

Análisis de microorganismos funcionales y su relación con parámetros fisicoquímicos del suelo en un bosque reservado

Analysis of functional microorganisms and their relationship with physicochemical parameters of soil in a reserved forest

Guillermo Sales-Ordoñez¹; Casiano Aguirre-Escalante¹; Alberto Franco Cerna-Cueva^{1*};
Doive Salvador Ortega-Silva²; Víctor Ernesto Pérez-Hernández³; Nicolas Walter Aguilar-Carazas⁴;
Manuel Emilio Reategui-Inga⁵

- 1 Universidad Nacional Agraria de la Selva, Universitaria km 1.21, Tingo María, Perú.
- 2 Universidad Científica del Sur, Panamericana S 19, Villa EL Salvador 15067, Lima, Perú
- 3 Universidad Cesar Vallejo, Av. Independencia 1488, Huaraz 02002, Lima, Perú.
- 4 Universidad Peruana Cayetano Heredia, Av. Honorio Delgado 430, San Martín de Porres 15102, Lima, Perú.
- 5 Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa, Av. José Carlos Mariátegui Mz.78, Mazamari, Perú.

* Autor correspondiente: alberto.cerna@unas.edu.pe (A. F. Cerna-Cueva).

ORCID de los autores:

G., Sales-Ordoñez: <https://orcid.org/0009-0003-8349-0884>
C., Aguirre-Escalante: <https://orcid.org/0000-0002-6109-4237>
A. F., Cerna-Cueva: <https://orcid.org/0000-0001-7448-558X>
D. S., Ortega-Silva: <https://orcid.org/0000-0001-7347-2808>

V. Pérez-Hernández: <https://orcid.org/0000-0001-5601-7600>
N. W. Aguilar-Carazas: <https://orcid.org/0009-0003-8936-108X>
M. E., Reategui-Inga: <https://orcid.org/0000-0002-5417-6509>

RESUMEN

Este estudio aborda la necesidad de entender la presencia de microorganismos funcionales en suelos tropicales, proporcionando información valiosa para la conservación y manejo sostenible. Tiene como principal objetivo analizar la variabilidad de microorganismos funcionales en diferentes profundidades del suelo y las correlaciones con los parámetros fisicoquímicos. Para ello se recolectaron muestras de suelo de 15 puntos aleatorios en un bosque reservado y se analizaron propiedades fisicoquímicas y microbiológicas a dos profundidades (10 y 20 cm). Se cuantificaron los siguientes microorganismos funcionales: aerobios viables, lactobacilos, actinomicetos, hongos y bacterias fijadoras de nitrógeno utilizando protocolos específicos. Se empleó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para determinar diferencias entre profundidades y el coeficiente de correlación de Pearson ($|\rho| \geq 0,8$) para analizar correlaciones entre parámetros fisicoquímicos y microorganismos. Los resultados sugieren que la abundancia de microorganismos aerobios viables, Lactobacillus, Actinomicetos y Fungi disminuye con la profundidad del suelo, mientras que las bacterias fijadoras de nitrógeno no muestran diferencias significativas. La disminución de la abundancia se relaciona con factores como la disponibilidad de nutrientes y oxígeno y las condiciones microambientales. Existe una correlación positiva fuerte entre la cantidad de microorganismos aerobios viables y Lactobacillus con el contenido de fósforo, y una correlación negativa entre Actinomicetos y el contenido de Arcilla. Los Actinomicetos prefieren suelos arenosos, mientras que los Fungi prosperan en suelos ricos en materia orgánica. La correlación negativa entre Fungi y Actinomicetos sugiere competencia por recursos limitados y posibles interacciones químicas, como la producción de compuestos antibióticos por parte de los Actinomicetos. Este estudio demuestra que la comprensión detallada de la microbiota del suelo puede ofrecer nuevas oportunidades para mejorar las prácticas agrícolas, especialmente en términos de la fertilidad del suelo y sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: Microorganismos funcionales; suelos tropicales; profundidad del suelo; conservación y manejo sostenible.

ABSTRACT

This study addresses the need to understand the presence of functional microorganisms in tropical soils, providing valuable information for conservation and sustainable management. The main objective is to analyze the variability of functional microorganisms at different soil depths and their correlations with physicochemical parameters. To this end, soil samples were collected from 15 random points in a reserved forest and analyzed for physicochemical and microbiological properties at two depths (10 and 20 cm). The following functional microorganisms were quantified: viable aerobes, lactobacilli, actinomycetes, fungi, and nitrogen-fixing bacteria using specific protocols. The non-parametric Wilcoxon test was used to determine differences between depths, and the Pearson correlation coefficient ($|\rho| \geq 0.8$) was used to analyze correlations between physicochemical parameters and microorganisms. The results suggest that the abundance of viable aerobic microorganisms, Lactobacillus, Actinomycetes, and Fungi decreases with soil depth, while nitrogen-fixing bacteria show no significant differences. The decrease in abundance is related to factors such as nutrient and oxygen availability and microenvironmental conditions. There is a strong positive correlation between the amount of viable aerobic microorganisms and Lactobacillus with phosphorus content, and a negative correlation between Actinomycetes and clay content. Actinomycetes prefer sandy soils, while Fungi thrive in soils rich in organic matter. The negative correlation between Fungi and Actinomycetes suggests competition for limited resources and possible chemical interactions, such as the production of antibiotic compounds by Actinomycetes. This study demonstrates that a detailed understanding of soil microbiota can offer new opportunities to improve agricultural practices, especially in terms of soil fertility management and environmental sustainability.

Keywords: Functional microorganisms; tropical soils; soil depth; conservation and sustainable management.

Recibido: 10-12-2023.

Aceptado: 08-02-2024.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

Los suelos son el hábitat de una gran diversidad de microorganismos que juegan un papel crucial en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, incluyendo la descomposición de la materia orgánica, el ciclo de nutrientes y la promoción del crecimiento de las plantas (Hartmann & Six, 2022). En los últimos años, ha habido un creciente interés en el estudio de los grupos microbianos funcionales del suelo y su relación con los parámetros fisicoquímicos del suelo (Bastida et al., 2021). Esto se debe a que la comprensión de estas relaciones es fundamental para predecir la respuesta de los ecosistemas del suelo a los cambios ambientales y para desarrollar prácticas de manejo sostenible (Gayan et al., 2023).

A pesar de la creciente investigación en el campo, todavía hay brechas significativas en nuestro conocimiento sobre cómo los distintos parámetros fisicoquímicos del suelo influyen en los grupos microbianos funcionales en diferentes bosques tropicales (Zhao et al., 2022). En particular, en el caso de los bosques reservados, que son áreas protegidas de importancia ecológica y conservación, los estudios que abordan estas relaciones son escasos o limitados.

