sitios de nidificación y forrajeo para los diferentes organismos del suelo. Generalmente, el manejo intensivo de estos sitios resulta en la simplificación excesiva de las comunidades biológicas, introducción de insumos químicos (fertilizantes y pesticidas) y reducción de la

heterogeneidad del ecosistema, afectando potencialmente la biodiversidad (Rivera et al., 2013; Cabrera et al., 2022).

Los mayores valores de D.A. y R.P. en el SC, son indicadores de la compactación del suelo, característica asociada a factores como el pisoteo constante del ganado, la poca cantidad de plantas asociadas al sistema o el deterioro de la capa orgánica (Roncallo et al., 2012; Cabrera et al., 2022). No obstante, el nivel de compactación del suelo registrado en los sistemas de estudio también puede depender de atributos internos como la textura, contenido de materia orgánica y humedad; que cambian según los tipos de suelos, manejo de cultivos y condiciones climáticas (Håkansson y Lipiec, 2000). Como resultado de la compactación del suelo se puede evidenciar la disminución en la infiltración del agua (permeabilidad del suelo) en el SC, debido a que el pisoteo excesivo de los animales implica una reducción en la estabilidad de los agregados órgano-minerales y en la porosidad del suelo (Cabrera et al., 2022).

Por su parte, en los SSP y SRN de las fincas al incorporar árboles y arbustos como *Leucaena* sp., *P. juliflora*, *C. cujete*, *C. pentandra*, *R. chryseum*, entre otros, se aumenta el porcentaje de C.A., lo cual se ve reflejado en los mayores valores de densidad de individuos y riqueza taxonómica de estos sistemas. Así mismo, la presencia de vegetación ayuda a promover la rehabilitación de la producción ganadera y fundamentalmente la conservación de la biodiversidad en estos paisajes agrícolas (Murgueitio et al., 2011).

Los SSP y SRN además de ser caracterizados por los valores más altos de C.A. y Perm., también lo fueron por el porcentaje de M.O. Este parámetro en las áreas de estudio pudo estar favorecido por la presencia de especies arbóreas y arbustivas que protegen al suelo y a su vez adicionan hojarasca, raíces y tallos que pueden modificar los niveles de M.O. y la disponibilidad de nutrientes (Sadeghian et al., 1999; Paudel et al., 2012). Por su parte, los valores de M.O. en el SC pudieron deberse por la entrada adicional de nutrientes al suelo debido a las excretas del ganado.

No obstante, la variable M.O. en el suelo también puede estar influenciada por factores adicionales a la vegetación como el material parental del suelo, las prácticas de

manejo, el clima, la acidez y biota, así como las relaciones entre ellos (Sadeghian et al., 1999; Handayani y Prawito, 2013).

CONCLUSIONES

En esta investigación, se observa como la riqueza taxonómica y densidad de la macrofauna edáfica varió en cada sistema de manejo estudiado. Aunque no se presentó una correlación significativa entre las variables evaluadas, se evidencia que las unidades de paisaje menos deforestadas y con mayor porcentaje de cobertura arbórea, los SSP y SRN, favorecieron el establecimiento de la macrofauna. Los organismos del suelo pudieron verse beneficiados por la producción de hojarasca por parte de las especies arbóreas, que constituye una fuente de hábitat, alimentación y protección contra cambios de temperatura y humedad del suelo. Así mismo, estos sistemas de manejo se caracterizaron por sus valores de materia orgánica y permeabilidad, variables que se consideran importantes en la calidad del suelo. Este estudio respalda la implementación de estrategias como los sistemas silvopastoriles que mejoran la gestión de los agroecosistemas y contribuyen con la conservación de la biodiversidad. Se recomienda incrementar el esfuerzo de muestreo y alcanzar una mayor resolución taxonómica para lograr un análisis más detallado de los organismos y su relación con el uso del suelo y la cobertura arbórea.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Atlántico por el financiamiento de la investigación en el marco de la convocatoria Impacto Caribe de la Vicerrectoría de Extensión y Proyección Social. Así como a la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y a los propietarios de las fincas por permitirnos el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

Barrientos, J. A. (2004). *Curso Práctico de Entomología*. Manual de la Universidad Autónoma de Barcelona.

