

## BIOINDICADORES PARA EL MONITOREO DE LA BIODIVERSIDAD Y LOS SERVICIOS ECOSISTEMICOS DEL SUELO

Margarita Ros<sup>1,\*</sup>, Luna Medrano<sup>2</sup>, Maria del Mar Alguacil<sup>1</sup>, Javier Alejandro<sup>3</sup>, Gema Del Río<sup>3</sup>, Daniel Sacristán<sup>4</sup>, Manuel Delgado-Baquerizo<sup>2</sup>, Antonio Rafael Sánchez-Rodríguez<sup>5</sup>, Raúl Ochoa-Hueso<sup>6</sup>, Jose Antonio Pascual<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS) CSIC, Campus Universitario de Espinardo, Murcia, España.

<sup>2</sup>Laboratorio de Biodiversidad y Funcionamiento Ecosistémico. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS) CSIC, Sevilla, España.

<sup>3</sup>Gabinete Técnico, Unión de Pequeños Agricultores y Ganaderos, Madrid, España.

<sup>4</sup>Departamento de Biología Vegetal, Universidad de Valencia, Valencia, España.

<sup>5</sup>Unidad de Edafología, Departamento de Agronomía, Campus Universitario de Rabanales, Universidad de Córdoba, Córdoba, España.

<sup>6</sup> Departamento de Biología, Área de Botánica. IVAGRO. Universidad de Cádiz, Puerto Real, España.

### RESUMEN

El suelo es crucial para la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas agrícolas/agrarios y el medio ambiente en general. Estos sistemas afectan a todos los componentes del suelo y pueden tener profundos impactos en la biodiversidad del suelo. La biodiversidad del suelo desempeña un papel crucial en la provisión de servicios ecosistémicos, en el apoyo de la multifuncionalidad del suelo y el valor que aporta a la humanidad. Por ello, es necesario monitorizar, conservar, restaurar y mejorar la biodiversidad del suelo que se puede medir según su abundancia, composición, funcionalidad, interacciones y procesos que permitirán mantener el suelo y su funcionalidad para las presentes y futuras generaciones. Por ello, el objetivo de este artículo es conocer los diferentes bioindicadores de biodiversidad microbiana del suelo para integrarlos en políticas de manejo sostenible de suelos. Las medidas de diferentes bioindicadores como biomasa de carbono microbiano, respiración del suelo, actividades enzimáticas relacionadas con los ciclos del C, N y P, secuenciación de amplicones, microscopia y análisis de redes, entre otros, junto con propiedades abióticas como el carbono orgánico total, nos ayudarán a monitorear la salud del suelo y aplicar medidas adecuadas para un manejo agrícola sostenible bajo un escenario de cambio global.

**Palabras clave:** funcionalidad del suelo; Microorganismos; taxonomía microbiana de suelos

## BIOINDICATORS FOR MONITORING SOIL BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES

### ABSTRACT

Soil is crucial for the long-term sustainability of agricultural/agrarian systems and the environment. Agricultural systems affect all soil components and can have a deep impact on soil biodiversity. Since soil biodiversity plays a crucial role in providing ecosystem services, supporting soil multifunctionality and bringing value to humanity, it is necessary to monitor, conserve, restore and improve it. Soil biodiversity can be measured through abundance, composition, functionality, interactions, and processes that will allow preserving soil and its functionality for present and future generations. Therefore, the objective of this article is to identify and describe different bioindicators of soil microbial biodiversity to integrate them into sustainable soil management policies. Measurements of different bioindicators such as total organic carbon, microbial carbon biomass, soil respiration, enzymatic activities related to the C, N and P cycles, DNA metabarcoding, microscopy, and network analysis, among others, will help us monitor soil health and make appropriate de-

\* Autor de contacto:  
margaros@cebas.csic.es

Recibido:  
18-07-24

Recibido con revisiones:  
15-10-24

Aceptado:  
15-10-24

cisions for sustainable agricultural management under the current scenario of global change.

**Keywords:** soil microbial functionality; microorganisms; soil microbial taxonomy.

### 1.El suelo y los servicios ecosistémicos

Los suelos proporcionan la inmensa mayoría de los alimentos que consumimos y se encuentran entre los reservorios más importantes de biodiversidad y carbono del planeta (COM/2023/416, 2023). Los suelos, constituyen el soporte básico de los ecosistemas terrestres, son sistemas complejos formados por multitud de componentes bióticos y abióticos que interactúan continuamente. Dichos componentes definen las características físicas (p.ej. textura, densidad), químicas (p.ej. pH, composición elemental) y biológicas (p.ej. composición de las comunidades microbianas) de los suelos. En conjunto, estas características definen la multifuncionalidad de los suelos y su capacidad para producir alimentos (FAO, 2015).

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que los seres humanos obtienen de los procesos ecosistémicos e incluyen los procesos y funciones del suelo. Los servicios incluyen beneficios esenciales para la salud, bienestar y prosperidad de las sociedades humanas (Bronzizio et al., 2019). Los tipos de servicios ecosistémicos se pueden dividir en tres: Servicios de regulación (p.ej. descomposición de materia orgánica y ciclado de nutrientes), soporte (p.ej. formación del suelo y soporte de organismo y plantas), y aprovisionamiento (p. ej. alimentos) (Figura 1) los cuales aseguran la supervivencia de la vida en la tierra (Ronchi et al., 2019).

