



REVIEW



Composting in agroecology: Effects on soil structure, nutrient availability and beneficial microorganisms

El compostaje en agroecología: Efectos sobre la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y los microorganismos beneficiosos

Santiago Sánchez Tigrero¹ ; Débora Ramírez-Vargas¹ ; Luz García Cruzatty^{2*}

¹ Programa de Doctorado en Gestión de Proyectos, Universidad Internacional Iberoamericana, México.

² Facultad de Ingenierías Agroambientales, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

* Corresponding author: luz.garcia@utm.edu.ec (L. García Cruzatty).

Received: 16 May 2025. Accepted: 2 November 2025. Published: 27 November 2025.

Abstract

Composting is a key strategy in agroecology that improves soil fertility without causing negative environmental effects. Unlike synthetic fertilizers, compost promotes soil regeneration by increasing its organic matter content, enhancing its structure, and stimulating beneficial microbial activity. This review article examines how composting optimizes the physical, chemical, and biological properties of the soil, increasing its water retention capacity, the availability of essential nutrients such as nitrogen, phosphorus, and potassium, and strengthening crop resilience against diseases and environmental stress. Different composting methods, such as vermicomposting, windrow composting, and Bokashi, are compared, demonstrating that regardless of the method used, compost does not contribute to soil degradation but instead enriches it in a sustainable manner. Additionally, the role of key microorganisms in nutrient mineralization and the improvement of the soil microbiome is highlighted, ensuring a balanced and slow-release supply for plants. Finally, innovative strategies to optimize compost quality using microbial inoculants and natural amendments are discussed, consolidating their role as a sustainable alternative for efficient and environmentally responsible agricultural production.

Keywords: Nutrient cycling; Organic matter; Crop resilience; Sustainable management.

Resumen

El compostaje es una estrategia clave en la agroecología, que mejora la fertilidad del suelo sin generar efectos negativos en el ambiente. A diferencia de los fertilizantes sintéticos, el compost promueve la regeneración del suelo al incrementar su contenido de materia orgánica, mejorar su estructura y estimular la actividad microbiana beneficiosa. Este artículo de revisión analiza cómo el compostaje optimiza las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, aumentando su capacidad de retención de agua, la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, y fortaleciendo la resiliencia de los cultivos frente a enfermedades y estrés ambiental. Se comparan distintos métodos de compostaje, como el vermicompostaje, el compostaje en hileras y el Bokashi, evidenciando que, independientemente del método utilizado, el compost no contribuye a la degradación del suelo, sino que lo enriquece de manera sostenible. Además, se destaca el papel de los microorganismos clave en la mineralización de nutrientes y la mejora del microbioma del suelo, asegurando un suministro equilibrado y de liberación lenta para las plantas. Finalmente, se discuten estrategias innovadoras para optimizar la calidad del compost mediante el uso de inóculos microbianos y emmiedas naturales, consolidando su papel como alternativa sostenible para una producción agrícola eficiente y ambientalmente responsable.

Palabras clave: Ciclo de nutrientes; Materia orgánica; Resiliencia de cultivos; Sostenibilidad.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2026.015>

Cite this article:

Sánchez Tigrero, S., Ramírez-Vargas, D., & García Cruzatty, L. (2026). El compostaje en agroecología: Efectos sobre la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y los microorganismos beneficiosos. *Scientia Agropecuaria*, 17(1), 211-225.

1. Introducción

Desde una perspectiva profesional y respaldada por la evidencia científica, se puede afirmar que los composts y abonos orgánicos no generan impactos negativos en el suelo, en la salud humana ni en el medio ambiente (Golden et al., 2023). Por el contrario, los abonos orgánicos contienen una

gama completa de minerales esenciales que contribuyen significativamente a la nutrición de los cultivos. La fertilización agrícola mediante abonos orgánicos puede igualar e incluso superar la efectividad de los fertilizantes químicos, gracias a sus ventajas en términos de sostenibilidad y mejora de la calidad del suelo (Naveen, 2025).

El compostaje constituye una práctica central de la agroecología, un enfoque agrícola sostenible que promueve el equilibrio ecológico, la biodiversidad y la salud del suelo. Al transformar los desechos orgánicos en humus rico en nutrientes, el compostaje aborda desafíos clave de la agricultura convencional, como la degradación del suelo, el agotamiento de nutrientes y la dependencia de fertilizantes sintéticos (Ho et al., 2022; Ouel Lhaj et al., 2024). Este proceso no solo reduce los residuos agrícolas y urbanos, sino que también revitaliza los suelos al mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Ouel Lhaj et al., 2024). En cultivos tropicales como el banano (*Musa spp.*), el compostaje ha demostrado ser una estrategia eficaz para optimizar la fertilidad del suelo y reducir la dependencia de insumos químicos (Suvendran et al., 2025).

Uno de los principales beneficios del compostaje en la agroecología es la mejora de la estructura del suelo. La incorporación de materia orgánica incrementa la agregación, la porosidad y la retención de humedad, reduciendo la compactación (Ouel Lhaj et al., 2024; Suvendran et al., 2025). Estos cambios favorecen la penetración radicular, el intercambio gaseoso y la eficiencia en el uso del agua, aspectos esenciales en regiones áridas o propensas a la sequía (Naveen, 2025).

La disponibilidad de nutrientes es otro aspecto crítico en el que el compostaje destaca. La descomposición de la materia orgánica por comunidades microbianas libera y transforma nutrientes esenciales —nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K)— en formas más biodisponibles (Andreote et al., 2014; Naveen, 2025). Las bacterias fijadoras de nitrógeno y los hongos solubilizadores de fósforo desempeñan un papel clave en el mantenimiento de la fertilidad del suelo sin necesidad de fertilizantes sintéticos (Mendes et al., 2013; Naveen, 2025). De esta manera, el compostaje mejora la fertilidad, optimiza el uso de los recursos edáficos y consolida un enfoque agroecológico orientado a la sostenibilidad y resiliencia del sistema suelo–planta (Ali et al., 2025).

Además, el compost estimula un microbioma edáfico diverso y funcional, esencial para la supresión de enfermedades y el reciclaje de nutrientes (Ouel Lhaj et al., 2024; Azim et al., 2018). Los microorganismos beneficiosos, como las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV), fortalecen la resistencia de las plantas a patógenos y mejoran la absorción de nutrientes (Figiel et al., 2025). Estas interacciones simbióticas entre microbios y raíces contribuyen a un agroecosistema más equilibrado y resiliente, reduciendo la dependencia de insumos

externos y fomentando la salud ambiental (Gomiero et al., 2011).

En este contexto, el compostaje representa una herramienta integral dentro de la agricultura sostenible. La interacción dinámica entre la materia orgánica, los microorganismos y los sistemas vegetales crea un ciclo de retroalimentación que regenera la fertilidad del suelo y mejora la productividad de los cultivos. A medida que aumenta la demanda global por sistemas agrícolas sostenibles, el compostaje se consolida como una estrategia clave para alcanzar suelos más saludables, mayores rendimientos y una menor huella ambiental.

Esta revisión tiene como objetivo sintetizar los conocimientos actuales sobre el compostaje en sistemas agroecológicos, analizando cómo influye en las propiedades del suelo, la actividad microbiana y la sostenibilidad de los cultivos. Se realizó un análisis crítico de literatura científica reciente — obtenida de Scopus, Web of Science y ScienceDirect —, priorizando estudios de la última década que evalúan diversos métodos de compostaje, como el vermicompostaje, Bokashi, compostaje en hileras y compostaje con biocarbón, con énfasis en su aplicación en entornos agrícolas tropicales.

2. El papel de los microorganismos en la fertilidad del suelo

Los microorganismos son impulsores esenciales de la fertilidad del suelo, principalmente a través de su participación en la descomposición de la materia orgánica, el ciclo de nutrientes y la estabilización de la estructura del suelo. El proceso de compostaje depende en gran medida de una comunidad dinámica de bacterias, hongos y actinomicetos, que descomponen compuestos orgánicos complejos en formas más simples, haciendo que los nutrientes como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) sean más accesibles para las plantas (Tabla 1). Esta actividad microbiana transforma los residuos orgánicos crudos en compost rico en nutrientes, mejorando la productividad y sostenibilidad del suelo a largo plazo de los agroecosistemas (Sánchez et al., 2017; Wang et al., 2022).

En el caso del compostaje aplicado al cultivo de banano, la adición de microorganismos eficientes (ME) ha acelerado la descomposición de residuos orgánicos y mejorado la absorción de nutrientes por parte de la planta (Ho et al., 2022). Bacterias como *Azotobacter spp.* y hongos del género *Trichoderma* han sido identificados como promotores del crecimiento del banano, reduciendo además la incidencia de enfermedades del suelo (Yao et al., 2023; Kausar et al., 2021).