Este estudio plantea la hipótesis de que los parámetros fisicoquímicos del suelo, como el contenido de nutrientes, la textura y el pH, están significativamente relacionados con la abundancia

de los grupos microbianos funcionales en un bosque reservado.

El objetivo principal de este estudio es analizar los grupos microbianos funcionales del suelo y su relación con los parámetros fisicoquímicos del suelo en un bosque reservado, utilizando técnicas de recuento de microorganismos y estadísticas avanzadas. Específicamente, este estudio pretende (a) analizar los valores de los parámetros fisicoquímicos de suelo a dos profundidades de estudio y las correlaciones entre estas y (b) evaluar la abundancia de grupos microbianos funcionales en dos profundidades de suelo y las relaciones entre los parámetros fisicoquímicos del suelo. Los resultados de este estudio contribuirán a la comprensión de las interacciones entre los microorganismos del suelo y los parámetros fisicoquímicos en los bosques reservados con condiciones similares, proporcionando información valiosa para la conservación y manejo sostenible de estos ecosistemas tropicales. El equilibrio de microorganismos en el suelo es un factor crucial para mantener la fertilidad y la salud del suelo, lo cual es de vital importancia en prácticas agrícolas sostenibles. Este estudio proporciona información valiosa sobre cómo este equilibrio puede ser afectado por diversos factores fisicoquímicos, ofreciendo así insights para optimizar las prácticas de cultivo.

METODOLOGÍA

El presente estudio se llevó a cabo en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), cuya vegetación son bosques de colina alta, dentro de la ecorregión Bosque

basimontano de Yunga en la ciudad de Tingo María, Provincia de Leoncio Prado, Departamento de Huánuco, Perú (Figura 1).

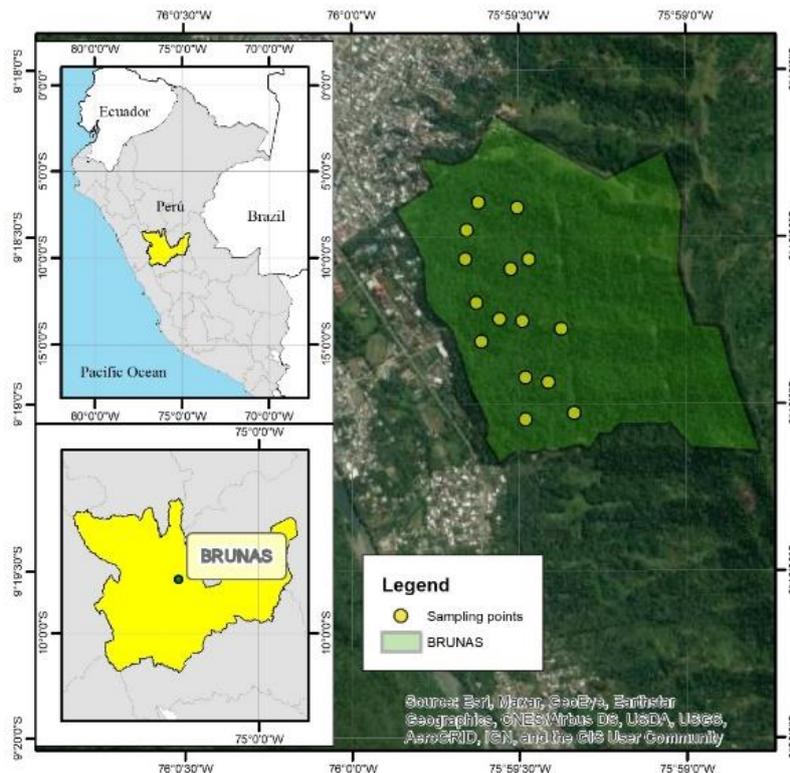


Figura 1. Ubicación de la investigación y puntos de muestreo.

El BRUNAS se caracteriza por suelos cambisoles éutricos y una altitud promedio de 786 metros sobre el nivel del mar. La zona es húmeda con una precipitación anual promedio de 3,456 mm. Las temperaturas máximas y mínimas varían, en promedio desde 30,8 °C hasta los 19,6 °C respectivamente, lo que favorece la diversidad de flora y fauna, así como el desarrollo de microorganismos funcionales en el suelo. Las muestras se recogieron de 15 puntos distribuidos aleatoriamente en el BRUNAS, abarcando un rango de altitudes que oscilaban entre los 733 y los 852 msnm. Se evitó tomar muestras en zonas rocosas y con densa vegetación para garantizar la representatividad del área de estudio. Para la recolección de las muestras, se extrajeron cubos de suelo de un área superficial de 20 x 25 cm y una profundidad de 20 cm utilizando palas esterilizadas, con el objetivo de prevenir la contaminación microbiológica. Posteriormente, los cubos de suelo se colocaron en macetas recubiertas con bolsas de viveros, respetando las dimensiones mencionadas.

Una vez recolectadas, las muestras fueron trasladadas al laboratorio de calidad de suelos y de microbiología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva para su análisis. En el laboratorio, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo a dos profundidades distintas: 10 y 20 cm. Para los análisis fisicoquímicos, las muestras de suelo se trituraron y tamizaron utilizando una malla de 2 mm y se secaron a temperatura ambiente bajo sombra durante un día. Este proceso permitió eliminar partículas gruesas y facilitó la realización de pruebas fisicoquímicas en el suelo. En cuanto a los análisis microbiológicos, las muestras de suelo se tamizaron con una malla de 0.15 mm y se trabajó con la muestra húmeda de manera inmediata para preservar la viabilidad de los microorganismos presentes.

En este estudio se cuantificaron microorganismos aerobios viables, lactobacilos, actinomicetos, hongos (mohos y levaduras) y bacterias fijadoras de nitrógeno en muestras de suelo utilizando protocolos específicos para cada grupo de microorganismos. A continuación, se describe la metodología unificada empleada para todos los grupos:

Inicialmente, se pesaron 10 gramos de muestra de suelo y se añadieron a un matraz que contenía 90 ml de agua peptonada al 0,1%, obteniendo una dilución 10^{-1} . Luego, se realizaron diluciones seriadas hasta obtener las diluciones deseadas para cada grupo de microorganismos. Para la

siembra, se emplearon medios de cultivo específicos para cada grupo de microorganismos: Agar PCA para microorganismos aerobios viables, Agar MRS para lactobacilos, Agar Gauze para actinomicetos, Agar Sabouraud para hongos y Agar Simms para bacterias fijadoras de nitrógeno. Se tomó 0.1 ml de inóculo de cada dilución y se sembró en las placas de agar correspondientes utilizando el método de siembra en superficie. Las condiciones de incubación variaron según el grupo de microorganismos: 30 °C durante 48 horas para microorganismos aerobios viables, 37 °C durante 72 horas para lactobacilos, 28 °C durante 7 días para actinomicetos, 25 °C durante 5 días para hongos y 28 °C durante 7 días para bacterias fijadoras de nitrógeno. Después del período de incubación, se procedió a contar las colonias que crecieron en las placas utilizando un equipo de conteo. Se aseguró de que el número de colonias estuviera dentro del rango de 30 a 300 colonias por placa y se calculó el promedio de colonias entre las dos placas duplicadas. La cantidad de microorganismos por gramo de muestra se determinó aplicando la siguiente fórmula general:

$$UFC/g = \frac{\text{Número de colonias}}{\text{Inoculo de siembra} \times \text{Factor de dilución}} \quad (1)$$

Los microorganismos por gramo de suelo se expresaron en unidades formadoras de colonias por gramo (UFC/g).