La diversidad de microorganismos en el suelo está relacionada con los procesos, servicios y funciones que realizan en los suelos cuyos cambios pueden afectar a la multifuncionalidad del suelo, su sostenibilidad a largo plazo y las sociedades humanas que dependen de sus servicios. Por esta razón, es importante comprender estas conexiones y gestionar la biodiversidad, de una manera sostenible.



Figura 1: Servicios ecosistémicos del suelo (Gráfico realizado con Biorender, <https://www.biorender.com/>).

Figure 1: Soil ecosystem services (Chart made with Biorender, <https://www.biorender.com/>).

## 2. Los suelos después de décadas de agricultura intensiva

Las actividades humanas como la agricultura y la ganadería han provocado el agotamiento y la degradación del suelo mediante el uso de modelos de producción intensivos. En la actualidad, estos sistemas están altamente mecanizados y son dependientes de agroquímicos, lo que altera la composición física, química, y biológico original del suelo (Boafo et al., 2020) y, con ellos, muchas de las funciones que se les atribuyen a los suelos como proveedores de servicios ecosistémicos. La degradación del suelo tiene como resultado la disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios, entre los que se incluyen el reciclado de nutrientes o el secuestro de carbono, que intensifican la presión sobre los suelos sanos restantes (Müller et al., 2023). Por ende, la protección de este recurso natural no renovable, en el tiempo de una vida humana, debido a su lento proceso de formación y resiliencia, debe formar parte de las políticas nacionales e internacionales. Políticas que nos ayudaran a prevenir y responder mejor a los desastres naturales (eventos extremos como inundación o sequías, olas de calor) y, alcanzar los objetivos acordados por la Unión Europea (EU) en materia de clima y biodiversidad, seguridad alimentaria y protección de la salud de los ciudadanos. La Misión Suelo de la UE (*A Soil Deal for Europe*) y la Ley europea de vigilancia del suelo (*Directive on Soil Monitoring and Resilience*) son un claro ejemplo de la preocupación de las políticas europeas por abordar esta problemática asociada a la conservación del suelo.

## 3. Biodiversidad del suelo: un mundo bajo nuestros pies

La biodiversidad del suelo se refiere a la variedad, abundancia y redes interconectadas de organismos vivos que habitan en la matriz del suelo. El suelo es el mayor reservorio de biodiversidad del planeta e incluye microorganismos, microfauna, mesofauna y macrofauna responsables de la salud del suelo (Tabla 1). P. ej. en un gramo de suelo podemos encontrar miles de especies de bacterias y cientos de metros de hifas fúngicas; en un metro cuadrado de suelo viven hasta 1.5 kg m<sup>-2</sup> de organismos vivos (Bardgett y Puten, 2014). Esta diversidad biológica es esencial para el funcionamiento y la salud del ecosistema del suelo, ya que cada grupo de organismos desempeña roles específicos y, a menudo, interrelacionados, que contribuyen a procesos ecológicos fundamentales como la descomposición de la materia orgánica, ciclo de nutrientes, estructura del suelo, regulación de patógenos y secuestro de carbono, los cuales juegan un papel crucial en la provisión de servicios ecosistémicos.

**Tabla 1:** Clasificación de los organismos vivos en el suelo.

**Table 1:** Classification of soil living organisms.

Clasificación	Descripción /Función específica	Función principal
<b>Microorganismos y Microfauna</b>	<b>Bacterias:</b> Microscópicos, unicelulares, y extremadamente diversos. Son cruciales para la fijación de nitrógeno, la descomposición de materia orgánica y la transformación de nutrientes.	Responsables de los ciclos biogeoquímicos del suelo, descomposición de materia orgánica y liberación de nutrientes esenciales
	<b>Hongos:</b> Organismos que forman filamentos (hifas) que descomponen la materia orgánica compleja, liberando nutrientes para las plantas. Algunos hongos forman relaciones simbióticas con las raíces de las plantas (micorrizas).	
	<b>Protistas:</b> Organismos unicelulares eucariotas, que incluyen amebas y flagelados. Participan en la regulación de las poblaciones microbianas y la descomposición de materia orgánica.	
	<b>Nematodos:</b> Gusanos microscópicos que descomponen materia orgánica y controlan poblaciones de microorganismos, a la vez que son indicadores de la salud del suelo.	
<b>Mesofauna</b>	<b>Colémbolos:</b> Pequeños invertebrados que se alimentan de hongos y materia orgánica en descomposición. Contribuyen a la formación de humus y la fragmentación de la materia orgánica.	Regulan la descomposición de materia orgánica y la formación del humus, además de participar en el control biológico de plagas y enfermedades.
	<b>Ácaros:</b> Diversos y abundantes, estos pequeños arácnidos participan en la descomposición de materia orgánica y control biológico de plagas mediante la predación.	