2.1. Grupos microbianos clave en el compostaje

2.1.1. Bacterias

Las bacterias son dominantes en las fases iniciales del compostaje, descomponiendo compuestos orgánicos simples como azúcares, proteínas y aminoácidos. Las bacterias mesófilas inician el proceso de descomposición a temperaturas moderadas, mientras que las bacterias termófilas toman el control a temperaturas más altas (por encima de los 45 °C), degradando sustancias más complejas como la celulosa y la hemicelulosa (Nemet et al., 2021; Wang et al., 2022). Algunas especies bacterianas, como *Bacillus* y *Pseudomonas*, desempeñan un doble papel en la descomposición de la materia orgánica y la supresión de patógenos, lo que contribuye a la salud del suelo y la resistencia de las plantas a las enfermedades (Azim et al., 2018).

Ciertas bacterias también se especializan en la solubilización de nutrientes, mejorando la fertilidad del suelo al hacer que los nutrientes sean más biodisponibles (Figura 1). Las bacterias solubilizadoras de fósforo, como *Pseudomonas*, *Enterobacter* y *Bacillus spp.*, liberan fósforo inorgánico de fuentes orgánicas y minerales, lo que aumenta su disponibilidad para las plantas (Ho et al., 2022). Mientras tanto, las bacterias fijadoras de nitrógeno, como *Azotobacter* y *Rhizobium*, fijan el nitrógeno atmosférico, reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos y apoyando la gestión sostenible del suelo (Figiel et al., 2025).

2.1.2. Hongos

Los hongos, son descomponedores en la naturaleza y se pueden encontrar durante la primera y

última fase del proceso de compostaje (fase mesófila y fase de maduración). En particular los hongos de los géneros *Aspergillus*, *Acremonium*, *Chrysosporium*, *Fusarium*, *Mortierella*, *Penicillium* y *Trichoderma*, desempeñan un papel crucial en la degradación de materia orgánica compleja y recalcitrante como la lignina y la celulosa, que son menos accesibles para las bacterias (Figura 1). Operan de manera eficiente en entornos con bajo contenido de nitrógeno y contribuyen a la estructura del suelo formando agregados estables a través de sus redes de hifas (Sánchez et al., 2017; Azim et al., 2018; Nemet et al., 2021). Además, la actividad de los hongos mejora la formación de humus, lo que mejora la capacidad de retención de agua del suelo, la aireación y el intercambio de nutrientes (Singh & Nain, 2014; Goldan et al., 2023).

2.1.3. Actinomicetos

Los actinomicetos, un grupo de bacterias filamentosas, se vuelven predominantes durante la fase de maduración del compostaje, descomponiendo compuestos altamente resistentes como la lignocelulosa, quitina, lignina y proteínas (Nemet et al., 2021). También producen compuestos bioactivos, incluidos antibióticos, que suprimen los microorganismos patógenos, mejorando la salud y resiliencia del suelo (Wang et al., 2022). El género *Streptomyces* es particularmente conocido por su contribución al proceso de humidificación, ayudando a la estabilización de la materia orgánica y promoviendo la fertilidad duradera del suelo (Singh & Nain, 2014; Azim et al., 2018; Ho et al., 2022).

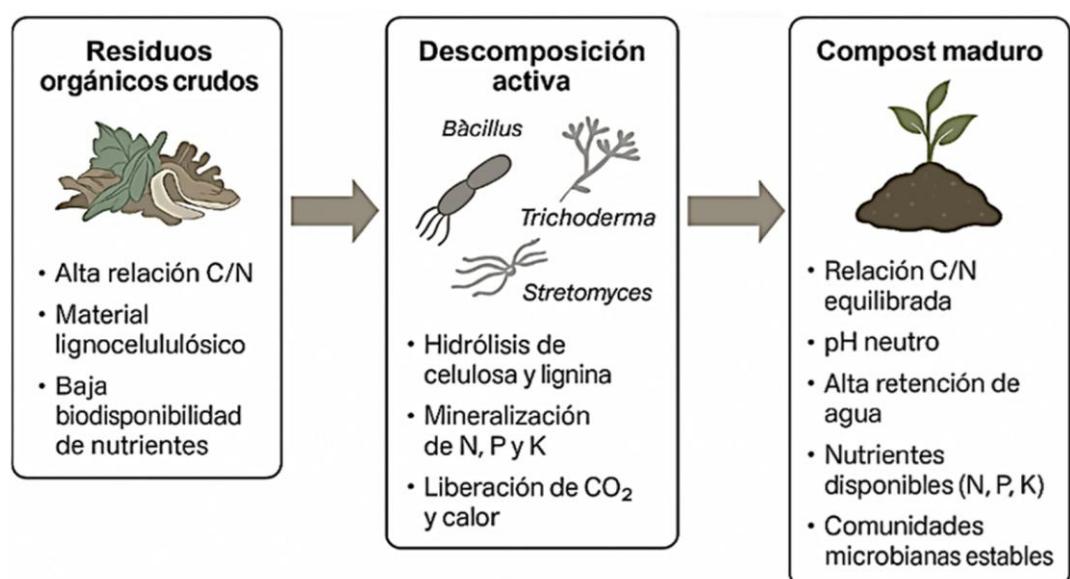


Figura 1. Transformación de los residuos orgánicos en compost rico en nutrientes mediada por la actividad microbiana. Los residuos orgánicos son degradados por bacterias, hongos y actinomicetos, que mineralizan los nutrientes (N, P, K) y estabilizan la materia orgánica, dando lugar a un compost maduro con alto valor agrícola.

Tabla 1

Microorganismos claves en el compostaje

Microorganismo	Tipo	Función principal	Nutrientes liberados	Referencias
<i>Bacillus spp.</i>	Bacteria	Descomposición de compuestos orgánicos complejos.	Fósforo, nitrógeno, potasio	(Sánchez et al., 2017; Ali et al., 2025; Figiel et al., 2025)
<i>Pseudomonas spp.</i>	Bacteria	Promoción del crecimiento vegetal. Fijación de nitrógeno. Solubilización de fósforo.	Fósforo, potasio	(Khan et al., 2014; Kausar et al., 2021; Figiel et al., 2025)
<i>Actinomyces spp.</i>	Actinomiceto	Descomposición de celulosa y lignina.	Carbono, nitrógeno	(Castaño et al., 2011; Mehta et al., 2014; Nemet et al., 2021)
<i>Trichoderma spp.</i>	Hongo	Control biológico, supresión de patógenos.	Nutrientes generales	(Mehta et al., 2014; Yao et al., 2023)
<i>Aspergillus spp.</i>	Hongo	Descomposición de lignina y celulosa. Solubilización de potasio y fósforo.	Carbono, Potasio, Fósforo	(Sánchez et al., 2017; Nguyen et al., 2022)
<i>Azotobacter spp.</i>	Bacteria	Fijación de nitrógeno atmosférico.	Nitrógeno	(Pepe et al., 2013; Sánchez et al., 2017; Ahmed et al., 2023)
<i>Rhizobium spp.</i>	Bacteria	Fijación simbiótica de nitrógeno. Solubilización de fósforo.	Nitrógeno, Fósforo	(Khan et al., 2014; Ahmed et al., 2023)
<i>Penicillium spp.</i>	Hongo	Solubilización de fósforo.	Fósforo	(Mendes et al., 2013; Nemet et al., 2021; Figiel et al., 2025)
<i>Fusarium spp.</i>	Hongo	Descomposición de lignina y celulosa. Solubilización de fósforo.	Carbono, Fósforo	(Mehta et al., 2014; Nemet et al., 2021)
<i>Nitrosomonas spp.</i>	Bacteria	Nitrificación (conversión de amonio a nitrato).	Nitrógeno	(Kausar et al., 2021; Figiel et al., 2025)
<i>Nitrobacter spp.</i>	Bacteria	Fijación de nitrógeno.	Nitrógeno	(Kausar et al., 2021; Ahmed et al., 2023)
<i>Streptomyces spp.</i>	Actinomiceto	Producción de antibióticos naturales y descomposición de compuestos resistentes.	Nutrientes generales	(Castaño et al., 2011; Mehta et al., 2014; Nemet et al., 2021)

2.2. Interacciones microbianas y fertilidad del suelo

La sinergia entre estos grupos microbianos acelera el proceso de compostaje, asegurando una liberación eficiente de nutrientes y la formación de materia orgánica estable. Los microorganismos enriquecen el microbioma del suelo al fomentar interacciones beneficiosas con las raíces de las plantas, mejorando la absorción de nutrientes y suprimiendo patógenos dañinos (Azim et al., 2018). Además, el compost enriquecido con inóculos microbianos específicos puede aumentar significativamente la actividad biológica del suelo, lo que conduce a cultivos más saludables y mayores rendimientos (Sánchez et al., 2017).

