



IMPORTANCIA DE LA BIOTA EDÁFICA PARA LA PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS

IMPORTANCE OF SOIL BIOTA FOR PRODUCTIVITY IN AGRO-ECOSYSTEMS

¹ Sergio Andrés Orduz Tovar

² Leidy Machado Cuéllar

³ Leonardo Rodríguez Suárez

Recibido: 8 de junio de 2020.

Aceptado: 29 de noviembre de 2020.

Resumen

El suelo representa una importante reserva de diversidad biológica que sustenta diversas funciones clave para la provisión de servicios ecosistémicos edáficos. El conocimiento acerca de la diversidad de la biota edáfica permanece en su mayoría desconocido, precisamente el objetivo de este trabajo es abordar el conocimiento actual sobre el papel de la biota edáfica en el mantenimiento de los agroecosistemas y los servicios ecosistémicos. Por lo anterior, se consolidó información sobre (I) la biodiversidad del suelo, (II) la relación de los grupos funcionales edáficos con los procesos de resiliencia antrópica, (III) el impacto del uso de suelo y el manejo agrícola en la biota del suelo, y (IV) el potencial de la biota del suelo en la productividad de los agroecosistemas. Se identificaron importantes interacciones entre diferentes grupos biológicos que participan en cada uno de los grupos funcionales consultados. También se identificó que el impacto de las actividades antropogénicas en la biodiversidad edáfica afecta el comportamiento biológico del suelo y, por lo tanto, son importantes las prácticas de manejo que puedan optimizar la productividad de los agroecosistemas.

1 Colombiano. Magister en Ingeniería y Gestión Ambiental/ Magister en Ciencias Básicas. Centro de Formación Agroindustrial, Regional Huila, SENA, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-2856-0811>. sorduz@sena.edu.co/saorduz6@misena.edu.co

2 Colombiana. Magister en Agroforestería. Centro de Formación Agroindustrial, SENA, Huila, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-9276-5008>. lmachado@sena.edu.co

3 Colombiano. Magister en Agroforestería. Centro de Formación Agroindustrial, SENA, Huila, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-8560-5495>. lrodriguezua@sena.edu.co

Palabras claves: biodiversidad del suelo, servicios ecosistémicos, grupos funcionales, prácticas de manejo.

Abstract

Soil is an important reservoir of biodiversity which supports various functions for the provision of edaphic ecosystem services. The diversity of the edaphic biota remains largely unknown, the goal of this work is to approach current studies about the role of the edaphic biota in the maintenance of agroecosystems and ecosystem services. Due to the above, information was gathered on (I) soil biodiversity (II) relationship of the edaphic functional groups for anthropic resilience processes (III) impact of land use and agricultural management on soil biota and (IV) the potential of soil biota on the productivity of agroecosystems. Significant interactions were identified between different biological groups participating in each of the functional groups consulted. Likewise, it was identified that anthropogenic activities on soil biodiversity affect the biological behavior of the soil. It is therefore important to implement management practices that can optimize the productivity of agroecosystems.

Keywords: soil biodiversity, ecosystem services, functional groups, management practices.

Introducción

En el suelo se encuentran distintos microhábitats, con una variedad de organismos establecidos por las características fisicoquímicas, la estructura del suelo, la porosidad, la infiltración y la distribución de las raíces (Ferris & Tuomisto, 2015). Además, los organismos que el suelo alberga apoyan y regulan una amplia gama de servicios ecosistémicos indispensables para

el ambiente (Mujtar *et al.*, 2019). La diversidad biológica edáfica en términos de riqueza taxonómica, estrategias de vida y roles funcionales (Orgiazzi *et al.*, 2016), permanece en su mayoría inexplorada, en el caso de la biota fúngica se desconoce más del 95% (Geisen *et al.*, 2019). Entre las funciones que desempeña la biota del suelo (microfauna, mesofauna y macrofauna) destacan la descomposición de la materia orgánica, el ciclaje de nutrientes, el mantenimiento de la estructura del suelo, la regulación de plagas y la inmovilización de metales pesados, funciones que se incluyen en la evaluación de la salud del suelo (Barrios *et al.*, 2012).

Los tipos de intervenciones antropogénicas realizadas en el suelo como la mecanización, el uso de agroquímicos y el manejo de tipos de coberturas generan alteraciones en la biota edáfica, por lo tanto, la estructura edafoclimática se modifica y los grupos biológicos, específicamente aquellos con funciones especiales, son susceptibles a estos cambios (Silva *et al.*, 2019). Así mismo, la reducción de algunos de estos grupos y un manejo no adecuado de los suelos generan degradación, pérdida de fertilidad, disminución de aireación e infiltración del agua, y pérdida de producción en los ecosistemas. Al mismo tiempo, las decisiones tomadas de forma inadecuada durante el manejo de los agroecosistemas conllevan a la reducción de los servicios que prestan y causan daños permanentes a los lugares de interés biológico y productivo (Busari, Kukal, Kaur, Bhatt & Dulazi, 2015).