<b>Macrofauna</b>	<b>Lombrices de tierra:</b> Importantes ingenieros del ecosistema que mejoran la estructura del suelo, aumentando la porosidad, aireación y capacidad de retención de agua. Facilitan la mezcla de capas del suelo y el ciclo de nutrientes	Ayudan en la aireación y drenaje del suelo, facilitan la mezcla de capas del suelo y la distribución de materia orgánica
	<b>Coleópteros:</b> Incluyen escarabajos que fragmentan la materia orgánica y contribuyen a la formación de humus. Algunos son depredadores que controlan plagas del suelo.	
	<b>Miriápodos:</b> Como los ciempiés y milpiés, que descomponen materia orgánica y ayudan a la mineralización de nutrientes.	

Además, la presencia de una alta diversidad de microorganismos, invertebrados y plantas en el suelo contribuye a mejorar la regulación del ciclo de nutrientes, la estructura del suelo y aumentar la eficiencia en la descomposición de materia orgánica (Wall et al., 2012). Estos procesos son esenciales para la fertilidad del suelo y la productividad agrícola en el medio y largo plazo, ya que aseguran un suministro continuo de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Además, la biodiversidad del suelo ayuda a mantener la calidad del agua y del aire al facilitar la descomposición y el reciclaje de contaminantes, además de actuar como filtro y almacén de agua (Lavelle y Spain, 2001).

Los bioindicadores deben ser la piedra angular para controlar cualquier apoyo para los agricultores, y para asegurar la correcta regeneración de nuestros suelos en el marco de la restauración de nuestros ecosistemas. La evaluación de la biodiversidad del suelo implica mediciones estandarizadas de la abundancia, identidad y diversidad funcional o características de los organismos, en conjunto con medidas de los procesos del suelo, así como de las interacciones entre los organismos (Ros et al., 2006). La biodiversidad y los procesos del suelo varían en el espacio y el tiempo debido a factores como la ubicación, el clima, la vegetación y las prácticas de gestión del suelo (Hopkins et al., 2023; Bahram et al., 2018).

Por otro lado, la biodiversidad del suelo también desempeña un papel vital en la mitigación del cambio climático a través del secuestro de carbono. A parte de la infravalorada capacidad de los suelos para almacenar carbono en forma inorgánica (Raza et al., 2024), los suelos con una elevada biodiversidad tienen una mayor capacidad para almacenar carbono en forma de materia orgánica, contribuyendo así a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Lal, 2004). Además, la diversidad biológica en el suelo mejora la resistencia y resiliencia de los ecosistemas ante perturbaciones, como sequía y enfermedades, lo que es fundamental para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas a largo plazo (Brussaard et al., 1997). Por tanto, la conservación y promoción de la biodiversidad del suelo son fundamentales para mantener y mejorar los servicios ecosistémicos, a su vez, cruciales para el bienestar humano y la salud del planeta (Wall et al., 2012; Lal, 2004). Por el contrario, su destrucción supone una constante amenaza para la forma de vida tal y como se conoce actualmente. Por lo tanto, los esfuerzos realizados estos últimos años por la comunidad científica en la utilización de estos bioindicadores (Fierer et al., 2021) ha ayudado a que la biodiversidad tenga un papel importante en las estrategias internacionales destinadas a proteger el suelo y su biodiversidad.

#### 4. Indicadores de salud del suelo

Los indicadores para evaluar la salud del suelo deben tener en cuenta las múltiples dimensiones de las funciones del suelo, como la productividad y el bienestar ambiental, los múltiples factores físicos, químicos y biológicos que controlan los procesos biogeoquímicos y su variación en intensidad a lo largo del tiempo y el espacio relevantes para el desarrollo del suelo (Doran and Parkin, 1996) (Figura 2). Dentro de los indicadores abióticos los más utilizados son pH, textura, resistencia, densidad real y aparente, así como, estabilidad de los agregados, aunque mucho más relevante es el contenido y composición nutricional o de materia orgánica. También han sido ampliamente empleados la disponibilidad de nutrientes (N, P, K), el nitrógeno total, la relación C/N y la conductividad eléctrica.

Los indicadores deberían cumplir las siguientes características: 1. Significativo y orientado a los objetivos de la evaluación; 2. Relevante para la escala y la biología de los organismos, capaz de detectar diferencias en el tiempo de estudio; 3. Robusto, factible de medir y fácil de interpretar tanto a nivel científico como político, de bajo coste (deseable); 4. Contar con un plan y/o metodología de muestreo establecido y estandarizado.

En la práctica, ningún indicador por sí solo cumple con todos los criterios anteriores. Por ello, el desarrollo de un conjunto de indicadores complementarios entre sí, que incluyan parámetros tanto bióticos como abióticos es habitualmente la mejor elección (Pulleman, 2012; Doran and Zeiss, 2000).