- Barrios, E. (2007). Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics*, 64(2), 269–285. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004>
- Bufebo, B., Elias, E. y Getu, E. (2021). Abundance and diversity of soil invertebrate macrofauna in different land uses at Shenkolla watershed, South Central Ethiopia. *The Journal of Basic and Applied Zoology* 82(11), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s41936-021-00206-1>.
- Cabrera, G., Robaina, N. y Ponce de León, D. (2011). Functional composition of soil macrofauna in four land uses of Artemisa and Mayabeque provinces, Cuba. *Pastos y Forrajes*, 34(3), 331–346. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942011000300008&lng=es&tlng=es.
- Cabrera, G., Sánchez, J. A. y De León, D. P. (2021). Macrofauna edáfica: composición, variación y utilización como bioindicador según el impacto del uso y calidad del suelo. *Acta Botánica Cubana*, 221, 1-21. <https://cu-id.com/2402/v221e01>
- Caicedo-Rosero, D., Benavides-Rosales, H., Carvajal-Pérez, L. y Ortega-Hernández, J. (2017). Población de macrofauna en sistemas silvopastoriles dedicados a la producción lechera: análisis preliminar. *La Granja*, 27(1), 77-85. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.06>
- Carter, M.R., y Gregorich, E.G. (Eds.) (2007). *Soil Sampling and Methods of Analysis* (2ª ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420005271>
- Coleman, D. C. y Wall, D. H. (2015). Soil Fauna: Occurrence, Biodiversity, and Roles in Ecosystem Function (Fourth Edition). In P. A. Eldor (Ed.), *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (111-149). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415955-6.00005-0>
- Da Rosa, M. G., Filho, O. K., Bartz, M. L. C., Mafra, Á. L., De Sousa, J. P. F. A. y Baretta, D. (2015). Macrofauna edáfica e atributos físicos e químicos em sistemas de uso do solo no planalto catarinense. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 39(6), 1544–1553. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150033>

- Deloya, C. y Ordóñez-Resendiz, M. (2008). Escarabajos (Insecta: Coleoptera). In R. H. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina y K. Mehlreter (Eds.), *Agroecosistemas cafeteros de Veracruz. Biodiversidad, manejo y conservación* (pp. 123–134). Instituto de Ecología A.C. (INECOL) e Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMAR- NAT).
https://www.researchgate.net/publication/270648449_Agroecosistemas_cafetaleros_de_Veracruz_biodiversidad_manejo_y_conservacion
- Dominguez-Haydar, Y. y Armbrrecht, I. (2011). Response of Ants and Their Seed Removal in Rehabilitation Areas and Forests at El Cerrejón Coal Mine in Colombia. *Restoration Ecology*, 19(201), 178–184. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00735.x>
- Dominguez-Haydar, Y., Velásquez, E., Carmona, J., Lavelle, P., Chavez, L. F. y Jiménez, J. J. (2019). Evaluation of reclamation success in an open-pit coal mine using integrated soil physical, chemical and biological quality indicators. *Ecological Indicators*, 103, 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.015>
- Dray, S., Chessel, D. y Thioulouse, J. (2003). Co-inertia analysis and the linking of ecological data tables. *Ecology*, 84(11), 3078–3089. <https://doi.org/10.1890/03-0178>
- Gholami, S., Sheikhmohamadi, B. y Sayad, E. (2017). Spatial relationship between soil macrofauna biodiversity and trees in Zagros forests, Iran. *Catena*, 159, 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.021>
- Gutiérrez-Bermúdez, C., Mendieta-Araica, B. y Noguera-Talavera, A (2020). Composición trófica de la macrofauna edáfica en sistemas ganaderos en el Corredor Seco de Nicaragua. *Pastos y Forrajes*, 43(1), 32-40.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942020000100032&lng=es&tlng=es#aff3
- Håkansson, I. y Lipiec, J. (2000). A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research* 53(2), 71-85.
[https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00095-1)
- Handayani, I. P. y Prawito, P. (2013). Soil structure and Carbon Pools in Response to Common Tropical Agroecosystems. *Journal of Tropical Soils*, 18(2), 105–113.