En este estudio, se analizaron los parámetros fisicoquímicos del suelo y los microorganismos funcionales en dos profundidades diferentes (10 cm y 20 cm) para evaluar la variación en sus concentraciones y su correlación con otros parámetros. Para determinar las diferencias en los valores de las mediciones de los parámetros en las distintas profundidades, se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon, debido a que, según el análisis exploratorio de datos, la mayoría de los parámetros no se ajustan a una distribución normal. Además, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson para analizar las correlaciones entre los diferentes parámetros fisicoquímicos, así como entre estos y los microorganismos funcionales del suelo. Solo se consideraron aquellas correlaciones cuyo valor absoluto superara el umbral de $|\rho| \geq 0,8$. Asimismo, se analizó la correlación entre el conteo de los diferentes grupos funcionales de microorganismos. Estos análisis ayudarán a comprender cómo varían los parámetros del suelo y la presencia de microorganismos funcionales con la profundidad, y cómo están interrelacionados entre sí y con otros parámetros del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de parámetros fisicoquímicos

Arena (%)

En la Figura 1 se observa una correlación negativa entre el porcentaje de arena y el fósforo disponible (ppm) ($\rho = -0,91$) a una profundidad de 20 cm. Esta correlación podría deberse a la menor capacidad de retención de nutrientes en suelos arenosos en comparación con suelos con mayor contenido de

arcilla o limo (Nieder et al., 2018). Los suelos arenosos tienen menor capacidad de retención de agua y menor área superficial para la adsorción de nutrientes, lo que puede resultar en una menor disponibilidad de fósforo en el suelo (Brady & Weil, 2016).

Además, también se observa una correlación negativa entre el porcentaje de arena y la capacidad

de intercambio catiónico (CIC) ($\rho = -0,98$) a una profundidad de 20 cm. La CIC es una medida de la capacidad del suelo para retener y liberar cationes, incluidos los nutrientes esenciales para las plantas como el calcio, el magnesio y el potasio. Los suelos con alto contenido de arcilla y materia orgánica tienden a tener una mayor CIC, ya que estos componentes tienen una mayor superficie y carga negativa para atraer y retener cationes (Nieder et al., 2018). Por lo tanto, es esperable que, en suelos con mayor contenido de arena, la CIC sea menor.

Arcilla (%)

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra una diferencia significativa en el contenido de arcilla entre las dos profundidades evaluadas ($22,47 \pm 0,93$ a 10 cm y $33,2 \pm 2,04$ a 20 cm, $p < 0,01$). Esto podría deberse a procesos de meteorización y lixiviación, donde las partículas de arcilla, siendo más finas y pesadas que las de arena, tienden a acumularse en capas más profundas del suelo. Además, la formación de agregados de arcilla puede ser más común en profundidades mayores debido a una menor perturbación y a la presencia de materia orgánica que favorece la agregación.

En la Figura 1 se aprecia una correlación positiva entre el porcentaje de arcilla y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) ($\rho = 0,90$) a una profundidad de 20 cm. La CIC es una medida de la capacidad del suelo para retener y liberar cationes, incluidos los nutrientes esenciales para las plantas como el calcio, el magnesio y el potasio. Los suelos con alto contenido de arcilla y materia orgánica tienden a tener una mayor CIC, ya que estos componentes tienen una mayor superficie y carga negativa para atraer y retener cationes (Brady & Weil, 2016; Nieder et al., 2018).

La correlación positiva observada puede atribuirse a las propiedades físicas y químicas de las partículas de arcilla. Estas partículas son más pequeñas y tienen una mayor superficie específica en comparación con las partículas de arena y limo. Además, las partículas de arcilla tienen una mayor carga negativa en su superficie, lo que les permite atraer y retener más cationes (Brady & Weil, 2016). Por lo tanto, es esperable que, en suelos con mayor contenido de arcilla, la CIC sea mayor.

Limo (%)

La Tabla 1 indica que no hay una diferencia significativa en el contenido de limo entre las dos profundidades evaluadas ($20,33 \pm 1,25$ a 10 cm y $16,6 \pm 0,92$ a 20 cm, $p = 0,07$). Aunque no es significativa, la disminución del contenido de limo en profundidades mayores podría deberse a la distribución de partículas de suelo y a la influencia de factores como la erosión, la sedimentación y la lixiviación, que pueden afectar la concentración de limo en diferentes capas del suelo.

La correlación negativa entre el porcentaje de limo y el porcentaje de materia orgánica ($\rho = -0,85$) puede estar relacionada con la capacidad de retención de agua y nutrientes del suelo. Los suelos con alto contenido de limo tienen una capacidad de retención de agua y nutrientes intermedia entre los suelos arenosos y arcillosos (Xu et al., 2016). Por lo

tanto, es posible que, en suelos con un mayor porcentaje de limo, se retenga menos materia orgánica en comparación con suelos arcillosos, que tienen una mayor capacidad de retención. La correlación positiva entre el porcentaje de limo y el fósforo disponible en ppm ($\rho = 0,89$), sugiere que los suelos con mayor contenido de limo pueden tener una mayor disponibilidad de fósforo. Esto podría deberse a la capacidad de retención intermedia de nutrientes en suelos limosos, lo que podría favorecer la disponibilidad de fósforo para las plantas (Brady & Weil, 2016). La correlación positiva entre el porcentaje de limo y el calcio intercambiable en meq/100g ($\rho = 0,96$) indica que, en suelos con mayor contenido de limo, hay una mayor cantidad de calcio disponible para las plantas. Esto podría deberse a la capacidad de retención intermedia de nutrientes en suelos limosos y a las interacciones químicas entre el limo y el calcio en el suelo (Schjønning et al., 1999).

pH

La Tabla 1 muestra una diferencia significativa en el pH del suelo entre las dos profundidades evaluadas ($3,11 \pm 0,05$ a 10 cm y $3,49 \pm 0,04$ a 20 cm, $p < 0,01$). Este aumento en el pH en las capas más profundas podría deberse a la menor concentración de ácidos orgánicos, la menor actividad microbiana y la menor influencia de procesos como la lixiviación y la descomposición de la materia orgánica en comparación con las capas superficiales del suelo.