<b>Indicadores abióticos</b>
Densidad aparente, textura, porosidad, resistencia y estabilidad de agregados. pH, CE Carbono orgánico, fraccionamiento de la materia orgánica y nitrógeno total. Bases de cambio, porcentaje de saturación de bases y capacidad de intercambio catiónico. Macro y micronutrientes.
<b>Indicadores bióticos o de biodiversidad</b>
<b>Abundancia/biomasa</b> C biomasa microbiana, fosfolípidos de membrana, microscopia, PCR cuantitativa y respiración inducida por glucosa.
<b>Diversidad y taxonomía</b> Amplificación de marcadores específicos 16S rRNA (bacterias y arqueas), ITS para hongos y 18S rRNA (protistas y nematodos). Microscopia.
<b>Funcionalidad</b> Análisis de datos metagenómicos, proteómicos o metabólicos. Por medio de bases de datos de rasgos funcionales como p ej. FungalTraits, or Faprotax
<b>Co-ocurrencia</b> Redes (análisis de co-ocurrencia vía ADN)
<b>Procesos</b> Respiración del suelo, actividad total (A. deshidrogenasa) y actividades enzimáticas (enzimas hidrolíticas ligadas a los ciclos del C, N, P y S)

*Figura 2:* Indicadores de salud de suelo.

*Figure 2:* Indicators of soil health.

## 5. Indicadores de biodiversidad

La salud del suelo depende de la biodiversidad del suelo. Habitualmente son las propiedades bióticas de los suelos las que más rápido y claramente responden a los pequeños cambios que ocurren en el ecosistema, por lo que son especialmente útiles para obtener información inmediata y precisa sobre alteraciones en la salud del suelo. Los indicadores de biodiversidad que más se usan son los que están basados en la medición de la abundancia, taxonomía, funcionalidad, procesos e interacciones de los organismos del suelo (Bhaduri et al., 2022) (Figura 2).

### 5.1 Abundancia y biomasa microbiana

La biomasa microbiana del suelo es un reflejo de la idoneidad del suelo para la vida y puede compararse entre suelos similares en condiciones edafoclimáticas similares o antes y después de la adopción de diferentes manejos del suelo (Bastida et al., 2008; 2021). La biomasa microbiana se puede medir bioquímicamente (p. ej. extracción por fumigación con cloroformo), mediante respiración inducida por sustrato (SIR) (Pascual et al., 2000; Delgado Baquerizo et al., 2020), o mediante imágenes directas de los organismos (p. ej. recuentos microscópicos). La abundancia de grupos particulares de organismos se puede cuantificar mediante p. ej. PCR cuantitativa (Blaya et al., 2015).

### 5.2. Diversidad y taxonomía

La principal metodología para determinar la composición de los microorganismos (bacterias, arqueas, hongos, protistas) es la secuenciación del ácido desoxirribonucleico (ADN) mediante la amplificación de genes marcadores específicos como el gen del ácido ribonucleico ribosómico (ARNr) 16S para bacterias y arqueas (Yarza et al., 2014; Cuartero et al., 2022a; 2022b), la región espaciadora transcrita interna (ITS) para hongos y 18S ARNr para protistas y nematodos (Bellemain et al., 2010; Hernandez-Lara et al., 2023).

El ADN extraído de la muestra de suelo se analiza comparándolo con bases de datos de referencia para su asignación taxonómica. Los índices de composición y diversidad de la comunidad también se pueden analizar utilizando diferentes técnicas estadísticas (p. ej.  $\alpha$ -  $\beta$ - diversidad, abundancias relativas de diferentes grupos taxonómicos, etc.) (p. ej. Aguilera Huerta et al., 2023; Ozbolat et al., 2023).

El costo de secuenciar el ADN de una muestra de suelo de esta manera no es muy diferente al de un análisis de suelos físico o químico, y seguirá disminuyendo a medida que la tecnología mejore y crezca el mercado. Las "huellas dactilares" de comunidades microbianas de suelos son otro resultado de la secuenciación de ADN y pueden usarse para comparar suelos con la ayuda de técnicas estadísticas p. ej. estadísticas multivariadas.

Los organismos de mayor tamaño, como la microfauna y la mesofauna, generalmente se atrapan o extraen del suelo, se analizan sus características mediante microscopía y posteriormente se comparan con claves taxonómicas para su identificación. Para mejorar el tiempo de identificación, la reproducibilidad o la disponibilidad, así como la experiencia, se están desarrollando métodos basados en amplificación de genes marcadores específicos del ADN de nematodos, tardígrados y rotíferos (Watts et al., 2019) y macrofauna (Porter et al., 2019; Kawanobe et al., 2021). Otro método, como la utilización de biomarcadores de ácidos grasos fosfolípidos (PLFA) exclusivos de taxones específicos estima la biomasa y proporciona información sobre la identidad de algunos grupos taxonómicos. Sin embargo, en algunos casos, diferentes organismos poseen los mismos PLFA (Frostegård et al., 2011) y, por lo tanto, no son confiables para la identificación.

### 5.3. Funcionalidad

Las medidas de funcionalidad microbiana combinadas con la identificación de los organismos son útiles en las evaluaciones de suelos, ya que muchas funciones son llevadas a cabo por una multitud de organismos diferentes y, a su vez, un organismo puede estar involucrado en una considerable variedad de funciones. Entonces, genes funcionales que tienen como diana enzimas involucradas en diferentes procesos (ciclos del C, N y P) pueden utilizarse para estimar el potencial de los microorganismos para realizar una función específica (Hemkemeyer et al., 2021; Cuartero et al., 2022b).