2.2.1. Contribuciones microbianas al ciclo de nutrientes

Los microorganismos desempeñan un papel fundamental en la transformación y el ciclo de nutrientes esenciales, regulando procesos como la descomposición, la fijación de nitrógeno, la nitrificación y la solubilización del fósforo. A través de estas funciones, convierten compuestos orgánicos e inorgánicos en formas biodisponibles, lo que sostiene la fertilidad del suelo y la productividad agrícola a largo plazo (Sánchez et al., 2017; Wang et al., 2022). La sinergia entre bacterias, hongos y actinomicetos

asegura una liberación eficiente de nutrientes y la formación de materia orgánica estable, mejorando la estructura del suelo y reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos (Azim et al., 2018).

Los microorganismos también participan activamente en los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno, fósforo y carbono, esenciales para el equilibrio ecológico del suelo. Las bacterias nitrificantes, como *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, facilitan la conversión del amonio en nitrato, mientras que las bacterias solubilizadoras de fósforo (por ejemplo, *Pseudomonas* y *Bacillus spp.*) transforman compuestos insolubles en formas disponibles para las plantas (Pepe et al., 2013; Khan et al., 2014; Ho et al., 2022). A su vez, la formación de humus por microorganismos descomponedores contribuye al secuestro de carbono, estabilizando la materia orgánica y mitigando los efectos del cambio climático (Nemet et al., 2021; Wang et al., 2022). En conjunto, estas interacciones microbianas conforman la base teórica del funcionamiento del suelo como ecosistema vivo. La diversidad y la actividad de las comunidades microbianas no solo determinan la eficiencia de los ciclos de nutrientes, sino que también influyen directamente en la estabilidad estructural, la disponibilidad de agua y la capacidad del suelo para resistir el estrés ambiental.

2.3. Influencia del tipo de compostaje sobre la calidad microbiana y agronómica del compost

El tipo de compostaje influye significativamente en la diversidad, abundancia y actividad de las comunidades microbianas, lo que a su vez afecta la calidad del compost y su impacto en la fertilidad del suelo. Cada método, ya sea vermicompostaje, compostaje en hileras, compostaje en pilas estáticas o compostaje en recipientes (**Tabla 2**), crea condiciones ambientales distintas (temperatura, humedad y aireación) que dan forma a la dinámica microbiana y su eficiencia de descomposición (**Sánchez et al., 2017; Ho et al., 2022**).

Los diversos métodos de compostaje impactan la calidad microbiana del compost y, por ende, su aplicación en la agricultura. Por ejemplo, el vermicompostaje con residuos de banano ha mostrado mejorar la disponibilidad de nutrientes y aumentar la biomasa microbiana beneficiosa en suelos destinados al cultivo de esta planta (**Mago et al., 2021**). Igualmente, el compostaje Bokashi, ampliamente utilizado en sistemas agroecológicos, ha resultado en un rápido reciclaje de nutrientes cuando se aplica a cultivos de plátano y banano (**Khanyile et al., 2024**).

2.3.1. Vermicompostaje y diversidad microbiana

El vermicompostaje implica el uso de lombrices de tierra, principalmente *Eudrilus eugeniae*, *Eisenia fetida* o *Lumbricus rubellus*, para descomponer los desechos orgánicos en humus rico en nutrientes, lo que da como resultado un compost rico en poblaciones microbianas beneficiosas (**Soobhany, 2018; Rehman et al., 2023**). La actividad de las lombrices de tierra mejora la aireación y fragmentación de la materia orgánica, lo que proporciona un entorno propicio para las bacterias y los hongos. Los estudios muestran que el vermicompostaje aumenta la abundancia de bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo, lo que da como resultado un compost con una mayor disponibilidad de nutrientes (**Nguyen et al., 2022; Rehman et al., 2023**). Además, los actinomicetos, que degradan los compuestos orgánicos complejos, son particularmente abundantes en el vermicompostaje, lo que mejora su estabilidad y sus capacidades de supresión de patógenos (**Mehta et al., 2014; Sreevidya et al., 2016**).

2.3.2. Compostaje en hileras y en pilas estáticas: efectos de la temperatura y la aireación

El compostaje en hileras y en pilas estáticas depende en gran medida de la actividad termófila microbiana para descomponer el material orgánico.

En el compostaje en hileras, los materiales orgánicos se apilan en largas hileras y se revuelven periódicamente para mantener los niveles de oxígeno y la descomposición uniforme, lo que favorece la presencia de bacterias y hongos aeróbicos, mientras que las pilas estáticas implican aplicar material orgánico sin voltearlo regularmente, recurriendo a sistemas de aireación pasiva o forzada (**Dentel & Qi, 2013; Sánchez et al., 2017; Michel et al., 2022**). Estos métodos fomentan la presencia de microbios termófilos como *Rhizomucor* y *Aspergillus*, cruciales para descomponer la celulosa, la lignina y otros compuestos orgánicos complejos a altas temperaturas (45-70 °C) (**Singh & Nain, 2014; Nemet et al., 2021**). En las pilas estáticas con oxígeno insuficiente, pueden predominar las bacterias anaeróbicas como *Clostridium*, lo que ralentiza la descomposición y conduce a la producción de subproductos indeseables como metano y amoniaco (**Azim et al., 2018**). Por lo tanto, el control de la aireación es fundamental para mantener un equilibrio microbiano saludable y garantizar una estabilización eficaz de la materia orgánica (**Sánchez et al., 2017**).

2.3.3. Compostaje en recipientes: entorno microbiano controlado

El compostaje en recipientes utiliza sistemas cerrados para controlar con precisión los parámetros ambientales como la temperatura, humedad y aireación, optimizando las condiciones para la actividad microbiana durante todo el proceso. Este método favorece una comunidad microbiana continua y diversa que pasa de especies mesófilas a termófilas, lo que facilita una descomposición rápida. Los sistemas en recipientes son particularmente eficaces para reducir los microbios patógenos y mejorar las poblaciones de especies beneficiosas, lo que da como resultado un compost de alta calidad con un contenido microbiano constante (**Azim et al., 2018; Nguyen et al., 2022**).

2.3.4. Compostaje en pila estática aireada

El compostaje en pila estática aireada (PEA) emplea aireación forzada para mantener los niveles de oxígeno en toda la pila, eliminando la necesidad de voltearla. Este método favorece una población microbiana diversa al proporcionar condiciones consistentes que favorecen tanto a los microbios termófilos como a los mesófilos. La PEA es eficiente en el manejo de grandes volúmenes de desechos orgánicos al tiempo que reduce las emisiones de metano, lo que resulta en un compost con sólida diversidad microbiana y estabilidad de nutrientes (**Michel et al., 2022**).

Tabla 2
Comparativa de propiedades del compost según el método

Método de compostaje	Propiedades físicas	Propiedades químicas	Propiedades biológicas	Consideraciones microbianas	Referencia
Vermicompostaje	Alta porosidad, buena retención de agua.	pH neutro, alta relación C/N.	Alta diversidad microbiana, presencia PGPR.	Abundancia de bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo, alta actividad de actinomicetos.	(Nguyen et al., 2022; Rehman et al., 2023)
Compostaje en hileras	Mayor aireación debido al volteo periódico.	pH balanceado, alta disponibilidad de nutrientes.	Diversidad microbiana estable.	Favorece bacterias y hongos aeróbicos, esenciales para una descomposición uniforme.	(Dentel & Qi, 2013; Sánchez et al., 2017; Michel et al., 2022; Ouel Lhaj et al., 2024)
Compostaje en pila estática	Menor compactación, buena retención de humedad.	pH más variable según la gestión de oxígeno.	Diversidad microbiana media.	Presencia de bacterias anaeróbicas en condiciones de baja aireación; puede aumentar <i>Clostridium</i> si no se controla el oxígeno.	(Sánchez et al., 2017; Azim et al., 2018; Michel et al., 2022)
Compostaje en recipientes	Control preciso de humedad y temperatura.	Estabilidad en el pH y la relación C/N.	Alta actividad enzimática.	Ciclo continuo entre especies mesófilas y termófilas, reducción de patógenos y estabilidad microbiana.	(Azim et al., 2018; Nguyen et al., 2022; Lerma-Moliz et al., 2023)
Compostaje Bokashi	Baja retención de agua.	pH ácido inicial, mayor estabilidad al final.	Baja diversidad inicial, aumenta tras el uso.	Proliferación de bacterias de ácido láctico, levaduras y bacterias fototróficas; descomposición rápida en condiciones anaeróbicas.	(Ho et al., 2022; Ouel Lhaj et al., 2024)
Compostaje con biocarbón	Alta retención de agua y aireación.	pH estabilizado, mejora en la disponibilidad de nutrientes.	Alta biomasa microbiana.	Mejora la actividad de las bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo gracias a la estructura porosa del biocarbón.	(Nguyen et al., 2022; Wang et al., 2022)
Compostaje en pila estática aireada	Buena aireación uniforme por aireación forzada.	pH balanceado, alto contenido de nutrientes.	Alta diversidad y estabilidad microbiana.	Microorganismos termófilos y mesófilos mantienen un equilibrio, evitando la producción de metano y amoníaco.	(Michel et al., 2022; Suvendran et al., 2025)