La correlación entre el potasio disponible (ppm) y el pH a una profundidad de 10 cm muestra un valor negativo de $\rho = -0,86$, lo que indica una relación inversa entre estas dos variables. Esto significa que a medida que el pH del suelo disminuye (ácido), el contenido de potasio disponible tiende a aumentar, y viceversa. Esta relación inversa podría ser explicada por el hecho de que, en suelos ácidos, la liberación de potasio de los minerales del suelo puede ser mayor debido a la disolución y la desorción del potasio de la arcilla y otros minerales (Bader et al., 2021). Además, algunos estudios han demostrado que el potasio disponible en el suelo puede ser afectado por la solubilidad de los minerales de arcilla y la adsorción/desorción de iones de potasio en sitios de intercambio catiónico, los cuales pueden estar influenciados por el pH (Marschner, 2011; Sparks, 2002).

Materia Orgánica (%)

La Tabla 1 indica una diferencia significativa en el contenido de materia orgánica entre las dos profundidades evaluadas ($2,94 \pm 0,08$ a 10 cm y $2,26 \pm 0,05$ a 20 cm, $p < 0,01$). La disminución en el contenido de materia orgánica en profundidades mayores podría deberse a una menor acumulación de residuos vegetales y animales, así como a una menor actividad microbiana. En general, la materia orgánica tiende a concentrarse en las capas superiores del suelo, donde hay mayor disponibilidad de nutrientes y más interacción con el ambiente.

Correlación entre H intercambiable (meq/100 g) y materia orgánica (%) a una profundidad de 10 cm:

La correlación positiva de $\rho = 0,88$ sugiere que a medida que aumenta el contenido de H intercambiable en el suelo, también lo hace el contenido de materia orgánica. Esta relación puede ser explicada por la influencia del contenido de materia orgánica en el pH del suelo y, a su vez, en la concentración de H intercambiable. A medida que la materia orgánica se descompone, libera ácidos orgánicos que pueden disminuir el pH del suelo y aumentar la concentración de H intercambiable (Brady & Weil, 2016). Correlación entre materia orgánica (%) y nitrógeno (%) a una profundidad de 20 cm: La correlación positiva de $\rho = 0,81$ indica que a medida que aumenta el contenido de materia orgánica en el suelo, también lo hace el contenido de nitrógeno. Esto es consistente con la idea de que la materia orgánica es una fuente importante de nitrógeno en el suelo, ya que, al descomponerse, libera nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) y otros compuestos nitrogenados (Stevenson & Cole, 1999). Correlación entre materia orgánica (%) y Ca intercambiable (meq/100 g) a una profundidad de 20 cm: La correlación negativa de $\rho = -0,94$ sugiere que a medida que aumenta el contenido de materia orgánica en el suelo, disminuye el contenido de Ca intercambiable. Esta relación podría estar relacionada con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, que puede estar influenciada por el contenido de materia orgánica. A medida que aumenta la materia orgánica, la CIC puede aumentar, lo que a su vez puede conducir a una mayor adsorción de cationes como el Ca y, en última instancia, a una menor concentración de Ca intercambiable en el suelo (Brady & Weil, 2016).

Nitrógeno (%)

La Tabla 1 muestra una diferencia significativa en el contenido de nitrógeno entre las dos profundidades evaluadas ($0,15 \pm 0$ a 10 cm y $0,11 \pm 0$ a 20 cm, $p < 0,01$). La disminución en el contenido de nitrógeno en profundidades mayores podría estar relacionada con la menor concentración de materia orgánica y la menor actividad microbiana, ya que ambos factores influyen en la disponibilidad de nitrógeno en el suelo. Además, procesos como la lixiviación y la desnitrificación pueden contribuir a la pérdida de nitrógeno en capas más profundas del suelo.

Correlación entre saturación de aluminio (%) y nitrógeno (%) a 10 cm de profundidad: La correlación negativa de $\rho = -0,82$ indica que a medida que aumenta la saturación de aluminio en el suelo, el contenido de nitrógeno disminuye. Esta relación puede ser explicada por el efecto del aluminio en la disponibilidad de nitrógeno y en la actividad microbiana responsable de la mineralización del nitrógeno. El aluminio, en condiciones ácidas, puede solubilizarse y ser tóxico para las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo, lo que afecta la absorción de nutrientes como el nitrógeno y disminuye la actividad microbiana responsable de la mineralización y disponibilidad del nitrógeno en el suelo (Foy, 2015; Kinraide, 1991). Por lo tanto, suelos con alta saturación de aluminio tienden a tener menor contenido de nitrógeno.

Fósforo disponible (ppm)

La Tabla 1 no muestra una diferencia significativa en el contenido de fósforo disponible entre las dos profundidades evaluadas ($7,17 \pm 0,58$ ppm a 10 cm y $7,36 \pm 0,56$ ppm a 20 cm, $p = 0,95$). Esto sugiere que el fósforo disponible en el suelo podría estar distribuido de manera bastante uniforme entre estas dos profundidades. La solubilización del fósforo por parte de microorganismos y la descomposición de la materia orgánica pueden influir en la disponibilidad de fósforo en estas capas del suelo. Además, la interacción entre el fósforo y otros componentes del suelo, como el óxido de aluminio, puede afectar su movilidad y distribución en el perfil del suelo.

Correlación entre H intercambiable (meq/100 g) y fósforo disponible (ppm) a 10 cm de profundidad: La correlación positiva de $\rho = 0,93$ sugiere que a medida que aumenta la concentración de H intercambiable en el suelo, también lo hace el contenido de fósforo disponible. Esto puede ser el resultado de la liberación de fósforo inorgánico por parte de la actividad microbiana, que se ve afectada por la acidez del suelo (H^+). A medida que aumenta la concentración de H^+ en el suelo, la solubilización y disponibilidad de fósforo pueden aumentar (Condron et al., 2015). Correlación entre fósforo disponible (ppm) y Ca intercambiable (meq/100 g) a 20 cm de profundidad: La correlación positiva de $\rho = 0,87$ indica que a medida que aumenta el contenido de fósforo disponible en el suelo, también aumenta la concentración de Ca intercambiable. Esto puede deberse a que ambos elementos están asociados con la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Barrow, 2015). Correlación entre fósforo disponible (ppm) y capacidad de intercambio catiónico a 20 cm de profundidad: La correlación positiva de $\rho = 0,89$ sugiere que a medida que aumenta el contenido de fósforo disponible en el suelo, también lo hace la capacidad de intercambio catiónico. Esto puede estar relacionado con la mayor disponibilidad de sitios de intercambio catiónico en el suelo y la liberación de fósforo inorgánico por la actividad microbiana (Barrow, 2015).