La observación directa de la micro o mesofauna del suelo también se utiliza para caracterizar rasgos funcionales (Bongers y Ferris, 1999). Además, las funciones microbianas se pueden identificar a partir de datos genómicos, proteómicos o metabólicos (Starr et al., 2018; Knight et al., 2018). Así, la genómica, la PCR cuantitativa (qPCR) y los microarrays fueron las primeras tecnologías utilizadas para describir genes o taxones funcionales a partir de muestras ambientales complejas (Porter et al., 2018).

Otra metodología para determinar funcionalidad microbiana viene derivada del desarrollo de diferentes herramientas o bases de datos que recuperan datos funcionales o ecológicos de marcadores taxonómicos microbianos los cuales interfieren funcionalidad. P. ej. FungalTraits, o FAPROTAX (Pöhlme et al., 2020; Liang et al., 2020). Estas herramientas están en sus inicios y se están mejorando debido a la importancia de monitorear la biodiversidad y el funcionamiento del suelo.

La secuenciación metagenómica definida como el análisis de secuencias de ADN aleatorias (no dirigidas) obtenidas del suelo, puede proporcionar un enfoque más específico sobre la funcionalidad de los organismos y su relación con la biodiversidad del suelo. Si bien esta tecnología debido a la necesidad de dar respuesta a la funcionalidad de los suelos con más precisión se está haciendo más rentable y accesible.

### 5.4. Interacciones y co-ocurrencias

La biodiversidad del suelo también incluye una compleja red de interacciones entre los organismos del suelo. Dentro de estas interacciones podemos distinguir interacciones como: **Mutualismo**: Una relación entre dos especies que obtienen beneficio. P. ej. los hongos micorrícicos, como *Glomus intraradices*, forman relaciones mutualistas simbióticas con las raíces de la mayoría de las plantas, principalmente leguminosas; **Competencia**: Dos especies compiten por los mismos recursos. P. ej. Bacterias del género *Bacillus* y hongos del género *Penicillium* compiten por fuentes de carbono en el suelo. Esta competencia puede influir en la composición microbiana del suelo y afectar la descomposición de materia orgánica; **Depredación**: Una especie se alimenta de otra. P. ej. Algunos nematodos depredadores, como *Aphelenchus avenae*, se alimentan de hongos patógenos en el suelo, ayudando a controlar enfermedades de las plantas; **Comensalismo**: Esta relación tiene un efecto positivo para un organismo y efecto neutro o nulo para otro. P. ej. Asociación

de *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* en la Nitrificación: *Nitrosomonas* oxida el Amoniac en Nitrito y finalmente, *Nitrobacter* utiliza el nitrito para obtener energía y oxidarlo en Nitrato.

Estas complejas interacciones son las que contribuyen a la multifuncionalidad de los ecosistemas, es decir, la capacidad de un ecosistema para proporcionar múltiples servicios simultáneamente, como el ciclo de nutrientes, la eliminación de contaminantes, las enfermedades, regulación, regulación climática y producción de alimentos. La multifuncionalidad, es decir, la capacidad de un ecosistema de mantener múltiples funciones de forma simultánea está fuertemente relacionada con el tipo de organismos del suelo, su buena conexión y cuantos tipos están presentes (e.g. Lupatini et al., 2014).

El análisis de redes con secuencias de ADN es una de las herramientas para determinar estas interacciones, que, sin embargo, todavía necesita más desarrollo para su uso (Matchado et al., 2021). Este análisis requiere la extracción de ADN, seguido de secuenciación e identificación de las especies presentes en la muestra. Una vez identificadas las especies, se construye una red que representa las interacciones entre ellas, determinando desde interacciones básicas hasta algunas más intrincadas, empleándose para ello estructuras complejas pero capaces de aportar gran información donde cada arista o borde muestra interacciones entre especies. El análisis e interpretación de las redes se basa en tres conceptos, Centralidad: Identificación de especies clave que tienen muchas conexiones y son cruciales para la estabilidad del ecosistema; Modularidad: Detectar sub-redes o módulos que representan grupos de especies que interactúan más entre sí que con otras especies de redes; y Robustez: Evaluación de como la red responde a perturbaciones, como la pérdida de especies clave (Barberan et al., 2012). Estas interacciones pueden basarse en datos experimentales, conocimiento ecológico previo, o inferencias estadísticas

### 5.5. Procesos del suelo

Los procesos del suelo están regulados por la abundancia de organismos del suelo, su identidad, su biodiversidad funcional y la red de sus interacciones. La evaluación de la biodiversidad del suelo es establecer su conexión con la función general del suelo. Las medidas de la biodiversidad generalmente se combinan con mediciones de los procesos del suelo, los sustratos sobre los cuales operan los procesos y sus tasas de transformación. Estos procesos pueden ser medidas potenciales, mediadas a través de actividades enzimáticas relativas al ciclo del C, N y P o actividad total entre otras (Figura 2) (p. ej. Aguilera-Huertas et al., 2023; Ros et al., 2006).