2.3.5. Compostaje Bokashi

Bokashi, término japonés que significa materia orgánica “fermentada”, es un método de compostaje utilizado tradicionalmente, que implica la adición de microorganismos efectivos (ME) como bacterias de ácido láctico, levaduras y bacterias fototróficas. Bokashi se puede producir en condiciones completamente anaeróbicas o parcialmente aeróbicas. La incorporación de microorganismos eficientes (EM) durante el compostaje de residuos agrícolas acelera la descomposición de materia orgánica y mejora la fertilidad del suelo en sistemas tropicales (Ho et al., 2022; Ouel Lhaj et al., 2024).

2.3.6. Compostaje con biocarbón

Las enmiendas a base de biocarbón, que mejoran la aireación y la retención de humedad, también estabilizan el pH y favorecen el desarrollo del microbioma del suelo —en particular las bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo— además de estimular la actividad enzimática, lo que

potencia la interacción rizosférica y la retención de nutrientes (Nguyen et al., 2022; Ali et al., 2025). Asimismo, la incorporación de biocarbón amplifica los efectos positivos del compost al mejorar la estructura del suelo, la estabilidad del carbono y la eficiencia microbiana (Ali et al., 2025).

3. Influencia de los parámetros ambientales en la actividad microbiana

Si bien los distintos métodos de compostaje (sección 2.3) generan condiciones ambientales específicas, esta sección analiza de forma general cómo los parámetros de temperatura, humedad, aireación y pH regulan la actividad microbiana durante el proceso (Figura 2).

Temperatura. Es el principal regulador de la dinámica microbiana. Durante la fase mesófila, las comunidades bacterianas inician la degradación de compuestos fácilmente biodegradables; al aumentar la temperatura, especies termófilas toman el relevo y aceleran la descomposición de

polímeros complejos como la celulosa y la lignina. Mantener la temperatura entre 45 y 70 °C permite una descomposición eficiente y la higienización del material. Sin embargo, valores superiores al rango óptimo reducen la diversidad microbiana y ralentizan la humificación (Nemet et al., 2021).

Humedad. El contenido de agua condiciona las reacciones enzimáticas y el metabolismo microbiano. Una humedad del 50% – 60% favorece la difusión de gases y nutrientes, mientras que un exceso genera zonas anaeróbicas y una humedad deficiente limita la actividad biológica (Sánchez et al., 2017; Wang et al., 2022).

Aireación. El oxígeno es esencial para mantener la descomposición aeróbica. La aireación adecuada promueve la oxidación de compuestos orgánicos, evita la acumulación de amoníaco y metano, y mantiene la temperatura y humedad en equilibrio. El volteo periódico o la aireación forzada son prácticas indispensables para garantizar la homogeneidad del proceso (Nguyen et al., 2022).

pH. Este parámetro regula la solubilidad de nutrientes y la estabilidad de las enzimas microbianas. Un rango de pH entre 6,5 y 7,5 favorece la actividad de las comunidades aeróbicas responsables de la mineralización de nitrógeno y fósforo, mientras que

desviaciones extremas inhiben la degradación y ralentizan la madurez del compost (Sánchez et al., 2017; Azim et al., 2018).

El control de estos parámetros es decisivo para asegurar una sucesión microbiana ordenada, la completa mineralización de la materia orgánica y la obtención de un compost maduro, estable y agronómicamente valioso.

4. Impacto en la calidad del compost y la fertilidad del suelo

Como resultado de la regulación ambiental analizada en la sección 3, los distintos métodos de compostaje generan compost con propiedades diferenciadas que impactan directamente en la fertilidad del suelo. Los métodos de compostaje que optimizan la diversidad y la actividad microbiana producen compost con mayor contenido de nutrientes, mejor formación de humus y mejores propiedades de acondicionamiento del suelo. Por ejemplo, el vermicompost y el compost en recipientes han demostrado resultados superiores en el aumento de la biomasa microbiana del suelo y la actividad enzimática, promoviendo el crecimiento de las plantas y la resiliencia contra las enfermedades transmitidas por el suelo (Mehta et al., 2014; Ho et al., 2022).

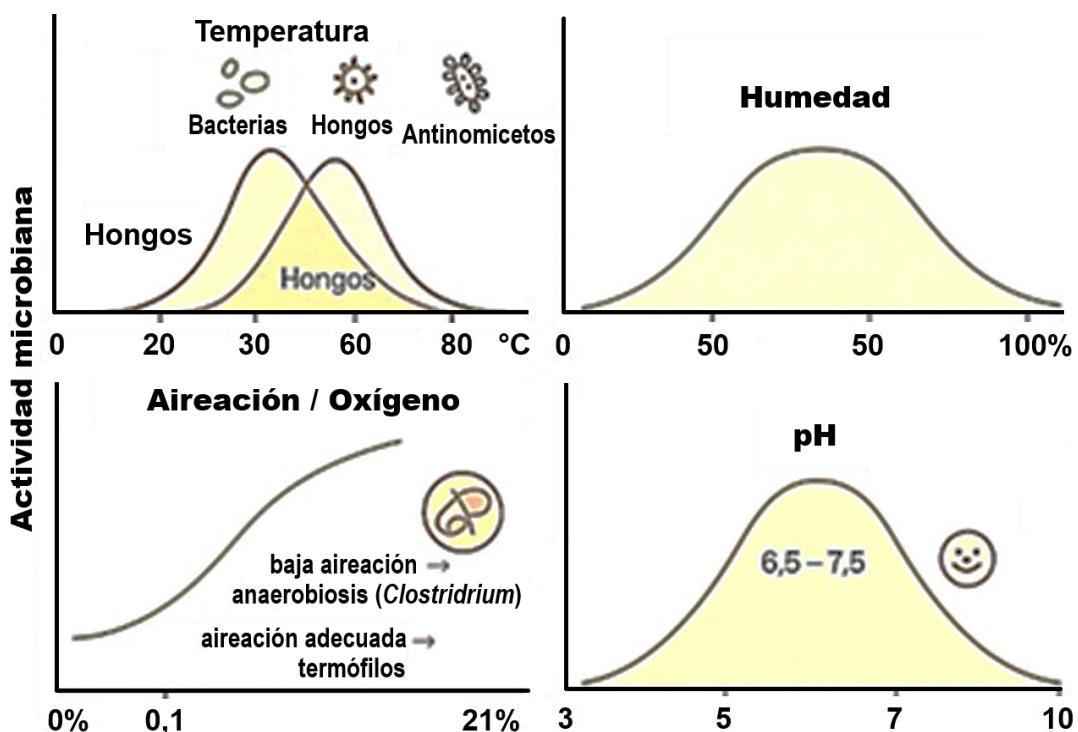


Figura 2. Influencia de los parámetros ambientales en la actividad microbiana durante el compostaje. La temperatura, la humedad, la aireación y el pH determinan la intensidad y diversidad de las comunidades microbianas responsables de la degradación de la materia orgánica. Los rangos óptimos favorecen bacterias y hongos termófilos, mientras que desviaciones extremas reducen la actividad o promueven condiciones anaeróbicas.

4.1. Interacciones del compost con la microbiota del suelo y su aplicación agroecológica

La aplicación de compost en sistemas agrícolas actúa como una herramienta práctica para restaurar y enriquecer la microbiota del suelo descrita en la sección 2.2, dedicada a las interacciones microbianas y su papel en la fertilidad edáfica. El compost aporta microorganismos activos y materia orgánica que estimulan la proliferación de comunidades beneficiosas, mejoran la estructura del suelo y suprime enfermedades transmitidas por patógenos (Sánchez et al., 2017; Azim et al., 2018). Estos efectos son particularmente relevantes en cultivos tropicales como el banano, donde el compost mejora la absorción de nitrógeno y fósforo, aumenta la tolerancia al estrés hídrico y fortalece la resistencia a *Fusarium oxysporum* (Khan et al., 2014; Yao et al., 2023).