Potasio disponible (ppm)

La Tabla 1 no muestra una diferencia significativa en el contenido de potasio disponible entre las dos profundidades evaluadas ($73,47 \pm 0,9$ ppm a 10 cm y $70,33 \pm 2,31$ ppm a 20 cm, $p = 0,278$). Esto indica que el potasio disponible en el suelo podría estar distribuido de manera similar entre las capas de 10 cm y 20 cm de profundidad. La distribución del potasio en el suelo puede estar influenciada por la descomposición de la materia orgánica, la actividad microbiana y las reacciones de intercambio catiónico con otros minerales del suelo. La movilidad del potasio en el suelo generalmente es limitada, lo que puede contribuir a la distribución uniforme observada en estas profundidades. Correlación entre potasio disponible (ppm) y saturación de aluminio (%) a 20 cm de profundidad: La correlación positiva de $\rho = 0,88$ sugiere

que a medida que aumenta la concentración de potasio disponible en el suelo, también lo hace la saturación de aluminio. Este resultado puede estar relacionado con la acidez del suelo y la liberación de aluminio. A medida que la concentración de iones de hidrógeno (H⁺) en el suelo aumenta, la solubilidad de los compuestos de aluminio también puede aumentar, lo que puede llevar a una mayor saturación de aluminio (Kopittke et al., 2019). El potasio y el aluminio pueden competir por los sitios de intercambio catiónico en el suelo, lo que podría explicar la correlación positiva entre ambos elementos (Sparks, 2002).

Mg Intercambiable

La Tabla 1 indica una diferencia significativa en el contenido de magnesio intercambiable entre las dos profundidades evaluadas ($0,14 \pm 0$ meq/100g a 10 cm y $0,12 \pm 0$ meq/100g a 20 cm, $p < 0,05$). La disminución en el contenido de magnesio intercambiable en profundidades mayores podría estar relacionada con la liberación de magnesio a través de la meteorización de minerales y la descomposición de la materia orgánica. La lixiviación y la interacción con otros componentes del suelo, como la arcilla y los ácidos orgánicos, también pueden influir en la distribución del magnesio intercambiable en el perfil del suelo en profundidades mayores pueden favorecer la retención e intercambio de calcio en el suelo.

Correlación entre capacidad de intercambio catiónico y Mg intercambiable (meq/100 g) a 10 cm de profundidad: La correlación positiva de $\rho = 0,84$ indica que a medida que la CIC aumenta, también lo hace la concentración de Mg intercambiable. Esto es esperable, ya que la CIC es una medida de la capacidad del suelo para retener e intercambiar cationes, incluidos los de magnesio (Sparks, 2002). Suelos con una mayor CIC pueden tener una mayor capacidad para almacenar y liberar magnesio en el suelo.

Correlación entre Mg intercambiable (meq/100 g) y H intercambiable (meq/100 g) a 20 cm de profundidad: La correlación positiva de $\rho = 0,82$ sugiere que a medida que aumenta la concentración de Mg intercambiable en el suelo, también lo hace la concentración de H intercambiable. Este resultado puede deberse a que tanto el magnesio como los iones de hidrógeno compiten por los sitios de intercambio catiónico en el suelo (Sparks, 2002). Además, ambos elementos pueden estar influenciados por factores ambientales similares, como la acidez del suelo y la presencia de otros cationes en el suelo.

Bases cambiables (%)

La Tabla 1 muestra una diferencia significativa en el porcentaje de bases cambiables entre las dos profundidades evaluadas ($15,6 \pm 0,38\%$ a 10 cm y $19 \pm 0,28\%$ a 20 cm, $p < 0,01$). El aumento en el porcentaje de bases cambiables en las capas más profundas del suelo podría deberse a una mayor concentración de cationes como calcio (Ca) y magnesio (Mg) en estas capas. La meteorización de minerales, la descomposición de la materia orgánica y la retención e intercambio de cationes por la arcilla y otros componentes del suelo pueden contribuir a este incremento en las bases cambiables. Un mayor porcentaje de bases cambiables en profundidades mayores puede indicar una mayor capacidad del suelo para retener nutrientes y resistir la acidificación.

Correlación entre bases cambiables (%) y saturación de aluminio (%): La correlación negativa de $\rho = -0,87$ indica que a medida que las bases cambiables aumentan, la saturación de aluminio disminuye. Las bases cambiables en el suelo incluyen cationes como calcio, magnesio, potasio y sodio. Estos cationes compiten con el aluminio por los sitios de intercambio catiónico en las partículas del suelo (Brady & Weil, 2016).

Tabla 1

Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos de suelo \pm el E.E.M. y probabilidad de diferencias de los promedios de los parámetros fisicoquímicos de suelo

Variables observadas	Profundidad (cm)						p - valor ^a
	10		20				
Parámetros fisicoquímicos							
Arena (%)	57,20	\pm 2,15	50,27	\pm 2,75			< 0,05
Arcilla (%)	22,47	\pm 0,93	33,20	\pm 2,04			< 0,01
Limo (%)	20,33	\pm 1,25	16,60	\pm 0,92			0,070
pH	3,11	\pm 0,05	3,49	\pm 0,04			< 0,01
Materia Orgánica (%)	2,94	\pm 0,08	2,26	\pm 0,05			< 0,01
Nitrógeno (%)	0,15	\pm 0,00	0,11	\pm 0,00			< 0,01
Fosforo Disponible (ppm)	7,17	\pm 0,58	7,36	\pm 0,56			0,950
Potasio Disponible (ppm)	73,47	\pm 0,90	70,33	\pm 2,31			0,278
Ca Intercambiable (meq/100g)	0,85	\pm 0,00	1,02	\pm 0,03			< 0,01
Mg Intercambiable (meq/100g)	0,14	\pm 0,00	0,12	\pm 0,00			< 0,05
Al Intercambiable (meq/100g)	4,69	\pm 0,11	4,36	\pm 0,12			0,089
H Intercambiable (meq/100g)	0,67	\pm 0,10	0,33	\pm 0,06			< 0,05
Capacidad de intercambio catiónico	6,35	\pm 0,16	5,83	\pm 0,13			< 0,05
Bases Cambiables (%)	15,60	\pm 0,38	19,00	\pm 0,28			< 0,01
Ácidos Cambiables (%)	84,40	\pm 0,38	81,00	\pm 0,28			< 0,01
Saturación de Aluminio (%)	74,00	\pm 1,46	74,93	\pm 1,14			0,708
Conteo (UFC/g)							
Microorganismo Aerobios Viables	$2,5 \times 10^4$	\pm $1,7 \times 10^3$	$1,6 \times 10^4$	\pm $4,9 \times 10^2$			< 0,01
Lactobacillus	0	\pm 0	$1,2 \times 10^3$	\pm $2,0 \times 10^2$			< 0,01
Actinomicetos	$5,0 \times 10^4$	\pm $1,4 \times 10^3$	$2,1 \times 10^4$	\pm $6,3 \times 10^3$			< 0,01
Fungi (Mohos y Levaduras)	$8,7 \times 10^3$	\pm $4,5 \times 10^2$	$6,9 \times 10^3$	\pm $3,6 \times 10^2$			< 0,05
Bacterias fijadoras de nitrógeno	$9,7 \times 10^3$	\pm $3,7 \times 10^2$	$9,4 \times 10^3$	\pm $4,7 \times 10^2$			0,635

^a Prueba de Wilcoxon de rangos.