### 6. Objetivos del estudio de biodiversidad de suelo.

Cualquier estudio de la biodiversidad del suelo puede tener un doble objetivo: el primero se refiere a una investigación más básica y científica, cuyo objetivo es obtener un conocimiento profundo de la estructura y las funciones, es decir, los roles ecológicos de la biodiversidad del suelo. El segundo propósito, más operativo y dirigido a los que deciden el manejo adecuado de los suelos tiene como objetivo evaluar el nivel y posibles fluctuaciones de la biodiversidad del suelo en diferentes condiciones ambientales para obtener un diagnóstico y establecer medidas que puedan preservarla y protegerla.

Por todo esto, es esencial establecer una base de datos específica dedicada a la biodiversidad del suelo. Esto nos permitirá especificar el rango de variaciones de la biodiversidad del suelo para un determinado tipo de suelo, clima, uso del suelo y, por tanto, interpretar los resultados de los análisis de las propiedades biológicas del suelo como se ha hecho durante muchos años con las propiedades físicas y químicas del suelo. Este enfoque de interrelación (biodiversidad del suelo/propiedades bióticas y abióticas) es necesario para, en última instancia, entregar a los administradores del suelo y a los usuarios finales un diagnóstico de la salud del suelo para definir las acciones a tomar.

### CONCLUSIÓN

La biodiversidad del suelo es un pilar fundamental y esencial para el mantenimiento del suelo, comprensión y gestión del suelo través de herramientas avanzadas y bien diseñadas. La red compleja de interacciones entre microorganismos, mesofauna y macrofauna en el suelo demuestra que no es solo la presencia de estos organismos lo que importa, sino también cómo interactúan y se conectan entre sí. Estas interacciones son las que realmente contribuyen a la multifuncionalidad del suelo, permitiéndole proporcionar múltiples servicios ecosistémicos de manera simultánea y eficaz. Para gestionar y proteger adecuadamente estos sistemas, es crucial desarrollar y utilizar bioindicadores de la biodiversidad del suelo y sus interacciones, junto con propiedades abióticas como p.ej. el carbono orgánico total. Estos bioindicadores deben ser dise-

ñados de manera que puedan integrarse fácilmente en la toma de decisiones, proporcionando información clara y útil pero que a su vez sea comprensible para su empleo garantizando que los suelos continúen siendo una fuente vital de recursos y servicios para las generaciones futuras. Estos bioindicadores como biomasa de carbono microbiano, respiración del suelo, medidas de actividades enzimáticas relacionadas con los ciclos del C, N y P, secuenciación de amplicones, microscopía y análisis de redes, entre otros.

### AGRADECIMIENTOS

Queremos dar la gracias al proyecto SOILBIO (Influencia del manejo agrícola sobre la biodiversidad, el funcionamiento y la salud de los suelos mediterráneos). Proyecto de investigación que cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGeneration EU.

### REFERENCIAS

- Aguilera-Huertas, J., Cuartero, J., Ros, M., Pascual, J. A., Parras-Alcántara, L., González-Rosado, M., Özbolat, O., Zornoza, R., Egea-Cortines, M., Hurtado-Navarro, M., y Lozano-García, B. (2023). How binomial (traditional rainfed olive grove-Crocus sativus) crops impact the soil bacterial community and enhance microbial capacities. *Journal of Environmental Management* 345, 118572. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118572>
- Bahram, M., Hildebrand, F., Forslund, S.K., Anderson, J.L., Soudzilovskaia, N.A., Bodegom, P.M., Bengtsson-Palme, J., Anslan, S., Coelho, L.P., Harend, H., Huerta-Cepas, J., Medema, M.H., Maltz, M.R., Mundra, S., Olsson, P.A., Pent, M., Pöhlme, S.,... Bork, P. et al. (2018). Structure and function of the global topsoil microbiome. *Nature* 560:233–237. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0386-6>
- Barberán, A., Bates, S. T., Casamayor, E. O., y Fierer, N. (2012). Using network analysis to explore co-occurrence patterns in soil microbial communities. *The ISME Journal*, 6, 343–351. <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.119>
- Bardgett, R., y Putten, W. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*. 515, 505-511. <https://doi.org/10.1038/nature13855>
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., y García, C. (2008). Past, Present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147, 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>
- Bastida, F., Eldridge, D.J., García, C., Kenny Png, G., Bardgett, R.D., y Delgado-Baquerizo, M. (2021). Soil microbial diversity–biomass relationships are driven by soil carbon content across global biomes. *The ISME Journal* 15, 2081–2091. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00906-0>.
- Bellemain, E., Carlsen, T., Brochmann, C., Coissac, E., Taberlet, P., y Kuserud, H. (2010). ITS as an environmental DNA barcode for fungi: an *in silico* approach reveals potential PCR biases. *BMC Microbiology* 10, 189. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-10-189>
- Bhaduri, D., Sihi, D., Bhowmik, A., Verma, B. C., Munda, S., y Dari, B. (2022). A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Frontier in Microbiology* 13, 938481. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481>
- Blaya, J., Lloret, E., Santísima-Trinidad, A. B., Ros, M., y Pascual, J. A. (2015). Molecular methods (digital PCR and real-time PCR) for the quantification of low copy DNA of *Phytophthora nicotianae* in environmental samples. *Pest Management Science*, 72,747-753. <https://doi.org/10.1002/ps.4048>
- Boafo, D. K., Kraisornpornson, B., Panphon, S., Owusu, B. E., y Amaniampong, P. N. (2020). Effect of organic soil amendments on soil quality in oil palm production. *Applied Soil Ecology*, 147, 103358. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.09.008>
- Bongers, T., y Ferris, H. (1999). Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends in Ecology & Evolution*, 14, 224–28. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(98\)01583-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(98)01583-3)
- Brondízio, E. S., Settele, J., Díaz, S. y Ngo, H. T. (Eds) (2019). *Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES Secretariat.
- Brussaard, L., Behan-Pelletier, V. M., Bignell, D. E., Brown, V. K., Didden, W. A. M., Folgarait, P. J., Fragoso, C., Freckman, D. W., Gupta, V. S. R., y Hattori, T. (1997). Biodiversity and ecosystem functioning in soil. *AMBIO A Journal of the Human Environment* 26, 563-570.
- COM/2023/416 (2023) Proposal for a Directive on Soil Monitoring and Resilience. [https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-directive-soil-monitoring-and-resilience\\_en](https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-directive-soil-monitoring-and-resilience_en)
- Cuartero, J., Pascual, J.A., Vivo, J.M., Özbolat, O., Sánchez-Navarro, V., Egea-Cortines, M., Zornoza, R., Mena, M.M., García, E., y Ros, M. (2022a). A first-year melon/cowpea intercropping system improves soil nutrients and changes the soil microbial community. *Agriculture Ecosystem and Environment* 328, 107856. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107856>
- Cuartero, J., Pascual, J.A., Vivo, J.M., Özbolat, O., Sánchez-Navarro, V., Weiss, J., Zornoza, R., Martínez-Mena, M., García, E., y Ros, M. (2022b). Melon/cowpea intercropping pattern influenced the N and C soil cycling and the abundance of soil rare bacterial taxa. *Frontiers in Microbiology* 13, 1004593. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1004593>.
- Delgado Baquerizo, M., Reich, P. B., Trivedi, C., Eldridge, D. J., Abades, S., Alfaro, F. D., Bastida, F., Berhe, A. A., Cutler, N. A., Gallardo, A., García-Velázquez, L., Hart, S. C., Haynes, P. E., He, J. Z., Hseu, Z. Y., Hu, H. W., Kirchmair, M., Neuhauser, S., Pérez, C. A., Reed, S. C., Santos,