La biota del suelo se modifica de manera positiva o negativa de forma rápida según los cambios de uso del agroecosistema; lo que influye en la participación en procesos importantes como la formación de humus, la descomposición de la materia orgánica o la mineralización de nutrientes (Giagnoni *et al.*, 2019). Por otra parte, precisamente la biota se considera un indicador de



la salud del suelo, sin embargo, se enfatiza en los grandes organismos porque tienden a variar menos temporalmente en comparación con la diversidad de los microorganismos del suelo y su facilidad en el análisis (Marshall & Lynch, 2020).

En este contexto, esta revisión de literatura pretende abordar el conocimiento actual sobre el papel de la biota edáfica en el mantenimiento de los agroecosistemas y los servicios ecosistémicos, definidos como esenciales por las acciones biológicas para el desarrollo de la vida en la tierra. Por lo tanto, se consolida la información sobre: (I) la biodiversidad del suelo, (II) la relación de los grupos funcionales edáficos con los procesos de resiliencia antrópica, (III) el impacto del uso de suelo y el manejo agrícola en la biota del suelo, y (IV) el potencial de la biota del suelo sobre la productividad de los agroecosistemas.

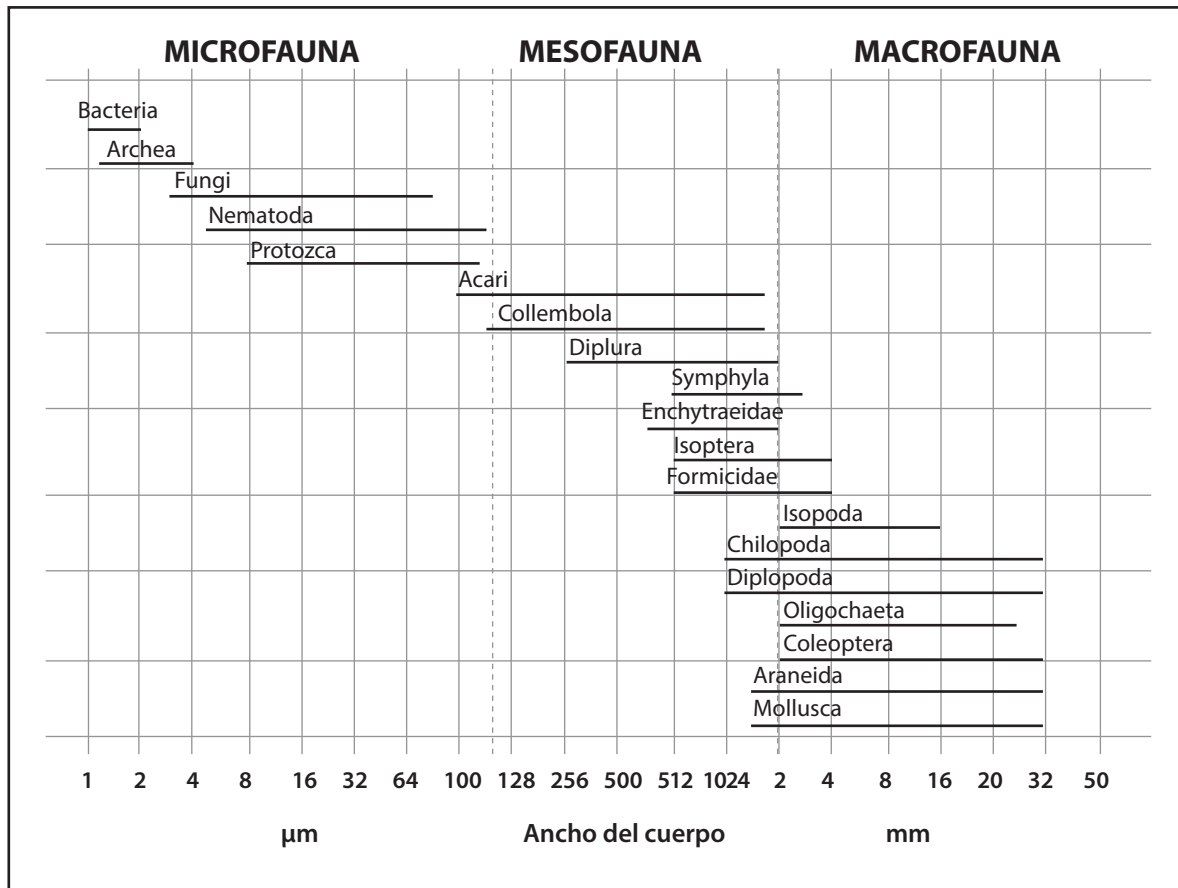
1. Biota Edáfica

El suelo sustenta comunidades muy abundantes y diversas de organismos que presentan amplias características de forma de vida y rasgos funcionales, incluso difieren en tamaño desde

unas pocas micras a varios milímetros (Nielsen *et al.* 2019). Se estima que un solo gramo de suelo puede contener miles de especies de bacterias, una amplia gama de ácaros, nematodos y artrópodos, y hongos que puede extender sus hifas hasta 100 m de distancia (Ritz & Young, 2004; Orghiazzi *et al.*, 2016).