4.2. Promoción de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCP)

De los grupos microbianos descritos en la sección 2.1, destacan las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV), cuya aplicación práctica se aborda a continuación. El compost estimula el desarrollo de estas rizobacterias beneficiosas, que influyen positivamente en la nutrición y el crecimiento de las plantas mediante la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo y la producción de fitohormonas como el ácido indol-3-acético (AIA) (Khan et al., 2014; Figiel et al., 2025; Wang et al., 2022).

Cepas de *Bacillus* y *Pseudomonas*, comúnmente presentes en compost maduro, incrementan la eficiencia de absorción de nutrientes y mejoran la tolerancia de las plantas a condiciones de estrés abiótico (Wang et al., 2022; Ouled Lhaj et al., 2024). Asimismo, los ácidos orgánicos y enzimas liberados durante la descomposición de la materia orgánica potencian la actividad de las RPCV, favoreciendo la interacción simbiótica con las raíces y mejorando la fertilidad del suelo y la productividad vegetal en sistemas agroecológicos sostenibles.

4.3. Supresión de enfermedades y equilibrio microbiano

La supresión de enfermedades del suelo constituye un efecto ecológico secundario del equilibrio microbiano promovido por el compost, descrito previamente en la sección 4.2. El establecimiento de comunidades microbianas diversas y funcionalmente complementarias genera una competencia natural por nutrientes y espacio, limitando la proliferación de microorganismos patógenos.

En este contexto, bacterias beneficiosas como *Bacillus* y *Pseudomonas*, junto con hongos antagonistas como *Trichoderma* y *Aspergillus*, desempeñan funciones clave en la producción de compuestos antimicrobianos, la degradación de metabolitos tóxicos y la inducción de resistencia sistémica en las plantas (Mendes et al., 2013; Sánchez et al., 2017; Yao et al., 2023).

Este equilibrio microbiano reduce la incidencia de patógenos como *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani* y *Pythium spp.*, estabilizando las redes tróficas del suelo y fortaleciendo la salud radicular y la resiliencia biológica de los agroecosistemas. En consecuencia, la supresión de enfermedades debe entenderse como un resultado emergente de la estabilidad ecológica del microbioma del suelo, mantenida por la aplicación continua de compost y la mejora de las condiciones edáficas (Mendes et al., 2013; Yao et al., 2023).

4.5. Impacto del compostaje en la fertilidad del suelo y el ciclo de nutrientes

Como se detalló en la sección 2.2.1, los microorganismos desempeñan un papel esencial en la transformación y el reciclaje de los nutrientes del suelo. Durante el compostaje, la descomposición microbiana de la materia orgánica genera compuestos humificados y nutrientes mineralizados que, al ser incorporados al suelo, mejoran su fertilidad y equilibrio biogeoquímico (Figura 3 y Figura 4).

El compost actúa como una fuente de liberación lenta y sostenida de nutrientes, especialmente nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), lo que reduce las pérdidas por lixiviación y volatilización y aumenta la eficiencia de uso por parte de las plantas (Azim et al., 2018; Mehta et al., 2014). Este suministro progresivo contribuye al mantenimiento de un ciclo de nutrientes estable, favoreciendo la productividad vegetal sin recurrir al uso intensivo de fertilizantes sintéticos.

Además, el compost incrementa el contenido de materia orgánica estable y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), mejorando la retención de nutrientes y el almacenamiento de agua. Paralelamente, la biomasa y actividad enzimática microbiana del suelo aumentan, facilitando la degradación de compuestos complejos y la mineralización continua de nutrientes (Wang et al., 2022; Ouled Lhaj et al., 2024). Estos procesos también favorecen la formación de agregados y la estructura del suelo, aumentando su porosidad, aireación y capacidad de retención hídrica.

De manera integrada, los efectos físicos, químicos y biológicos del compost fortalecen la salud edáfica

y promueven la resiliencia del suelo frente a condiciones adversas, como la sequía o la acidificación. Asimismo, la fracción húmica derivada de la actividad microbiana contribuye al secuestramiento de carbono, incrementando la estabilidad del carbono orgánico y reduciendo la huella ambiental de los sistemas agrícolas (Suvendran et al., 2025).

En conjunto, el compostaje constituye una herramienta clave para restaurar la fertilidad del suelo, cerrar los ciclos de nutrientes y consolidar la sostenibilidad agroecológica, al integrar procesos microbianos activos con mejoras edáficas duraderas.



Figura 3. Mejora del ciclo de nutrientes del suelo mediante la aplicación de compost. El compost mejora la disponibilidad de nutrientes (N, P, K), aumenta la materia orgánica estable y promueve la actividad microbiana responsable del reciclaje biogeoquímico. Estos procesos incrementan la capacidad de retención de nutrientes y agua, fortaleciendo la estructura del suelo y la productividad vegetal.

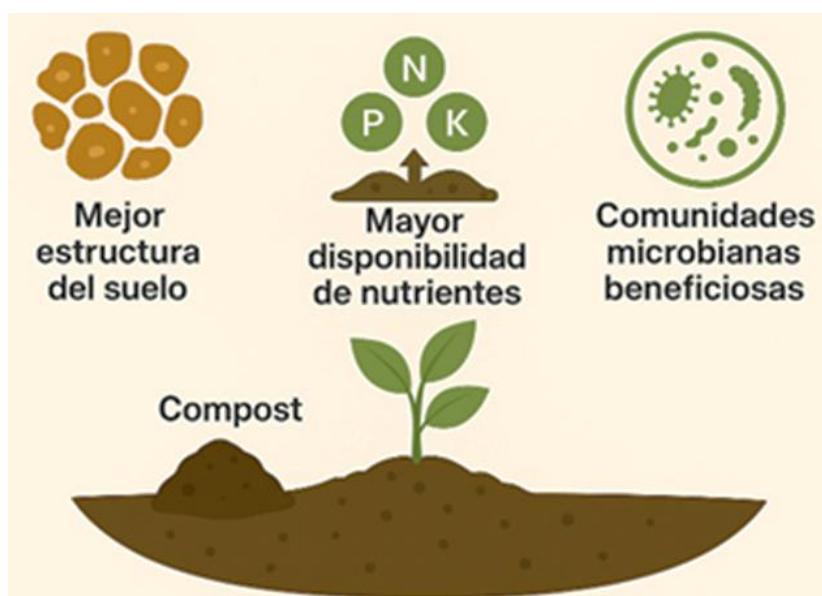


Figura 4. Impacto del compostaje en la fertilidad del suelo. La aplicación de compost mejora la estructura y estabilidad del suelo, incrementa la disponibilidad de nutrientes (N, P, K) y fomenta comunidades microbianas benéficas que contribuyen a la sostenibilidad agroecológica.

4.5.1. Cambios físicos: porosidad y capacidad de retención de agua

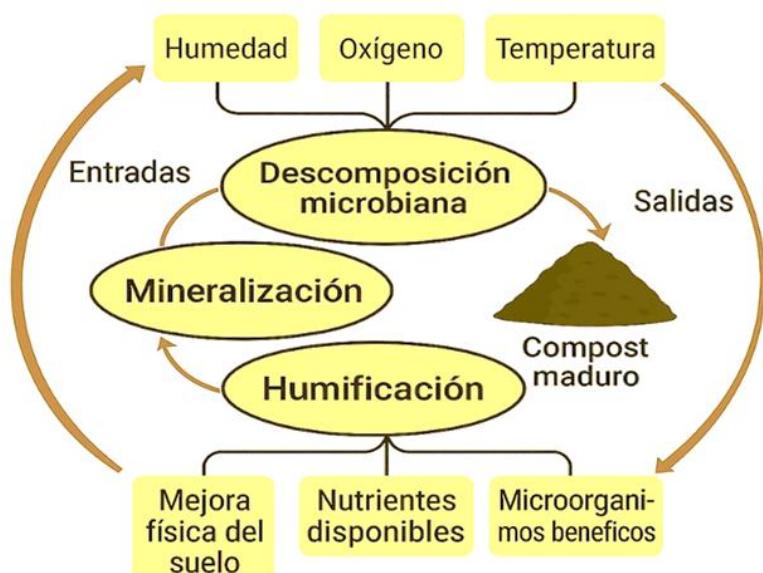
La adición de compost aumenta la porosidad del suelo y la capacidad de retención de agua, creando una estructura del suelo más estable. La materia orgánica del compost mejora la agregación de partículas del suelo, reduciendo la compactación y mejorando la aireación. Esta estructura mejorada permite una mejor infiltración y retención de agua, fundamental para el crecimiento de las plantas en regiones áridas (Suvendran et al., 2025). Además, el compost reduce la escorrentía superficial y la erosión, lo que favorece la estabilidad del suelo a largo plazo (Mehta et al., 2014).