Cuando las bases cambiables son abundantes, pueden desplazar al aluminio de los sitios de intercambio, reduciendo la saturación de aluminio en el suelo. Además, la presencia de cationes básicos puede aumentar el pH del suelo, lo que disminuye la solubilidad del aluminio y, por lo tanto, su saturación en el suelo.

Microorganismos funcionales y correlación con los parámetros fisicoquímicos del suelo y profundidad

Microorganismos aerobios viables y Lactobacillus

De acuerdo con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la cantidad de microorganismos aerobios viables disminuye significativamente (p -valor $< 0,01$) de $2,5 \times 10^4 \pm 1,7 \times 10^3$ a $1,6 \times 10^4 \pm 4,9 \times 10^3$ cuando se compara la profundidad de 10 cm con la de 20 cm, esta influencia de la profundidad del suelo a la abundancia relativa de microorganismos es coherente con los estudios de (Hao et al., 2021; Xu et al., 2021; Zhao et al., 2021). El aumento del conteo de Lactobacillus con la profundidad puede explicarse porque la demanda de nutrientes de estos microorganismos es alta y solo se disponga de los nutrientes necesarios en las capas más bajas. Como se aprecia en la Figura 2, hay una correlación positiva fuerte ($\rho = 0,91$) entre la cantidad de microorganismos aerobios viables y el contenido de fósforo a 10 cm de profundidad. Además, se observa una correlación similar ($\rho = 0,90$) entre la presencia de Lactobacillus y el fósforo disponible. Esta relación podría deberse a que los Lactobacillus desempeñan un papel importante en la liberación de fósforo en el suelo. Estos microorganismos pueden transformar el fósforo orgánico en fósforo inorgánico (disponible para las plantas) a través de procesos como la mineralización y la solubilización del fósforo (Xia et al., 2020).

Actinomicetos

La disminución en el conteo de actinomicetos con la profundidad del suelo ($5,0 \times 10^4 \pm 1,4 \times 10^3$ a 10 cm y $2,1 \times 10^4 \pm 6,3 \times 10^3$ a 20 cm, $p < 0,01$) podría deberse a una menor disponibilidad de nutrientes y oxígeno en las capas más profundas. Los actinomicetos son microorganismos que descomponen la materia orgánica, y la concentración de materia orgánica tiende a ser mayor en las capas superficiales del suelo. Además, las condiciones aeróbicas también disminuyen con la profundidad, lo que podría afectar negativamente a estos microorganismos que requieren oxígeno para su crecimiento y actividad metabólica.

En la Figura 2 se observa que hay una correlación positiva fuerte ($\rho = 0,83$) entre la cantidad de Actinomicetos y el contenido de Arena (%) a 10 cm de profundidad. Por otro lado, hay una correlación negativa fuerte ($\rho = -0,89$) entre la cantidad de Actinomicetos y el contenido de Arcilla (%) a la misma profundidad. La relación entre los Actinomicetos y las proporciones de Arena y Arcilla en el suelo puede explicarse considerando las características físicas y químicas de estos

componentes del suelo y cómo afectan el crecimiento y la actividad de los Actinomicetos. Los Actinomicetos son un grupo de microorganismos Grampositivos que presentan características tanto de bacterias como de hongos, siendo importantes productores de enzimas extracelulares y metabolitos secundarios con actividad antimicrobiana (Davelos et al., 2004). La textura del suelo, que está determinada por las proporciones de Arena, Arcilla y Limo, influye en las propiedades físicas y químicas del suelo, como la porosidad, la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes, y, en consecuencia, afecta el crecimiento y la actividad de los microorganismos, incluidos los Actinomicetos. Los suelos con mayor contenido de Arena suelen tener una mayor porosidad y una menor capacidad de retención de agua que los suelos con mayor contenido de Arcilla (Brady & Weil, 2016). La mayor porosidad de los suelos arenosos puede favorecer el crecimiento de Actinomicetos, ya que proporciona un mayor espacio para el movimiento de aire y agua y permite un mejor acceso a los nutrientes y el intercambio de gases (Oxígeno y Dióxido de Carbono) entre las células microbianas y su entorno (Rajkumar et al., 2010). Por otro lado, los suelos con mayor contenido de Arcilla tienen una menor porosidad y una mayor capacidad de retención de agua, lo que puede dificultar el crecimiento de Actinomicetos debido a la menor disponibilidad de oxígeno y el aumento en la competencia por los recursos limitados (Rajkumar et al., 2010). Además, la alta capacidad de intercambio catiónico de los suelos arcillosos puede afectar la disponibilidad de nutrientes para los Actinomicetos, ya que los cationes de nutrientes pueden quedar atrapados en la estructura de la Arcilla y no estar fácilmente disponibles para los microorganismos (Brady & Weil, 2016).

Fungi (Mohos y Levaduras)

De acuerdo con la Tabla 1, la cantidad de Fungi (Mohos y Levaduras) disminuye significativamente (p -valor $< 0,05$) de $8,7 \times 10^3 \pm 4,5 \times 10^2$ a $6,9 \times 10^3 \pm 3,6 \times 10^2$ cuando se compara la profundidad de 10 cm con la de 20 cm. La disminución en la abundancia de Fungi (Mohos y Levaduras) con el aumento de la profundidad del suelo puede ser el resultado de varios factores que influyen en el crecimiento y la actividad de estos microorganismos en diferentes profundidades del suelo. Uno de estos factores es la disponibilidad de nutrientes y materia orgánica. La capa superior del suelo (0-10 cm) suele tener una mayor concentración de materia orgánica y nutrientes, ya que es donde se acumulan y descomponen los residuos vegetales y animales (Wang et al., 2017). Los hongos, incluidos los mohos y las levaduras, desempeñan un papel clave en la descomposición de la materia orgánica y la liberación de nutrientes en el suelo, lo que les permite prosperar en la capa superior del suelo donde hay una mayor disponibilidad de estos recursos (Six et al., 2006). Además, las condiciones microambientales, como la humedad, el oxígeno y la temperatura, pueden variar considerablemente entre diferentes profundidades del suelo y afectar

Figura 2. Correlaciones entre variables de suelo (parámetros fisicoquímicos y conteo de microorganismos). En el triángulo superior izquierdo se presentan las correlaciones entre las variables a 10 cm de profundidad y en el triángulo inferior derecho se presentan las correlaciones entre las variables a 20 cm de profundidad.