Para explorar este complejo edáfico, se clasificó la biota en base a su tamaño corporal, siendo tres grandes grupos (Barrios, 2007): i) microfauna (bacterias, archaea, hongos, nematodos y protozoa) comprende organismos de 1 a 120 μm , ii) mesofauna (collembola, ácaro, entre otros) de 80 μm a 2 mm, y iii) macrofauna (lombrices, hormigas y termitas) de 2 mm a 20 mm (figura 1). Según Nielsen y otros (2019) esta agrupación permite a su vez identificar las escalas espaciales en las que actúan la biota edáfica, la microfauna es esencialmente organismos (semi) acuáticos y requieren un poro lleno de agua o una película de agua sobre los agregados del suelo para alimentarse y moverse, mientras que la mesofauna se limita generalmente a los poros llenos de aire. La macrofauna, en cambio, suele modificar el entorno para crear su propio espacio vital.

Figura 1. Clasificación esquemática de la Biota Edáfica basada en el tamaño del cuerpo



Nota. La microfauna se compone de organismos de 1 a 120 µm, la mesofauna de 80 µm a 2 mm macrofauna de 2 a 20 mm.

Sin embargo, el conocimiento de la diversidad de organismos del suelo es limitado en comparación con la biodiversidad de plantas vasculares, como se muestra en la tabla 1. Esta situación es aún más crítica a medida que disminuye el tamaño de los organismos, siendo estos los más diversos como es el caso de los hongos y las bacterias que, además, solo se han descrito el 1,9% y 1,5% de las especies como se muestra en la tabla 1, respectivamente, sin tener en cuenta que por cada zona de vida, la variabilidad en la diversidad o abundancia de especies puede ser diferente y solo el 2% de las especies bacterianas

son similares entre los distintos suelos. Precisamente uno de los factores limitantes es la disponibilidad de técnicas que permitan el estudio de la diversidad edáfica. Actualmente los métodos disponibles para estudiarla se pueden dividir en tres categorías: i) morfológicos, ii) bioquímicos, y iii) moleculares, estos últimos son los que proporcionan más información de la existencia de microorganismos, pero debe ser complementado con otras técnicas para determinar la funcionalidad real de los microorganismos (Geisen *et al.*, 2019).



Tabla 1. Número conocido y estimado de especies de organismos del suelo y de plantas vasculares organizadas según el tamaño

Grupo	Especies Conocidas	Especies Estimadas	Especies Descritas (%)
Plantas vasculares	350700	400000	88%
Macrofauna			
Oligochaeta	7000	30,000	23%
Formicidae	14000	25000-30000	60-50 %
Isoptera	2700	3100	87%
Mesofauna			
Acari	40000	100000	55%
Collembola	8500	50,000	17%
Microfauna			
Protozoa	21000	7000000 - 70000000	0,03 - 0,3 %
Nematoda	20000 - 25000	1000000 - 10000000	0,2 - 2,5 %
Fungi	97000	1500000 - 5100000	1,9 - 6,5 %
Bacteria	15000	> 1000000	< 1,5 %

Nota. Organización de grupos de plantas vasculares, macrofauna, mesofauna y microfauna según especies conocidas, especies estimadas y especies descritas (%).

Uno de los principales desafíos para la conservación de la biodiversidad del suelo o su potencial uso en función de los requerimientos productivos es la falta de información y certeza sobre su importancia y la necesidad de enfoques metodológicos integradores, que permitan aumentar detalladamente la información e identificación de la totalidad, o si es posible, de la mayoría de las especies que habitan esta matriz terrestre (Barrios, Shepherd & Sinclair, 2015).

2. Grupos Funcionales

Los rasgos funcionales se refieren a las características metabólicas, fisiológicas o morfológicas de un organismo que cumplen un rol para su soporte vital. Por lo tanto, los grupos funcionales se refieren al conjunto de grupos de especies que juegan un papel para el comportamiento ecosistémico del sitio de interés, ya sea una re-

serva natural o un cultivo agrícola, estos grupos pueden estar conformados por más de una familia biológica, y es precisamente esa interacción la que permite el soporte funcional en el servicio ecosistémico de interés (Swift, Bignell, Moreira & Huising, 2012).

La biota edáfica se agrupa de forma natural en cuatro grupos funcionales según su contribución dominante a los principales procesos del suelo y servicios ecosistémicos. En este sentido, se clasifica en: i) descomponedores, ii) transformadores de nutrientes, iii) ingenieros del ecosistema, y iv) biocontroladores (Kibblewhite, Ritz & Swift, 2008). Así mismo, estos grupos funcionales apoyan la prestación de diferentes servicios del ecosistema como la transformación del carbono, el ciclaje de nutrientes, el mantenimiento de la estructura del suelo y la regulación de poblaciones (Barrios et al., 2012). Sin embargo, debe considerarse con cuidado esta clasificación, ya que