4.5.2. Cambios químicos: pH, cationes disponibles y relación C/N

El compostaje influye en el pH del suelo, equilibrando los suelos ácidos o alcalinos hacia la neutralidad, creando así condiciones óptimas para la absorción de nutrientes (Ho et al., 2022; Ouled Lhaj et al., 2024). La descomposición de material orgánico libera nutrientes esenciales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), aumentando la disponibilidad de cationes intercambiables como calcio (Ca) y magnesio (Mg) (Sánchez et al., 2017; Wang et al., 2022). La relación carbono-nitrógeno (C/N), un indicador crucial de la madurez del compost se estabiliza a través de la actividad microbiana, mejorando la fertilidad del suelo al mantener la disponibilidad de nitrógeno para las plantas (Azim et al., 2018).

4.5.3. Cambios biológicos: biomasa microbiana, actividad enzimática y dinámica de nutrientes

Durante la maduración del compost, se consolidan los procesos biológicos iniciados en las fases anteriores, dando lugar a una comunidad microbiana más estable y eficiente (Figura 5). El aumento de la biomasa microbiana y de la actividad enzimática refleja la estabilización de la materia orgánica y la formación de humus. Las enzimas extracelulares, como las celulasas, fosfatases y deshidrogenasas, desempeñan un papel clave en la transformación final de los residuos orgánicos, facilitando la liberación gradual de nutrientes esenciales (Ho et al., 2022; Nguyen et al., 2022). Estas actividades indican la madurez del compost y su capacidad para mejorar la disponibilidad de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en el suelo. A medida que el compost madura, la comunidad microbiana se especializa en procesos de humificación, estabilizando el carbono orgánico y reduciendo la presencia de compuestos fitotóxicos. Este equilibrio biológico mejora la resiliencia del suelo frente al estrés ambiental, fortalece la red trófica microbiana y contribuye a la supresión de patógenos (Ouled Lhaj et al., 2024). El compost maduro, por tanto, no solo actúa como fuente de nutrientes, sino como un bioestimulante natural que revitaliza la microbiota del suelo, incrementa la eficiencia del ciclo de nutrientes y promueve una fertilidad sostenible (Ahmed et al., 2023; Suvendran et al., 2025).



Efectos en la fertilidad del suelo

Figura 5. Proceso de compostaje y su efecto en la fertilidad del suelo. El compostaje transforma los residuos orgánicos en compost maduro mediante procesos de descomposición, mineralización y humificación, mejorando las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

4.6. Estrategias para optimizar los efectos microbianos del compost

Como se analizó en las secciones 2.3.5 y 2.3.6, el uso de inóculos microbianos y enmiendas como el biocarbón mejora la eficiencia y estabilidad del proceso de compostaje. A partir de los resultados descritos en las secciones 4.5 y 4.6, donde se evidencian los efectos del compost sobre la fertilidad y la actividad microbiana del suelo, se hace necesario identificar estrategias que potencien y mantengan dichos beneficios durante la producción y aplicación del compost.

4.6.1. Uso de inóculos microbianos específicos

La introducción de inóculos microbianos como bacterias, hongos y actinomicetos puede acelerar el proceso de compostaje al promover la degradación eficiente de la materia orgánica. Los microorganismos eficientes (ME), una mezcla de bacterias y hongos beneficiosos, han demostrado potencial para mejorar la madurez del compost y suprimir los patógenos. Las cepas microbianas específicas, como *Bacillus* y *Pseudomonas*, a menudo se utilizan para descomponer moléculas orgánicas complejas, lo que reduce el tiempo de compostaje y mejora la disponibilidad de nutrientes (Azim et al., 2018; Nguyen et al., 2022). Además, se ha demostrado que los microorganismos endófitos promueven el crecimiento de las plantas cuando se aplican al compost derivado de residuos agrícolas (Sánchez et al., 2017).

4.6.2. Ajustes del sustrato y las enmiendas

Adaptar los sustratos y las enmiendas es crucial para fomentar la actividad de los microorganismos clave. Ajustar la relación C/N es esencial, ya que un equilibrio C/N óptimo estimula el crecimiento y la descomposición microbiana (Sánchez et al., 2017; Nemet et al., 2021). Las enmiendas como el biocarbón, que mejoran la aireación y la retención de humedad, también mejoran el hábitat microbiano, lo que conduce a una mayor actividad enzimática y la descomposición de la materia orgánica. Además, agregar fósforo o potasio puede estimular las comunidades microbianas responsables del ciclo de nutrientes, lo que favorece la producción de compost de alta calidad (Nemet et al., 2021).

4.7. Uso del compostaje en diversos cultivos agrícolas

Como se resume en la Tabla 3, los diferentes métodos de compostaje han mostrado mejoras significativas en la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana en cultivos tropicales y templados. Estas evidencias confirman la versatilidad del compostaje como herramienta de

manejo sostenible, con efectos consistentes independientemente del cultivo o método empleado. El compostaje de residuos de banano ha mostrado un alto potencial para mejorar la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes, además de valorizar subproductos agrícolas mediante prácticas sostenibles (Mago et al., 2021; Khanyile et al., 2024; Kumari et al., 2025). Por ejemplo, el vermicompostaje incrementa la capacidad de retención de agua y mejora la estructura del suelo, lo que resulta fundamental en regiones con períodos de sequía (Martínez-Blanco et al., 2013; Suvendran et al., 2025). Químicamente, el compost elaborado a partir de residuos de banano incrementa la disponibilidad de nutrientes esenciales como potasio y calcio, que son críticos para la resistencia mecánica de la planta y la calidad del fruto (Ho et al., 2022). Además, la aplicación de estos composts fomenta la proliferación de rizobacterias promotoras del crecimiento, reduciendo la incidencia de enfermedades como la marchitez por *Fusarium oxysporum* (Mehta et al., 2014; Yao et al., 2023). En cultivos de tomate, se han utilizado métodos como el compostaje en hiladas y en recipientes, los cuales mejoran la porosidad y aireación del suelo, favoreciendo la penetración radicular y disminuyendo la compactación. Estas mejoras físicas, junto con el aumento en la disponibilidad de nitrógeno y fósforo, se traducen en un mejor balance de cationes y un incremento del rendimiento del cultivo (Xu et al., 2024; Mekkaoui et al., 2024). En el cultivo como el maíz, el compostaje ha demostrado efectos sustanciales sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. Diversos estudios evidencian que el biocarbón estabiliza la relación carbono-nitrógeno (C/N), mejora la capacidad de retención de humedad y aumenta la disponibilidad de nutrientes esenciales y micronutrientes (Essel et al., 2021; Zapałowska & Jarecki, 2024). Además, al proporcionar una estructura porosa y estable, actúa como soporte para la colonización microbiana, favoreciendo la actividad enzimática y la eficiencia en el reciclaje de nutrientes, lo que se traduce en una mayor productividad y sostenibilidad del sistema agrícola (Nguyen et al., 2022; Ali et al., 2025). El efecto del biocarbón sobre la microbiota y la dinámica microbiana del compostaje se aborda con mayor detalle en la sección 3.4.1 (Vermicompostaje y diversidad microbiana), donde se analizan los mecanismos de interacción y las comunidades predominantes durante el proceso. En hortalizas y tubérculos como la papa, el compostaje, particularmente mediante vermicompostaje y el método Bokashi, mejora la estructura física del suelo, favorece el desarrollo radicular y la retención de

agua, e incrementa la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio (Rittl et al., 2023; Ortega-Ramírez et al., 2024; El-Ghamry et al., 2024). Estas mejoras se reflejan en una mayor productividad y en la disminución de enfermedades del suelo, como la marchitez por *Fusarium* (*Fusarium oxysporum*) (Yao et al., 2023), un fenómeno también observado en tubérculos cultivados en suelos enriquecidos con compost (Martínez-Blanco et al., 2013).

Por último, en cultivos de arroz, el compost y sus combinaciones con biocarbón han demostrado mejorar la estructura y fertilidad del suelo, incrementando la diversidad microbiana y la eficiencia en el uso de nitrógeno en sistemas arroceros (Huang et al., 2023; Hazman et al., 2023; Farooq et al., 2024). El uso de métodos como la pila estática aireada y el compostaje en recipientes ha mejorado la capacidad de retención de agua del suelo, reducido la compactación y estabilizado el pH, factores esenciales para mantener la productividad bajo condiciones de humedad

constante (Michel et al., 2022; Suvendran et al., 2025). Además, la aplicación de compost promueve comunidades microbianas beneficiosas que contribuyen a la mineralización de nutrientes y a la supresión de patógenos, fortaleciendo la sostenibilidad de los sistemas arroceros (Nguyen et al., 2022; Rehman et al., 2023).