Fungi y Actinomicetos son conocidos por desempeñar roles importantes en la descomposición de la materia orgánica y la liberación de nutrientes en el suelo (Swift et al., 1979). Sin embargo, estos dos grupos de microorganismos pueden tener preferencias distintas en cuanto al tipo de sustrato y las condiciones ambientales necesarias para su crecimiento y actividad (De Boer et al., 2005). Por ejemplo, los hongos son más eficientes en la descomposición de compuestos orgánicos complejos, como la lignina, mientras que los actinomicetos pueden ser más efectivos en la descomposición de compuestos orgánicos más simples, como la celulosa (Baldrian, 2008). La competencia por recursos limitados, como el carbono orgánico, puede dar lugar a una correlación negativa entre la abundancia de Fungi y Actinomicetos. Por ejemplo, un estudio de De Boer et al. (2005) encontró una correlación negativa entre la biomasa de hongos y la biomasa de bacterias en el suelo, lo que sugiere que la competencia por recursos limitados puede afectar la distribución y abundancia de estos dos grupos de microorganismos en el suelo.

La correlación negativa entre Fungi (Mohos y Levaduras) y Actinomicetos también podría estar relacionada con las interacciones químicas entre estos dos grupos de microorganismos. Por ejemplo, los actinomicetos son conocidos por producir compuestos antibióticos y antifúngicos que pueden inhibir el crecimiento y la actividad de los hongos (Schroeckh et al., 2009). Por lo tanto, la presencia de actinomicetos en el suelo podría tener un impacto negativo en la abundancia y actividad de los hongos, lo que podría explicar, al menos en parte, la correlación negativa observada entre estos dos grupos de microorganismos.

Además, es importante tener en cuenta que la correlación observada entre Fungi y Actinomicetos en este estudio es específica para la profundidad de 10 cm. Futuras investigaciones podrían explorar cómo varía esta correlación a diferentes profundidades del suelo y en diferentes tipos de suelo, lo que podría proporcionar información adicional sobre las interacciones entre estos dos grupos de microorganismos y su distribución en el suelo.

CONCLUSIONES

Existe una correlación negativa entre el porcentaje de arena y el fósforo disponible y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) a una profundidad de 20 cm, debido a la menor capacidad de retención de nutrientes en suelos arenosos. Hay una correlación positiva entre el porcentaje de arcilla y la CIC a una profundidad de 20 cm, ya que las partículas de arcilla tienen una mayor superficie y carga negativa para atraer y retener cationes. El porcentaje de limo se correlaciona negativamente con la materia orgánica y positivamente con el fósforo disponible y el calcio intercambiable, lo que puede estar relacionado con la capacidad de retención de agua y nutrientes del suelo. El potasio disponible y el pH del suelo muestran una relación inversa, lo que puede deberse a la liberación de potasio de los minerales del suelo en condiciones ácidas. A medida que aumenta el contenido de materia orgánica en el suelo, también lo hacen el nitrógeno y el H intercambiable, mientras que el Ca intercambiable disminuye. La saturación de aluminio en el suelo se correlaciona negativamente con el nitrógeno y las bases cambiables, lo que puede estar relacionado con la toxicidad del aluminio y su competencia con otros cationes en el suelo. El fósforo disponible en el suelo se correlaciona positivamente con el H intercambiable, el Ca intercambiable y la CIC, lo que sugiere una mayor disponibilidad de sitios de intercambio catiónico y liberación de fósforo inorgánico por actividad microbiana. El Mg intercambiable se correlaciona positivamente con la CIC y el H intercambiable a 20 cm de profundidad, lo que puede deberse a la competencia de ambos elementos por los sitios de intercambio catiónico en el suelo. La saturación de aluminio en el suelo se correlaciona positivamente con el potasio disponible, lo que podría estar relacionado con la competencia de ambos elementos por los sitios de intercambio

catiónico en el suelo y la acidez del suelo. La cantidad de microorganismos aerobios viables y *Lactobacillus* disminuye con la profundidad del suelo, posiblemente debido a la menor disponibilidad de nutrientes y oxígeno en las capas más profundas. Hay una correlación positiva fuerte entre la cantidad de estos microorganismos y el contenido de fósforo, lo que sugiere un papel importante en la liberación de fósforo en el suelo.

La cantidad de Actinomicetos disminuye con la profundidad del suelo debido a la menor disponibilidad de nutrientes y oxígeno en las capas más profundas. La cantidad de Actinomicetos está fuertemente correlacionada con la cantidad de arena y negativamente con la cantidad de arcilla en el suelo, lo que sugiere que la textura del suelo influye en su crecimiento y actividad. La cantidad de Fungi (Mohos y Levaduras) disminuye con la profundidad del suelo, posiblemente debido a la menor disponibilidad de nutrientes y condiciones microambientales menos favorables en las capas más profundas. La cantidad de bacterias fijadoras de nitrógeno no muestra una diferencia significativa entre las profundidades de 10 cm y 20 cm, lo que sugiere que estos microorganismos pueden adaptarse a diferentes condiciones ambientales y de nutrientes en el suelo.

Existe una correlación negativa moderada a fuerte entre la abundancia de Fungi (Mohos y Levaduras) y Actinomicetos, lo que puede ser resultado de la competencia por recursos limitados y las diferencias en las preferencias de hábitat y condiciones ambientales requeridas por estos dos grupos de microorganismos.

Este estudio demuestra que la comprensión detallada de la microbiota del suelo puede ofrecer nuevas oportunidades para mejorar las prácticas agrícolas,