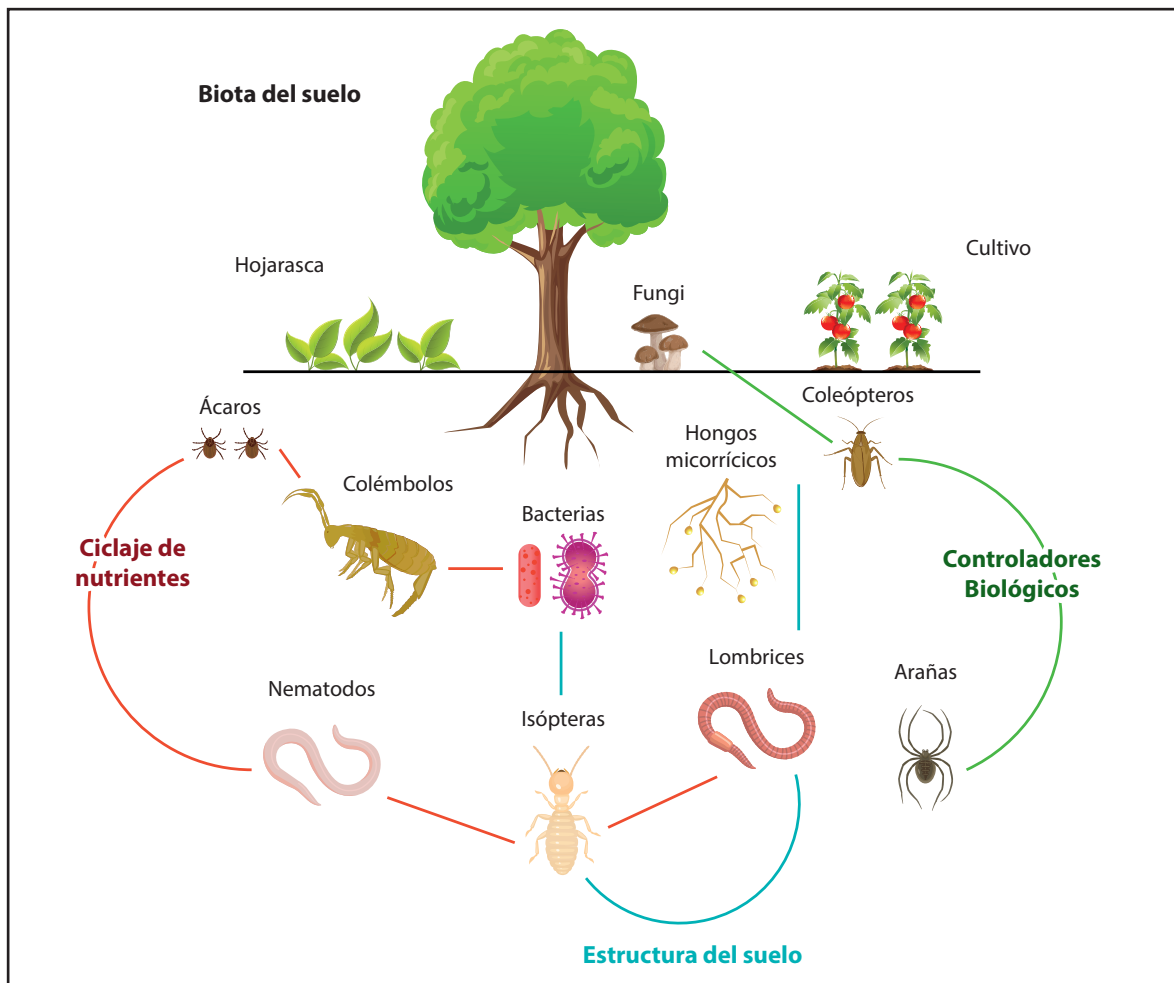
las especies de diferentes grupos funcionales pueden contribuir a múltiples procesos del suelo y la superposición ocurre en todos los niveles (Mujtar *et al.*, 2019).

Por otra parte, como referencia especial, Swift y otros (2012) asignaron diez categorías que se justifican en la función que realizan y fueron denominadas como grupos funcionales de la biota del suelo y son: (I) productores primarios, (II) herbívoros, (III) ingenieros del ecosistema, (IV) trans-

formadores de hojarasca, (V) descomponedores, (VI) predadores, (VII) microreguladores, (VIII) mirosimbiontes, (IX) plagas y enfermedades del suelo, y (X) transformadores procariontes.

Se hará una clasificación de la biota del suelo en función el papel que desempeña en la conformación de la estructura del suelo, el ciclaje de nutrientes y el control biológico, como se refleja en la figura 2.

Figura 2. Diagrama de interacciones de la biota del suelo basada en Zhu, Hu, Wang y Wu (2019)



Nota. Las líneas de color se relacionan al grupo funcional Ciclaje de nutrientes (---), Estructura de suelo (--) y Controladores biológicos (--)



2.1. Estructura de Suelo

Los agregados del suelo o la estabilización de la estructura del suelo son fundamentales para los servicios de los agroecosistemas, como el almacenamiento de carbono, el control de la erosión y el crecimiento de las raíces. En este proceso intervienen factores físicos del suelo, como la textura y la biología del suelo (Faucon, Houben & Lambers, 2017). Además, grupos de organismos como las lombrices, los hongos micorrícicos y los isópteros (termitas) pueden incidir en este agroecosistema, ya que modifican la estructura al influir en la descomposición de residuos orgánicos que afectan las condiciones de pH y a la consiguiente agregación de minerales (Marshall & Lynch, 2020).