5. Conclusiones y perspectivas futuras

La integración del compostaje dentro de sistemas agroecológicos constituye una estrategia eficaz para mejorar la fertilidad del suelo y promover la sostenibilidad agrícola. Este proceso estimula la actividad de microorganismos beneficiosos, bacterias, hongos y actinomicetos, que desempeñan funciones esenciales en la descomposición de la materia orgánica, la mineralización y la estabilización de nutrientes. En particular, las bacterias solubilizadoras de fósforo y los organismos fijadores de nitrógeno incrementan la disponibilidad de nutrientes, favoreciendo tanto el crecimiento vegetal como la salud del suelo.

Tabla 3
Efecto del compostaje en diversos cultivos agrícolas

Cultivo	Método de Compostaje	Mejoras Físicas	Mejoras Químicas y Nutricionales	Impacto Biológico/Microbiano	Referencias
Banano	Vermicompostaje, Bokashi	Mayor retención de agua y mejor estructura del suelo.	Incremento en potasio, calcio y otros nutrientes esenciales; pH estabilizado.	Estimula rizobacterias promotoras del crecimiento y reduce la incidencia de marchitez (<i>Fusarium</i>).	(Mago et al., 2021; Khanyile et al., 2024; Kumari et al., 2025)
Tomate	Compostaje en hileras, en recipientes	Aumento de porosidad y aireación, reducción de compactación.	Mayor disponibilidad de nitrógeno y fósforo, balance de cationes.	Promoción del crecimiento radicular y mayor actividad enzimática.	(Mekkaoui et al., 2024; Xu et al., 2024)
Maíz	Compostaje con biocarbón	Reducción de la compactación, mejora en la retención de humedad.	Estabilización de la relación C/N e incremento de micronutrientes.	Incremento en la actividad microbiana y eficiencia en la degradación de la materia orgánica.	(Essel et al., 2021; Zapałowska & Jarecki, 2024; Ali et al., 2025)
Hortalizas	Vermicompostaje, Bokashi	Mejora de la estructura del suelo, reducción de la erosión.	Incremento en la disponibilidad de nutrientes esenciales y balance de pH.	Estimula comunidades microbianas beneficiosas y contribuye a la supresión de patógenos	(Soobhany et al., 2018; Oueld Lhaj et al., 2024)
Papa	Compostaje en hileras, Vermicompostaje	Mejor estructura del suelo, aumento en la retención de agua y reducción de la compactación.	Incremento en la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio, elementos clave para el desarrollo radicular.	Favorece la proliferación de PGPR y mejora la actividad enzimática, promoviendo un sistema radicular saludable.	(Rittl et al., 2023; El-Ghamry et al., 2024; Ortega-Ramírez et al., 2024)
Arroz	Compostaje en pila estática aireada, Recipientes	Aumento de la capacidad de retención de agua, reducción de la compactación y estabilidad en la estructura del suelo.	Mejora en la estabilidad del pH y disponibilidad de nutrientes como nitrógeno y micronutrientes esenciales.	Fomenta comunidades microbianas beneficiosas que optimizan la mineralización de nutrientes y reducen la incidencia de enfermedades.	(Huang et al., 2023; Hazman et al., 2023; Farooq et al., 2024)

El avance de las técnicas de compostaje, como Bokashi, el biocarbón, el vermicompostaje y los sistemas en recipientes o pilas aireadas, abre nuevas oportunidades para la gestión sostenible de residuos y la mejora de la productividad agrícola. El compostaje Bokashi, basado en microorganismos eficientes bajo condiciones anaeróbicas o parcialmente aeróbicas, permite una rápida descomposición y reciclaje de nutrientes; sin embargo, aún se requieren investigaciones que profundicen en la dinámica microbiana y los procesos de transformación de nutrientes, así como en su escalabilidad a nivel industrial.

Por su parte, el compostaje modificado con biocarbón destaca por su capacidad para mejorar la calidad del compost, estabilizar el carbono, retener nutrientes y favorecer el hábitat microbiano. No obstante, se necesita una comprensión más amplia de sus efectos a largo plazo sobre el secuestro de carbono y la ecología microbiana en distintos tipos de suelos. El vermicompostaje, que emplea lombrices para acelerar la descomposición, produce un compost con alta concentración de nutrientes y elevada diversidad microbiana; sin embargo, su aplicación a gran escala requiere condiciones controladas de temperatura, humedad y sustrato.

El compostaje en recipientes ofrece ventajas adicionales al permitir un control preciso de los parámetros ambientales (temperatura, humedad y aireación), lo que mejora la eficiencia del proceso y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. La integración de tecnologías de monitoreo automatizado representa una oportunidad para optimizar la eficiencia y evaluar la sostenibilidad de estos sistemas frente a los métodos tradicionales.

En síntesis, el compostaje se consolida como una alternativa viable, ecológica y de alto impacto para el manejo de residuos y la mejora de la fertilidad del suelo. En cultivos como el banano, su aplicación ha demostrado beneficios comprobados sobre la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la promoción de comunidades microbianas beneficiosas, sin efectos adversos sobre la calidad edáfica. La incorporación de microorganismos eficientes y enmiendas como el biocarbón refuerza el potencial del compostaje como herramienta clave para alcanzar una agricultura más sostenible, resiliente y adaptada a los desafíos del cambio climático.

En adelante, la investigación debería orientarse hacia el análisis dinámico de las comunidades microbianas mediante modelado predictivo y hacia la evaluación de la estabilidad del carbono a largo plazo, con el propósito de fortalecer la base científica que sustenta el compostaje como estrategia de

mitigación del cambio climático y restauración de suelos degradados.

Contribución de los autores

S. Sánchez Tigrero: Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing—original draft, Visualization. **D. Ramírez-Vargas:** Resources, Supervision, Project administration. **L. García Cruzatty:** Methodology, Investigation, Writing—review & editing, Formal analysis.

ORCID

S. Sánchez Tigrero  <https://orcid.org/0000-0002-4131-0561>
D. Ramírez-Vargas  <https://orcid.org/0000-0001-8709-457X>
L. García Cruzatty  <https://orcid.org/0000-0003-2625-7472>

Referencias bibliográficas

- Andreote, F. D., Gumiere, T., & Durrer, A. (2014). Exploring interactions of plant microbiomes. *Scientia Agricola*, 71(6), 528–539. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0195>
- Ahmed, T., Noman, M., Qi, Y., Shahid, M., Hussain, S., et al. (2023). Fertilization of microbial composts: a technology for improving stress resilience in plants. *Plants*, 12(20), 3550. <https://doi.org/10.3390/plants12203550>
- Ali, A., Jabeen, N., Chachar, Z., Chachar, S., Ahmed, S., Ahmed, N., Laghari, A. A., et al. (2025). The role of biochar in enhancing soil health and interactions with rhizosphere properties and enzyme activities in organic fertilizer substitution. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1595208. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1595208>
- Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussos, S., & Thami Alami, I. (2018). Composting parameters and compost quality: a literature review. *Organic Agriculture*, 8(2), 141–158. <https://doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z>
- Naveen, M. (2025). The role of organic matter in soil for improving crop productivity and soil health. *Journal of Experimental Agriculture International*, 47(2), 367–375. <https://doi.org/10.9734/jeai/2025/v47i23296>
- Castaño, R., Borrero, C., & Avilés, M. (2011). Organic matter fractions by SP-MAS ¹³C NMR and microbial communities involved in the suppression of *Fusarium* wilt in organic growth media. *Biological Control*, 58(3), 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.biocntrol.2011.05.011>
- Dentel, S. K., & Qi, Y. (2013). Management of sludges, biosolids, and residuals. In *Comprehensive Water Quality and Purification* (pp. 223–243). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00049-9>
- El-Ghamry, A. M., El-Sherpiny, M. A., Alkharpotly, A. A., Ghazi, D. A., Helmy, A. A., et al. (2024). The synergistic effects of organic composts and micronutrients on potato growth and productivity under salinity stress. *Heliyon*, 10(13), e33404. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33404>
- Essel, B., Abaidoo, R. C., Opoku, A., & Ewusi-Mensah, N. (2021). Mechanisms underlying nutrient interaction of compost and mineral fertilizer application in maize (*Zea mays L.*) cropping system in Ghana. *Frontiers in Soil Science*, 1, 630851. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2021.630851>
- Farooq, M. S., Majeed, A., Ghazy, A., Khan, N., Ullah, A., Rehman, A., & Alharby, H. F. (2024). Partial replacement of inorganic fertilizer with organic inputs for enhanced nitrogen use efficiency, grain yield, and decreased nitrogen losses under rice-based systems of mid-latitudes. *BMC Plant Biology*, 24, 919. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05629-w>
- Figiel, S., Rusek, P., Ryszko, U., & Brodowska, M. S. (2025). Microbially enhanced biofertilizers: technologies, mechanisms of action, and agricultural applications. *Agronomy*, 15(5), 1191. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051191>
- Goldan, E., Nedeff, V., Barsan, N., Culea, M., Panainte-Lehadus, M., Mosnegutu, E., Tomozei, C., Chitimis, D., & Irimia, O. (2023).