<https://www.neliti.com/publications/133977/soil-structure-and-carbon-pools-in-response-to-common-tropical-agroecosystems#cite>

- ISO. (2011). ISO 23611–5. Soil quality-sampling of soil invertebrates-Part 5. Sampling and extraction of soil macro-invertebrates. International Organization for Standardization.
- Jaramillo, D. (2011). *El suelo: Origen, propiedades, espacialidad* (2ª ed.). Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Jiménez, J. J., Decaëns, T. y Lavelle, P. (2008). C and N concentrations in biogenic structures of a soil-feeding termite and a fungus-growing ant in the Colombian savannas. *Applied Soil Ecology*, 40(1), 120–128.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.03.009>
- Lavelle, P., Duran, E., Rousseau, L. y Sanabria, C. (2021). Soil macroinvertebrate communities as indicators of ecosystem services in American tropical environments. *Biodiversity Online J.* 1(4), 1-4. DOI: [10.31031/BOJ.2021.01.000516](https://doi.org/10.31031/BOJ.2021.01.000516)
- Lavelle, P., Mathieu, J., Spain, A., Brown, G., Fragoso, C., Lapied, E., Aquino, A., Barois, I., Barrios, E., Barros, M., Bedano, J., Blanchart, E., Caulfield, M., Chagueza, Y., Dai, J., Decaëns, T., Domínguez, A., Domínguez-Haydar, Y., Feijoo, A., Folgarait, P., ... Zhang, Chi. (2022). Soil macroinvertebrate communities: A world-wide assessment. *Global Ecology and Biogeography* 31(7), 1261-1276.
<https://doi.org/10.1111/geb.13492>
- Lemmon, P.E. (1956). A spherical densiometer for estimating forest overstory density. *Forest Science*. 2, 314–320.
- Mamabolo, E., Pryke, J. S. y Gaigher, R. (2024). Soil macrofauna are important bioindicators of soil quality in agroecosystems under different management. *Ecological Indicators* 167, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112723>
- Manly, B.F.J. (2007). *Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology* (3ª ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781315273075>
- Martínez, J., Cajas, Y. S., León, J. D. y Osorio, N. W. (2014). Silvopastoral systems enhance soil quality in grasslands of Colombia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014,

1-8. <https://doi.org/10.1155/2014/359736>

Medina, M. G., García, D. E., Moratinos, P., Clavero, T. y Iglesias, J. M. (2011). Macrofauna edáfica en sistemas silvopastoriles con *Morus alba*, *Leucaena leucophala* y pastos. *Zootecnia Tropical*, 29(3), 301-311.

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692011000300006&lng=es&tlng=es.

Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A. y Solorio, B. (2011). Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1654–1663. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.027>

Paudel, B. R., Udawatta, R. P., Kremer, R. J. y Anderson, S. H. (2012). Soil quality indicator responses to row crop, grazed pasture, and agroforestry buffer management. *Agroforestry Systems*, 84, 311–323. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9454-8>

R Core Team. (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>

Rivera, L. F., Armbrrecht, I. y Calle, Z. (2013). Silvopastoral systems and ant diversity conservation in a cattle-dominated landscape of the Colombian Andes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 181, 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.011>

Roncallo, B., Murillo, J., Bonilla, R. y Barros, J. (2012). Evolution of soil properties in agroforestry arrangement based on red Ceiba (*Pachira quinata* (Jacq.) W.S. Alverson). *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 13(2), 167–178. <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v13n2/v13n2a07.pdf>