Las lombrices cumplen funciones específicas dependiendo del suelo en el que habitan, por lo que se pueden clasificar en: lombrices anécicas, que ocupan primordialmente suelos minerales y se alimentan de la hojarasca en la superficie del suelo; lombrices endógenas, que habitan y se alimentan en la cubierta mineral del suelo; y lombrices epigeas, que habitan y se alimentan en la cubierta de hojarasca donde se acumula la materia orgánica del suelo (Huang, González & Zou, 2020).

Además, las lombrices se consideran organismos de ingeniería del suelo porque al combinar los residuos de materia orgánica y los minerales, forman los macroagregados, mejoran la estabilidad de la estructura del suelo, inciden en el ciclo de nutrientes y, al mismo tiempo, son indicadores de la salud del suelo (Zhu *et al.*, 2019; Marshall & Lynch, 2020).

Los hongos intervienen indirectamente en la estabilidad de la estructura de los agregados, esto sucede a través de las plantas hospederas, ya que favorece el crecimiento de las raíces que, paralelamente, influyen en la estructura edáfica (Faucon *et al.*, 2017). Además, los hongos tienen

la capacidad de producir expolisacáridos que, junto con la expansión de las hifas, favorecen la generación de agregados (Ritz & Young, 2004).

2.2. Ciclaje de Nutrientes

Los ácaros y los colémbolos participan directamente en la descomposición de la hojarasca mediante la remoción, trituración y consumo, lo que indirectamente puede estimular la actividad microbiana. Además, los colémbolos se clasifican en tres grupos: i) epiedáficos (permanecen en la superficie del suelo), ii) hemiedáficos (habitan por debajo de la superficie del suelo), y iii) euedáficos (permanecen en lo más profundo del suelo). Estos grupos desempeñan funciones de descomposición de material orgánico y de movilización vertical de nutrientes (Van Capelle, Schrader & Brunotte, 2012).

Las lombrices de tierra apoyan el ciclaje de nutrientes promoviendo la descomposición de la hojarasca, mejoran la inoculación microbiana y restableciendo la biomasa microbiana. Este grupo también regula la disponibilidad de humedad y oxígeno en el suelo. Por otra parte, las lombrices de tierra endogénicas y anécicas a través del proceso de digestión, pasan carbono a través del intestino y llevan cationes al suelo superior incrementando el pH (Zhu *et al.*, 2019). Por lo tanto, juegan un papel fundamental en la descomposición del carbono orgánico, el equilibrio entre la mineralización y estabilización del carbono de la hojarasca, también una relación C/N, menor a 20, favorece la mineralización, mientras la relación C/N mayor a 30 incide en la inmovilización de nutrientes (Huang *et al.*, 2020).

Los nematodos son importantes en el funcionamiento de los agroecosistemas, se asocian con los procesos de descomposición de material orgánico, ciclo de nutrientes, mineralización de nutrientes y la transferencia de energía (Ferris & Tuomisto, 2015). Además, los nematodos favorecen la mineralización de la materia orgánica que

mejora el crecimiento de las plantas. Por otra parte, los nematodos predadores están involucrados indirectamente en el ciclo de nutrientes. También los nematodos (predadores de hongos y bacterias) están relacionados con el transporte de bacterias y aceleración de la descomposición y el ciclo de nutrientes, además de representar un aumento de hasta el 25% en la mineralización del N en el suelo (Zhang *et al.*, 2017).

Los isópteros comúnmente conocidos como termitas, son reconocidos por prestar servicios ecosistémicos y en la intervención en la descomposición del material orgánico y en el ciclo de nutrientes. Además, en estudios realizados por Lejoly y otros (2019) encontraron que la actividad de las láminas de los isópteros (termitas) aumentaron la disponibilidad en los nutrientes (K, Mg y P), contenido de carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico, cationes de base intercambiables y pH (Kooch, Ehsani & Akbarinia, 2020).

Los hongos y las bacterias son piezas fundamentales en el ciclaje de nutrientes, precisamente se reportó que influyen en la movilidad y transformación de N incluyendo la mineralización del N atmosférico, así mismo, las bacterias intervienen en la mineralización del amonio a nitratos que favorece la asimilación de N por las plantas.

Por otra parte, dada la generación de ácidos orgánicos por metabolismo microbiano, permite incrementar la solubilización de P y, por ende, mejorar la disponibilidad de este macronutriente para las plantas (Eldridge & Delgado-Baquerizo, 2018). Sin embargo, también se ha reportado que algunos géneros de bacterias secuestran el P soluble y evitan la asimilación por las plantas (Gumiere *et al.*, 2019).

2.3 Controladores Biológicos (Fitopatógeno – Cultivo)

Los controladores biológicos comprenden organismos con la capacidad de regular la dinámica de la población de otros organismos, así los coleópteros y las arañas son organismos indicadores de la salud del suelo, que desempeñan un papel fundamental en la prestación de servicios ecosistémicos. En este sentido, los coleópteros son insectos carnívoros y granívoros benéficos para los cultivos agrícolas, y las arañas son depredadoras de plagas, además de ser susceptibles a las perturbaciones ambientales (cambio de uso de suelo y microclima) (Marshall & Lynch, 2020).