- F., Sullivan, B. W., Trivedi, P., ... Singh, B. K. (2020). Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nature Ecology and Evolution*, 4(2), 210-220. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1084-y>
- Doran J. W., y Parkin, T. B. (1996). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. En J. W. Doran y A. J. Jones (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality, Special Publication No. 49* (pp. 25-37). Soil Science Society of America.
- Doran, J. W., y Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 3-11, [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6).
- FAO (2015). Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables. <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721/>
- Fierer, N., Wood, S. A., y Bueno de Mesquita, C. P. (2021). How microbes can, and cannot, be used to assess soil health. *Soil Biology and Biochemistry*, 153, 108111. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108111>.
- Frostegård, A., Tunlid, A., y Bååth, E. (2011). Use and misuse of PLFA measurements in soils. *Soil Biology and Biochemistry* 43, 1621-1625. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.021>
- Hemkemeyer, H., Schwalb, S. A., Heinze, S., Joergensen, R. G., y Wichern, F. (2021). Functions of elements in soil microorganisms, *Microbiological Research*, 252, 126832. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126832>.
- Hernández-Lara, A., Ros, M., Cuartero, J., Vivo, J. M., Lozano-Pastor, P., y Pascual, J.A. (2023). Effects of solarisation combined with compost on soil pathogens and the microbial community in a spinach cropping system *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 346, 108359, DOI: 10.1016/j.agee.2023.108359
- Hopkins, J.R., Semenova-Nelsen, T.A., y Sikes, B.A., (2023). Land management drives dynamic changes to microbial function through edaphic factors and soil biota. *Pedobiologia* (Jena) 96, 150859. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2022.150859>
- Kawanobe, M., Toyota, K., y Ritz, K. (2021). Development and application of a DNA metabarcoding method for comprehensive analysis of soil nematode communities. *Applied Soil Ecology* 166, 103974. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103974>
- Knight, R., Vrbanc, A., Taylor, B. C., Aksenov, A., Callewaert, C., Debelius, J., Gonzalez, A., Kosciolk, T., McCall, L. I., McDonald, D., Melnik, A. V., Morton, J. T., Navas, J., Quinn, R. A., Sanders, J. G., Swafford, A. D., Thompson, L. R., Tripathi, A., Xu, Z. Z., ... Dorrestein, P. C. (2018). Best practices for analysing microbiomes *Nature Reviews Microbiology*, 16, 410-422. <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0029-9>
- Lal, R. (2004). Soil C sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304, 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lavelle, P., y Spain, A.V. (2001). *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-5279-4>
- Liang, S., Deng, J., Jiang, Y., Wu, S., Zhou, Y., y Zhu, W. (2020). Functional distribution of bacterial community under different land use patterns based on FaProTax function prediction. *Polish Journal of environmental Studies* 29,1245-1261. <https://doi.org/10.15244/pjoes/108510>
- Lupatini, M., Suleiman, A. K. A., Jacques, R. J. S., Antonioli, Z. I., de Siqueira Ferreira, A., Kuramae, E. E., y Roesch, L. F. W. (2014). Network topology reveals high connectance levels and few key microbial genera within soils. *Frontiers in Environmental Science* 2, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00010>
- Matchado, M. S., Lauber, M., Reitmeier, S., Kacprowski, T., Baumbach, J., Haller, D., y List, M. (2021). Network analysis methods for studying microbial communities: a mini review. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 19, 2687-2698, <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2021.05.001>
- Müller, M., Oliver, M.A., y Siebe, C. (2023). Overview chapter on soil degradation. En M. J. Goss y M. Oliver (Eds.), *Encyclopedia of Soils in the Environment* (Second Edition) (pp. 165-171). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00270-6>.
- Özbolat, O., Sánchez-Navarro, V., Zornoza, R., Egea-Cortines, M., Cuartero, J., Ros, M., Pascual, J.A., Boix-Fayos, C., Almagro, M., de Vente, J., Díaz-Pereira, E., y Martínez-Mena, M. (2023). Long-term adoption of reduced tillage and green manure improves soil physicochemical properties and increases the abundance of beneficial bacteria in a Mediterranean rainfed almond orchard. *Geoderma*, 429, 116218, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116218>.
- Pascual, J.A., Garcia, C., Hernandez, T., Moreno, J.L., y Ros, M. (2000). Soil Microbial Activity as a biomarker of degradation and remediation processes. *Soil Biology & Biochemistry* 32, 1877-1883. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00161-9)
- Pölme, S., Abarenkov, K., Henrik Nilsson, R., Lindahl, B. D., Engelbrecht Clemmensen, K., Kauserud, H., Nguyen, N., Kjølter, R., Bates, S. T., Baldrian, P., Guldberg Frøsløv, T., Adojaan, K., Vizzini, A., Suija, A., Pfister, D., Baral, H. O., Järv, H., Madrid, H., Nordén, J., ... Tedersoo, L. (2020). Fungal traits: a user-friendly traits database of fungi and fungus-like stramenopiles. *Fungal Diversity* 105, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13225-020-00466-2>
- Porter, T. M., Morris, D.M., Basiliko, N., Hajibabaei, M., Doucet, D., Bowman, S., Emilson, E. J. S., Emilson, C. E., Chartrand, D., Wainio-Keizer, K., Séguin, A., y Venier, L. (2019). Variations in terrestrial arthropod DNA metabarcoding methods recovers robust beta diversity but variable richness and site indicators. *Scientific Reports* 9, 18218. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54532-0>
- Porter, T.M., y Hajibabaei, M. (2018). Scaling up: A guide to high-throughput genomic approaches for biodiversity analysis. *Molecular Ecology*. 27, 313–338. <https://doi.org/10.1111/mec.14478>
- Pulleman, M., Creamer, R., Hamer, U., Helder, J., Pelosi, C., Pérès, G., y Rutgers, M. (2012). Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—an overview of European approaches. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4, 529–538. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.009>