especialmente en términos de gestión de la fertilidad del suelo y sostenibilidad ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bader, B. R., Taban, S. K., Fahmi, A. H., Abood, M. A., & Hamdi, G. J. (2021). Potassium availability in soil amended with organic matter and phosphorous fertiliser under water stress during maize (*Zea mays* L.) growth. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(6), 390–394. <https://doi.org/10.1016/J.JSSAS.2021.04.006>
- Baldrian, P. (2008). Enzymes of saprotrophic basidiomycetes. In *British Mycological Society Symposia Series* (Vol. 28, Issue C, pp. 19–41). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0275-0287\(08\)80004-5](https://doi.org/10.1016/S0275-0287(08)80004-5)
- Barrow, N. J. (2015). Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. *Plant and Soil*, 397(1–2), 401–409. <https://doi.org/10.1007/S11104-015-2514-5>
- Bastida, F., Eldridge, D. J., García, C., Kenny Png, G., Bardgett, R. D., & Delgado-Baquerizo, M. (2021). Soil microbial diversity–biomass relationships are driven by soil carbon content across global biomes. *The ISME Journal*, 15(7), 2081–2091. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00906-0>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). Nature and Properties of Soils, The 15th Edition. In *Pearson Education*.
- Condon, L. M., Turner, B. L., & Cade-Menun, B. J. (2015). Chemistry and Dynamics of Soil Organic Phosphorus. *Phosphorus: Agriculture and the Environment*, 87–121. <https://doi.org/10.2134/AGRONMONOGR46.C4>
- Davelos, A. L., Xiao, K., Samac, D. A., Martin, A. P., & Kinkel, L. L. (2004). Spatial variation in *Streptomyces* genetic composition and diversity in a prairie soil. *Microbial Ecology*, 48(4), 601–612. <https://doi.org/10.1007/S00248-004-0031-9>
- De Boer, W., Folman, L. B., Summerbell, R. C., & Boddy, L. (2005). Living in a fungal world: impact of fungi on soil bacterial niche development. *FEMS Microbiology Reviews*, 29(4), 795–811. <https://doi.org/10.1016/J.FEMSRE.2004.11.005>
- Fierer, N., Schimel, J. P., & Holden, P. A. (2003). Variations in microbial community composition through two soil depth profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(1), 167–176. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00251-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00251-1)
- Foy, C. D. (2015). Physiological Effects of Hydrogen, Aluminum, and Manganese Toxicities in Acid Soil. *Soil Acidity and Liming*, 57–97. <https://doi.org/10.2134/AGRONMONOGR12.2ED.C2>
- Frey, S. D., Knorr, M., Parrent, J. L., & Simpson, R. T. (2004). Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests. *Forest Ecology and Management*, 196(1), 159–171. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2004.03.018>
- Gayán, A., Borah, P., Nath, D., & Katak, R. (2023). Soil microbial diversity, soil health and agricultural sustainability. In *Sustainable Agriculture and the Environment* (pp. 107–126). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90500-8.00006-3>
- Hao, J., Chai, Y. N., Lopes, L. D., Ordóñez, R. A., Wright, E. E., Archontoulis, S., & Schachtman, D. P. (2021). The Effects of Soil Depth on the Structure of Microbial Communities in Agricultural Soils in Iowa (United States). *Applied and Environmental Microbiology*, 87(4). <https://doi.org/10.1128/AEM.02673-20>
- Hartmann, M., & Six, J. (2022). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1), 4–18. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>
- Herridge, D. F., Peoples, M. B., & Boddey, R. M. (2008). Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*, 311(1–2), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S11104-008-9668-3>
- Kinraide, T. B. (1991). Identity of the rhizotoxic aluminium species. *Plant and Soil*, 134(1), 167–178. <https://doi.org/10.1007/BF00010729>
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132, 105078. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2019.105078>
- Marschner, P. (2011). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition*, 1–651. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
- Mus, F., Crook, M. B., Garcia, K., Costas, A. G., et al. (2016). Symbiotic Nitrogen Fixation and the Challenges to Its Extension to Nonlegumes. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(13), 3698–3710. <https://doi.org/10.1128/AEM.01055-16>
- Nieder, R., Benbi, D. K., & Reichl, F. X. (2018). Soil components and human health. In *Soil Components and Human Health*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1222-2>
- Rajkumar, M., Ae, N., Prasad, M. N. V., & Freitas, H. (2010). Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction. *Trends in Biotechnology*, 28(3), 142–149. <https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2009.12.002>
- Reed, S. C., Cleveland, C. C., & Townsend, A. R. (2011). Functional Ecology of Free-Living Nitrogen Fixation: A Contemporary Perspective. *Annual Reviews*, 42. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ECOLSYS-102710-145034>
- Schjørring, P., Thomsen, I. K., Møberg, J. P., De Jonge, H., Kristensen, K., & Christensen, B. T. (1999). Turnover of organic matter in differently textured soils: I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. *Geoderma*, 89(3–4), 177–198. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00083-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00083-4)
- Schroeckh, V., Scherlach, K., Nützmann, H. W., Shelest, E., Schmidt-Heck, W., Schuemann, J., Martin, K., Hertweck, C., & Brakhage, A. A. (2009). Intimate bacterial-fungal interaction triggers biosynthesis of archetypal polyketides in *Aspergillus nidulans*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(34), 14558–14563. <https://doi.org/10.1073/PNAS.0901870106>
- Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K., & Batten, K. M. (2006). Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 555–569. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2004.0347>
- Sparks, D. L. (2002). *Environmental soil chemistry*. Elsevier.
- Stevenson, F. J., & Cole, M. A. (Michael A.). (1999). *Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. Wiley.
- Swift, M. J. (Michael J., Heal, O. W., & Anderson, J. M. [Jonathan M. (1979). Decomposition in terrestrial ecosystems. In *Studies in ecology (USA)*. University of California Press. <https://doi.org/10.3/JQUERY-UIJS>
- Wang, P., Marsh, E. L., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D. B., Shefflin, A. M., & Schachtman, D. P. (2017). Shifts in microbial communities in soil, rhizosphere and roots of two major crop systems under elevated CO₂ and O₃. *Scientific Reports*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14936-2>
- Xia, Q., Rufty, T., & Shi, W. (2020). Soil microbial diversity and composition: Links to soil texture and associated properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 149, 107953. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2020.107953>
- Xu, P., Sun, C. X., Ye, X. Z., Xiao, W. D., Zhang, Q., & Wang, Q. (2016). The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132, 94–100. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2016.05.031>
- Xu, T., Chen, X., Hou, Y., & Zhu, B. (2021). Changes in microbial biomass, community composition and diversity, and functioning with soil depth in two alpine ecosystems on the Tibetan plateau. *Plant and Soil*, 459(1–2), 137–153. <https://doi.org/10.1007/S11104-020-04712-Z>
- Zehr, J. P., Jenkins, B. D., Short, S. M., & Steward, G. F. (2003). Nitrogenase gene diversity and microbial community structure: a cross-system comparison. *Environmental Microbiology*, 5(7), 539–554. <https://doi.org/10.1046/J.1462-2920.2003.00451.X>
- Zhao, H., Zheng, W., Zhang, S., Gao, W., & Fan, Y. (2021). Soil microbial community variation with time and soil depth in Eurasian Steppe (Inner Mongolia, China). *Annals of Microbiology*, 71(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/S13213-021-01633-9/FIGURES/4>
- Zhao, M., Wang, M., Zhao, Y., Hu, N., Qin, L., Ren, Z., Wang, G., & Jiang, M. (2022). Soil microbial abundance was more affected by soil depth than the altitude in peatlands. *Frontiers in*

Microbiology,
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1068540>

13.