Los hongos y las bacterias interactúan en el suelo permitiendo el control de otros organismos que pueden ser patógenos para el cultivo de interés, precisamente se presenta interacción entre hongos y bacterias que afectan la disponibilidad de P₂O₅, es el caso, que a mayor concentración de P soluble por acción bacteriana, se restringe la colonización de hongos en suelos; por lo tanto, esta estrategia permite el biocontrol de fitopatógenos que pueden afectar los cultivos de interés (Gumiere *et al.*, 2019). Por otra parte, varios géneros de bacterias son reportados como biocontroladores natos, por ejemplo, los que con hongos micorrízicos de algunas especies del género *Bacillus* desarrollan una asociación de microorganismos vegetales; mientras que otro modo de asociación de algunas especies de *Bacillus* se da por la capacidad generar proteínas que causan daño permanente contra fitopatógenos (Guo *et al.*, 2020).



3. Impacto de Actividades Antropogénicas en la Biota Edáfica

Las actividades humanas suponen una gran amenaza para los ecosistemas naturales, incluido el suelo y sus hábitats. Existe evidencia acerca del impacto perjudicial en la biota edáfica por la conversión de ecosistemas naturales en agroecosistemas (Nielsen, 2019).

En su estudio, Kooch y otros (2020) revelaron que el cambio de la cubierta boscosa natural a sitios antropogénicos (es decir, la conversión a plantación forestal, huerto casero, pastura y cultivo de arroz) disminuyó significativamente la actividad de los organismos edáficos como protozoos, bacterias, hongos, lombrices, ácaros, colémbolos y nematodos. Incluso se ha reportado que, aunque la transición del cultivo tradicional al orgánico se lleve a cabo como una estrategia de manejo integrado del suelo, y aunque los cultivos orgánicos tengan una mayor viabilidad de nutrientes, el tiempo de recuperación a estadios sin perturbar para la biota fúngica es mucho mayor a 10 años para establecer una dinámica de equilibrio entre diferentes componentes bióticos (Stagnari *et al.*, 2014).

En cualquier caso, las respuestas funcionales de la biota edáfica pueden variar dependiendo de las prácticas de manejo del suelo. Por ejemplo, el uso de maquinaria pesada y los altos niveles de tráfico tienden a compactar el suelo considerablemente, reduciendo así el espacio poroso habitable para diversos organismos del suelo e incluso restringiendo el crecimiento micelial de los hongos (Nawaz, Bourrie & Trolard, 2013). Así mismo, las prácticas de manejo del suelo (labranza), incidirán de forma negativa en la diversidad de nematodos microbívoros, estos organismos es-

tán vinculados a los niveles de carbono total en el suelo y son indicadores de la salud del suelo (Zhang *et al.*, 2017).

La labranza intensiva es otra práctica común que modifica la estructura del suelo, dado que destruye los macroagregados modificando el hábitat de la biota edáfica. Al mismo tiempo, reduce la fertilidad biológica, causando pérdida de la biodiversidad microbiana y macrofauna, la erosión, la degradación y la reducción de la actividad bioquímica (Giagnoni *et al.*, 2019). En su estudio, Köhl, Oehl y Van der Heijden (2014) demostraron que la labranza intensiva disminuye la longitud de las hifas de hongos micorrízicos arbusculares en zonas de pradera, representando una disminución en la absorción de P para las plantas. Por su parte, Roger-Estrade y otros (2010) reportaron que la labranza afecta de forma directa la macrofauna y que el arado reduce la abundancia, ya que afecta a la motilidad de las especies y las expone a los depredadores.

La mayoría de los agroquímicos (herbicidas, fungicidas e insecticidas) afectan negativamente la diversidad y la composición de la biota edáfica, lo que puede afectar paralelamente el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya sea por la reducción en nutrientes disponibles a razón de ausencia de mineralización o por el incremento en la incidencia de plagas y enfermedades (Mee-na *et al.* 2020). El nivel de afectación de los agroquímicos depende de sus características como la degradabilidad, la absorción, la biodisponibilidad, la persistencia, la concentración y la toxicidad. Se estima que el porcentaje de ocurrencia de bacterias (*azotobacter*) fijadoras de nitrógeno disminuye considerablemente entre 7-14 días después de la aplicación del herbicida (Milošević & Govedarica, 2002). Así mismo, en un estudio de ecotoxicidad, encontraron que las poblaciones de colémbolos y enquitreidos eran sensibles

a la aplicación del fungicida *Mancozeb*, que causaba una reducción de la abundancia de estos grupos (Carniel *et al.*, 2019).