- Raza, S., Irshad, A., Margenot, A., Zamanian, K., Li, N., Ullah, S., Mehmood, K., Khan, M- A., Siddique, N., Zhou, J., Mooney, S. J., Kurganova, I., Zhao, X., y Kuzyakov, Y. (2024). Inorganic carbon is overlooked in global soil carbon research: A bibliometric analysis. *Geoderma* 443, 116831. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116831>
- Ronchi, S., Salata, S., Arcidiacono, A., Piroli, E., y Montanarella, L. (2019). Policy instruments for soil protection among the EU member states: a comparative analysis. *Land Use Policy*, 82, 763–780. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.01.017>
- Ros, M., Pascual, J. A., Hernández, T., García, C., e Insam, H. (2006). Hydrolase activities, microbial biomass and bacterial community structure in a soil after long-term amendment with different compost. *Soil Biology & Biochemistry* 38, 3443-3452 <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.05.017>
- Starr, E. P., Shi, S., Blazewicz, S. J., Probst, A. J., Herman, D. J., Firestone, M. K., y Banfield, J. F. (2018). Stable isotope informed genome-resolved metagenomics reveals that Saccharibacteria utilize microbial-processed plant-derived carbon. *Microbiome* 6, 122. <https://doi.org/10.1186/s40168-018-0499-z>
- Wall, D.H., Bardgett, R.D., y Behan-Pelletier, V. (2012). *Soil Ecology and Ecosystem Services*. Oxford University Press.
- Watts, C., Dopheide, A., y Holdaway, R. (2019). DNA metabarcoding as a tool for invertebrate community monitoring: a case study comparison with conventional techniques. *Austral Entomology* 58, 675–86. <https://doi.org/10.1111/aen.12384>.
- Yarza, P., Yilmaz, P., Pruesse, E., Glöckner, F. O., Ludwig, W., Schleifer, K. H., Whitman, W. B., Euzéby, J., Amann, R., y Rosselló-Móra, R. (2014). Uniting the classification of cultured and uncultured bacteria and archaea using 16S rRNA gene sequences. *Nature Review Microbiology* 12, 635–645. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3330>