- Assessment of manure compost used as soil amendment—A review. *Processes*, 11(4), 1167. <https://doi.org/10.3390/pr11041167>
- Gomiero, T., Pimentel, D., & Paoletti, M. G. (2011). Environmental impact of different agricultural management practices: Conventional vs. organic agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(1–2), 95–124. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554355>
- Hazman, M., Fawzy, S., Hamdy, A., Abdelkader, A., El-Sayed, A., & Mahmoud, A. (2023). Enhancing rice resilience to drought by applying biochar-compost mixture in low-fertile sandy soil. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 12, 74. <https://doi.org/10.1186/s43088-023-00411-7>
- Ho, T. T. K., Tra, V. T., Le, T. H., Nguyen, N. K. Q., Tran, C. S., et al. (2022). Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100211>
- Huang, X., Wang, H., Zou, Y., Qiao, C., Hao, B., Shao, Q., Wu, W., Wu, H., Zhao, J., & Ren, L. (2023). Rice straw composting improves the microbial diversity of paddy soils to stimulate the growth, yield, and grain quality of rice. *Sustainability*, 15(2), 932. <https://doi.org/10.3390/su15020932>
- Kausar, S., Muhsin, S., Khyber, B., & Azeem, M. (2021). Role of soil microbes in soil health and crop production—a review. *Current Research in Agriculture and Farming*, 2(5), 1–8. <https://doi.org/10.18782/2582-7146.159>
- Khanyile, N., Dlamini, N., Masenya, A., Madlala, N. C., & Shezi, S. (2024). Preparation of biofertilizers from banana peels: their impact on soil and crop enhancement. *Agriculture*, 14(11), 1894. <https://doi.org/10.3390/agriculture14111894>
- Khan, M. S., Zaidi, A., & Ahmad, E. (2014). Mechanism of phosphate solubilization and physiological functions of phosphate-solubilizing microorganisms. In M. S. Khan, A. Zaidi, & J. Musarrat (Eds.), *Phosphate solubilizing microorganisms* (pp. 31–62). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08216-5_2
- Kumari, S., Debbarma, R., Habibi, M., Haque, S., & Suprasanna, P. (2025). Banana waste valorisation and the development of biodegradable biofilms. *Waste Management Bulletin*, 3(3), 100213. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100213>
- Lerma-Moliz, R., López-González, J. A., Suárez-Estrella, F., Martínez-Gallardo, M. R., Jurado, M. M., et al. (2023). Mitigation of phytotoxic effect of compost by application of optimized aqueous extraction protocols. *Science of the Total Environment*, 873, 162288. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162288>
- Mago, M., Yadav, A., & Garg, V. K. (2021). Management of banana crop waste biomass using vermicomposting technology. *Bioresource Technology*, 326, 124742. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124742>
- Martínez-Blanco, J., Lazcano, C., Christensen, T. H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Möller, J., Antón, A., & Boldrin, A. (2013). Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), 721–732. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0148-7>
- Mehta, C. M., Palni, U., Franke-Whittle, I. H., & Sharma, A. K. (2014). Compost: Its role, mechanism and impact on reducing soil-borne plant diseases. *Waste Management*, 34(3), 607–622. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.012>
- Mekkaoui, F., Ait-El-Mokhtar, M., Zaari Jabri, N., Amghar, I., Essadssi, S., & Hmyene, A. (2024). The Use of Compost and Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Their Combination to Improve Tomato Tolerance to Salt Stress. *Plants*, 13(16), 2225. <https://doi.org/10.3390/plants13162225>
- Mendes, G. O., Dias, C. S., Silva, I. R., Júnior, J. I. R., Pereira, O. L., & Costa, M. D. (2013). Fungal rock phosphate solubilization using sugarcane bagasse. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 29(1), 43–50. <https://doi.org/10.1007/s11274-012-1156-5>
- Michel, F., O'Neill, T., Rynk, R., Gilbert, J., Smith, M., Aber, J., & Keener, H. (2022). Forced aeration composting, aerated static pile, and similar methods. In *The Composting Handbook* (pp. 197–269). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85602-7.00007-8>
- Nemet, F., Perić, K., & Lončarić, Z. (2021). Microbiological activities in the composting process: A review. *Columella: Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 8(2), 41–53. <https://doi.org/10.18380/szie.colum.2021.8.2.41>
- Nguyen, M. K., Lin, C., Hoang, H. G., Sanderson, P., Dang, B. T., Bui, X. T., Nguyen, N. S. H., Vo, D. V. N., & Tran, H. T. (2022). Evaluate the role of biochar during the organic waste composting process: A critical review. *Chemosphere*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134488>
- Ortega-Ramírez, A. T., García Moreno, D., & Reyes Tovar, M. (2024). Composting as a Cleaner Production Strategy for the Soil Resource of Potato Crops in Choconta, Colombia. *Resources*, 13(10), 137. <https://doi.org/10.3390/resources13100137>
- Oueld Lhaj, M., Moussadek, R., Zouahri, A., Sanad, H., Saafadi, L., Mdarhi Alaoui, M., & Mouhir, L. (2024). Sustainable agriculture through agricultural waste management: a comprehensive review of composting's impact on soil health in moroccan agricultural ecosystems. *Agriculture*, 14(12), 2356. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122356>
- Pepe, O., Ventorino, V., & Blaiotta, G. (2013). Dynamic of functional microbial groups during mesophilic composting of agro-industrial wastes and free-living (N₂)-fixing bacteria application. *Waste Management*, 33(7), 1616–1625. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.03.025>
- Rehman, S., De Castro, F., Aprile, A., Benedetti, M., & Fanizzi, F. P. (2023). Vermicompost: Enhancing plant growth and combating abiotic and biotic stress. *Agronomy*, 13(4), 1134. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041134>
- Rittl, T. F., Grønmyr, F., Bakken, I., & Løes, A. K. (2023). Effects of organic amendments and cover crops on soil characteristics and potato yields. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 73(1), 13–26. <https://doi.org/10.1080/09064710.2023.2165963>
- Sánchez, O. J., Ospina, D. A., & Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management*, 69, 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>
- Singh, S., & Nain, L. (2014). Microorganisms in the conversion of agricultural wastes to compost. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 80(2), 473. <https://doi.org/10.16943/ptinsa/2014/v80i2/4>
- Soobhany, N. (2018). Preliminary evaluation of pathogenic bacteria loading on organic Municipal Solid Waste compost and vermicompost. *Journal of Environmental Management*, 206, 763–767. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.029>
- Soobhany, N., Mohee, R., & Garg, V. K. (2015). Experimental process monitoring and potential of Eudrilus eugeniae in the vermicomposting of organic solid waste in Mauritius. *Ecological Engineering*, 84, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.08.003>
- Sreevidya, M., Gopalakrishnan, S., Kudapa, H., & Varshney, R. K. (2016). Exploring plant growth-promotion actinomycetes from vermicompost and rhizosphere soil for yield enhancement in chickpea. *Brazilian Journal of Microbiology*, 47(1), 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2015.11.030>
- Suvendran, S., Acevedo, M. F., Smithers, B., Walker, S. J., & Xu, P. (2025). Soil fertility and plant growth enhancement through compost treatments under varied irrigation conditions. *Agriculture*, 15(7), 734. <https://doi.org/10.3390/agriculture15070734>
- Wang, P., Han, S., & Lin, Y. (2022). Role of microbes and microbial dynamics during composting. In *Current Developments in*

- Biotechnology and Bioengineering: Advances in Composting and Vermicomposting Technology* (pp. 169–220). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91874-9.00011-5>
- Xu, P., Shu, L., Yang, Y., Kumar, S., Tripathi, P., et al. (2024). Microbial agents obtained from tomato straw composting effectively promote tomato straw compost maturation and improve compost quality. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 270, 115884.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115884>
- Yao, X., Guo, H., Zhang, K., Zhao, M., Ruan, J., & Chen, J. (2023). Trichoderma and its role in biological control of plant fungal and nematode diseases. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1160551.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551>
- Zapałowska, A., & Jarecki, W. (2024). The impact of using different types of compost on the growth and yield of corn. *Sustainability*, 16(2), 511. <https://doi.org/10.3390/su16020511>