Sin embargo, también se han identificado prácticas de manejo que promueven la biota edáfica, definidas como estrategias en la agricultura de conservación que promueven la biodiversidad del suelo y mejoran las funciones de los ecosistemas en paisajes agrícolas. Según Domínguez y otros (2014), la agricultura orgánica aumenta significativamente la abundancia de mesofauna, macrofauna y lombrices, y, por consiguiente, mejora las tasas de descomposición, comparado con la agricultura convencional, con labranza y labranza cero. Además, un metaanálisis mostró que la agricultura orgánica aumenta un 30% de la riqueza de suelo frente a los sistemas convencionales, beneficiando a los polinizadores, depredadores y herbívoros (Tuck *et al.*, 2014). Por su parte, Mahajan y otros (2019) encontraron que la reducción de la labranza y la retención de residuos de cultivos como mantillo, aumentaron la proporción de C orgánico y el N total presente en la materia orgánica del suelo como biomasa microbiana.

4. Conclusiones

En esta revisión, se ha proporcionado una visión general del conocimiento actual acerca de la biota edáfica, su papel en el funcionamiento del ecosistema y los posibles impactos del manejo agrícola en sus comunidades.

El conocimiento de la biota edáfica ha mejorado mucho en las últimas décadas y continúa evolucionando debido al número exponencial de estudios que se han desarrollado. Sin embargo, es evidente que el efecto antropogénico plantea amenazas significativas para la biodiversidad del suelo y su capacidad funcional. Por lo tanto, la conservación de la biota edáfica es fundamental para garantizar que sus comunidades continúen

brindando los servicios ecosistémicos de los que dependemos, especialmente de índole agrícola.

El conocimiento actual desarrollado sugiere que existe un potencial de gestión sostenible de la biodiversidad del suelo.

5. Referencias

- Barrios, E. (2007). Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological economics*, 64(2), pp.269-285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004>
- Barrios, E., Shepherd, K.D., y Sinclair, F. (2015). *Soil health and agricultural sustainability: the role of soil biota*. In: FAO, editor. Agroecology for food security and nutrition. Rome (Italy): Proceedings of the FAO International Symposium; pp. 104–122.
- Barrios E., Sileshi G.W., Shepherd K.D., y Sinclair, F. (2012). *Agroforestry and soil health: linking trees, soil biota and ecosystem services*. In: Wall, D.H., Bardgett, R.D., Behan-Pelletier, V., Herrick, J.E., Jones, T.H., Ritz, K., Six, J., Strong, D.R., Van der Putten, W.H., editors. Soil ecology and ecosystem services. Oxford (UK): Oxford University Press; pp. 315–330.
- Busari, M.A., Kukal, S.S., Kaur, A., Bhatt, R., y Dulazi, A.A. (2015). Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(2), pp.119-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002>
- Carniel, L.S.C., Niemeyer, J.C., de Oliveira Filho, L.C.I., Alexandre, D., Gebler, L., y Klauber-Filho, O. (2019). The fungicide mancozeb affects soil invertebrates in two subtropical Brazilian soils. *Chemosphere*, 232, pp.180-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.179>
- Domínguez, A., Bedano, J.C., Becker, A.R., y Arolfo, R. V. (2014). Organic farming fosters agroecosystem functioning in Argentinian temperate soils: Evidence from litter decomposition and soil fauna. *Applied Soil Ecology*, 83, pp.170-176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.11.008>
- Eldridge, D. J., y Delgado-Baquerizo, M. (2018). Functional groups of soil fungi decline under grazing. *Plant and Soil*, 426(1-2), pp.51-60. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3617-6>