Ruiz-Cobo, D. H., Feijoo, A. y Rodríguez, C. (2010). Soil macro-invertebrate communities in different land use systems in the Otún River Valley, Colombia. *Acta Zoológica Mexicana*, 2, 165–178. <https://www.scielo.org.mx/pdf/azm/v26nspe2/v26nspe2a12.pdf>

Sadeghian, S., Rivera, J., y Gómez, M. (1999). Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. In

- M. Sánchez y M. Rosales (Eds.), *Agroforestería para la Producción Animal en América Latina* (pp. 123-142). IT: FAO.
- Sanabria, C., Dubs, F., Lavelle, P., Fonte, S. J. y Barot, S. (2016). Influence of regions, land uses and soil properties on termite and ant communities in agricultural landscapes of the Colombian Llanos. *European Journal of Soil Biology*, 74, 81–92.
<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.03.008>
- Suárez, L. R., Tatiana, Y., Josa, P., Judith, E., Samboni, A., Dayana, K. y Salazar, S. (2018). Soil macrofauna under different land uses in the Colombian Amazon. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(12), 1383–1391. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001200011>
- Triplehorn, C. A. y Johnson, N.F. (2005). Borror and DeLong's, Introduction to the study of insects (7th ed.). Thomson Brooks.
- Vanolli, B. S., Pereira, A., Franco, A. y Cherubin, M. (2023). Edaphic and epigeic macrofauna responses to land use change in Brazil. *European Journal of Soil Biology*, 117, 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2023.103514>
- Vasconcellos, R. L. F., Segat, J. C., Bonfim, J. A., Baretta, D. y Cardoso, E. J. B. N. (2013). Soil macrofauna as an indicator of soil quality in an undisturbed riparian forest and recovering sites of different ages. *European Journal of Soil Biology*, 58, 105–112.
<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2013.07.001>
- Vasconcelos, W. L. F., Rodrigues, D. M., Carvalho, R. O. y Alfaia, S. S. (2020). Diversity and abundance of soil macrofauna in three land use systems in eastern Amazonia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 46, 1-15.
<https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190136>
- Velásquez, E., Fonte, S. J., Barot, S., Grimaldi, M., Desjardins, T. y Lavelle, P. (2012). Soil macrofauna-mediated impacts of plant species composition on soil functioning in Amazonian pastures. *Applied Soil Ecology*, 56, 43–50.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.01.008>
- Yin, X., Qiu, L., Tu, Y., Tao, Y., An, J., Xin, W. y Jiang, Y. (2015). Characteristics of soil

macrofauna community and CCA analysis between soil macrofauna and soil properties in the wetlands of the Lhasa River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 35(6), 210–215. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2015.09.008>

Yin, R., Kardol, P., Eisenhauer, N. y Schädler, M. (2022). Land-use intensification reduces soil macrofauna biomass at the community but not individual level, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 337, 15-28 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108079>

Zerbino, S., Altier, N., Morón, A. y Rodríguez, C. (2008). Evaluación de la macrofauna del suelo en sistemas de producción ensiembra directa y con pastoreo. *Agrociencia*, 12(1), 44–55. <https://agrocienciauruguay.uy/index.php/agrociencia/article/view/744/777>

Zapata Cadavid A. y Silva Tapasco B.E. (2020). *Sistemas silvopastoriles: aspectos teóricos y prácticos* (2ª ed.). CIPAV. <https://cipav.org.co/wp-content/uploads/2020/08/sistemas-silvopastoriles-aspectos-teoricos-y-practicos.pdf>

Zuluaga, A. F., Giraldo, C., Chará, J. y CIPAV. (2011). *Servicios ambientales que proveen los Sistemas silvopastoriles y los beneficios para la biodiversidad*. Manual 4, Proyecto Ganadería Colombiana Sostenible. https://digital-library-drupal.s3.sa-east-1.amazonaws.com/library-content/2.%20Servicios%20Ambientales%20en%20ganaderia.pdf?F4s7uIKefNeC_W5JEAH_5Ssr6SXrNnuV=