- Faucon, M.P., Houben, D., y Lambers, H. (2017). Plant functional traits: soil and ecosystem services. *Trends in plant science*, 22(5), pp.385-394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.01.005>
- Ferris, H., y Tuomisto, H. (2015, junio). Unearthing the role of biological diversity in soil health. *Soil Biology and Biochemistry*, 85, pp.101-109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.037>
- Geisen, S., Briones, M.J., Gan, H., Behan-Pelletier, V.M., Friman, V.P., de Groot, G.A., Hannula, S.E., Lindo, Z., Philippot, L., Tiunov, A.V., y Wall, D. H. (2019). A methodological framework to embrace soil biodiversity. *Soil Biology and Biochemistry*, 136, pp.1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107536>
- Giagnoni, L., Maienza, A., Baronti, S., Vaccari, F.P., Genesio, L., Taiti, C., y Mancuso, S. (2019). Long-term soil biological fertility, volatile organic compounds and chemical properties in a vineyard soil after biochar amendment. *Geoderma*, 344, pp.127-136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.011>
- Gumiere, T., Rousseau, A. N., da Costa, D. P., Cassetari, A., Cotta, S. R., Andreote, F. D., y Pavinato, P. S. (2019). Phosphorus source driving the soil microbial interactions and improving sugarcane development. *Scientific reports*, 9(1), pp.1-9.
- Guo, D., Yuan, C., Luo, Y., Chen, Y., Lu, M., Chen, G., y An, D. (2020). Biocontrol of tobacco black shank disease (Phytophthora nicotianae) by *Bacillus velezensis* Ba168. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 165(1), 104523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.01.004>
- Huang, W., González, G., y Zou, X. (2020). Earthworm abundance and functional group diversity regulate plant litter decay and soil organic carbon level: A global meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, 150, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103473>
- Kibblewhite, M.G., Ritz, K., y Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 685-701. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Köhl, L., Oehl, F., y Van der Heijden, M. G. (2014). Agricultural practices indirectly influence plant productivity and ecosystem services through effects on soil biota. *Ecological Applications*, 24(7), 1842-1853. DOI: <https://doi.org/10.1890/13-1821.1>
- Kooch, Y., Ehsani, S., y Akbarinia, M. (2020). Stratification of soil organic matter and biota dynamics in natural and anthropogenic ecosystems. *Soil and Tillage Research*, 200, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104621>
- Lejoly, J., Cornelis, J. T., Van Ranst, E., Jansegers, E., Tarpin, C., Degré, A., Colinet, G., y Malaisse, F. (2019). Effects of termite sheetings on soil properties under two contrasting soil management practices. *Pedobiologia*, 76, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2019.150573>
- Mahajan, N. C., Mrunalini, K., Prasad, K. K., Naresh, R. K., y Sirisha, L. (2019). Soil Quality Indicators, Building Soil Organic Matter and Microbial Derived Inputs to Soil Organic Matter under Conservation Agriculture Ecosystem: A Review. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 8(2), 1859-1879. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.802.218>
- Marshall, C. B., y Lynch, D. H. (2020). Soil microbial and macrofauna dynamics under different green manure termination methods. *Applied Soil Ecology*, 148, 103505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103505>
- Meena, R. S., Kumar, S., Datta, R., Lal, R., Vijayakumar, V., Brtnicky, M., y Pathan, S. I. (2020). Impact of agrochemicals on soil microbiota and management: A review. *Land*, 9(2), 34. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9020034>
- Milošević, N. A., y Govedarica, M. M. (2002). Effect of herbicides on microbiological properties of soil. *Zbornik Matice srpske za prirodne nauke*, (102), 5-21. DOI: <https://doi.org/10.2298/ZMSPN0201005M>
- Mujtar, V., Muñoz, N., Mc Cormick, B. P., Pulleman, M., y Titttonell, P. (2019). Role and management of soil biodiversity for food security and nutrition; where do we stand?. *Global food security*, 20, pp.132-144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.01.007>
- Nawaz, M. F., Bourrie, G., y Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for sustainable development*, 33(2), 291-309. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Nielsen, U. (2019). *Soil Fauna Assemblages: Global to Local Scales (Ecology, Biodiversity and Conservation)*. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/978110812351>

- Orgiazzi, A., Bardgett, R.D., Barrios, E., Behan-Pelletier, V., Briones, M.J.I., Chotte, J.-L., De Deyn, G.B., Eggleton, P., Fierer, N., Fraser, T., Hedlund, K., Jeffery, S., Johnson, N.C., Jones, A., Kandeler, E., Kaneko, N., Lavelle, P., Lemanceau, P., Miko, L., Montanarella, L., Moreira, F.M.S., Ramirez, K.S., Scheu, S., Singh, B.K., Six, J., van der Putten, W.H., y Wall, D.H. (Eds.), (2016). *Global Soil Biodiversity Atlas*. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. pp.176.
- Ritz, K., y Young, I. M. (2004). Interactions between soil structure and fungi. *Mycologist*, 18(2), pp.52-59. DOI:<https://doi.org/10.1017/S0269915X04002010>
- Roger-Estrade, J., Anger, C., Bertrand, M., y Richard, G. (2010). Tillage and soil ecology: partners for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*, 111(1), pp.33-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.010>
- Silva, R. A., Aguiar, A.D.C.F., Rebêlo, J., Macário, M., Silva, F.E., Silva, G.F. D., y Siqueira, G. (2019). Diversity of edaphic fauna in different soil occupation systems. *Revista Caatinga*, 32(3), pp.647-657. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n309rc>
- Stagnari, F., Perpetuini, G., Tofalo, R., Campanelli, G., Leteo, F., Della Vella, U., y Pisante, M. (2014). Long-term impact of farm management and crops on soil microorganisms assessed by combined DGGE and PLFA analyses. *Frontiers in microbiology*, 5, p.644. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00644>
- Swift, M. J., Bignell, D. E., Moreira, F. M., y Huising, E. J. (2012). *El inventario de la biodiversidad biológica del suelo: conceptos y guía general*. Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo el suelo. pp. 29-52
- Tuck, S. L., Winqvist, C., Mota, F., Ahnström, J., Turnbull, L. A., y Bengtsson, J. (2014). Land-use intensity and the effects of organic farming on biodiversity: a hierarchical meta-analysis. *Journal of applied ecology*, 51(3), pp.746-755. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12219>
- Van Capelle, C., Schrader, S., y Brunotte, J. (2012). Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota—A review with a focus on German data. *European Journal of Soil Biology*, 50, pp.165-181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.02.005>
- Zhang, X., Ferris, H., Mitchell, J., y Liang, W. (2017). Ecosystem services of the soil food web after long-term application of agricultural management practices. *Soil Biology and Biochemistry*, 111, pp.36-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.017>
- Zhu, X., Hu, Y., Wang, W., y Wu, D. (2019). Earthworms promote the accumulation of maize root-derived carbon in a black soil of Northeast China, especially in soil from long-term no-till. *Geoderma*, 340, pp. 124-132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.003>