

MICROBIOTA DEL SUELO AGRÍCOLA Y CAMBIO CLIMÁTICO: DESAFÍOS PARA LA RESILIENCIA PRODUCTIVA Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES. UNA REVISIÓN

Agricultural soil microbiota and climate change: Challenges for productive resilience and emerging technologies. A review

Victor Paco-Pérez¹, María Soledad Condori-Tacora²

RESUMEN


El cambio climático está alterando los campos de cultivo, lo cual afecta a los microbios del suelo, que son muy importantes para que la tierra esté sana y productiva. Este artículo revisa de manera integral como afecta el cambio climático sobre la microbiota del suelo agrícola, considerando su respuesta ante eventos extremos, las estrategias de manejo para mitigar efectos adversos y los avances recientes en tecnologías metagenómicas y modelado predictivo en este ámbito. La investigación corresponde a una revisión teórica que se basa en información de bases de datos académicas, aplicando criterios rigurosos para la selección de fuentes. Los hallazgos muestran que el cambio climático altera tanto la diversidad como la estructura y conectividad de las redes microbianas que son esenciales para procesos de la mineralización de nutrientes, ciclo del carbono y regulación hídrica. La intensificación agrícola y la pérdida de diversidad microbiota reducen la capacidad del suelo para sostener la productividad en condiciones adversas. Entre las estrategias están el uso de biofertilizantes, compost, biochar y rotación de cultivos. Además, tecnologías emergentes como la metagenómica, los genomas ensamblados por metagenoma, los análisis multi-ómicos y la inteligencia artificial, que fortalecen la resiliencia del suelo, aunque su éxito depende del contexto edafoclimático. En conclusión, para tener una agricultura sostenible requiere integrar prácticas agroecológicas y uso de tecnológicas modernas que estimen la microbiota como recurso estratégico frente al cambio climático. Se sugiere unir conocimientos de diferentes áreas para adaptar las estrategias a cada tipo de suelo y clima y crear leyes que reconozcan la importancia de los microbios del suelo.

Palabras clave: suelo, cambio climático, microbiota, manejo, metagenómica.

ABSTRACT

Climate change is altering farmland, affecting soil microbes, which are critical for healthy, productive soil. This article comprehensively reviews how climate change affects agricultural soil microbiota, considering its response to extreme events, management strategies to mitigate adverse effects, and recent advances in metagenomic technologies and predictive modeling in this field. The research corresponds to a theoretical review based on information from academic databases, applying rigorous criteria for source selection. The findings show that climate change alters both the diversity and the structure and connectivity of microbial networks that are essential for processes of nutrient mineralization, carbon cycling, and water regulation. Agricultural intensification and loss of microbiota diversity reduce the soil's ability to sustain productivity under adverse conditions. Strategies include the use of biofertilizers, compost, biochar, and crop rotation. Furthermore, emerging technologies such as metagenomics, metagenome-assembled genomes, multi-omics analysis, and artificial intelligence strengthen soil resilience, although their success depends on the soil and climate context. In conclusion, sustainable agriculture requires integrating agroecological practices and using modern technologies that value the microbiota as a strategic resource in the face of climate change. It is suggested to combine knowledge from different areas to adapt strategies to each type of soil and climate and to create laws that recognize the importance of soil microbes.

Keywords: soil, climate change, microbiota, management, metagenomics.

¹  Unidad Académica Campesina Tiahuanacu, Ingeniería Agronómica, Universidad Católica Boliviana San Pablo, Bolivia.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6030-248X>. laramvico@gmail.com

² Unidad Académica Campesina Tiahuanacu, Ingeniería Agronómica, Universidad Católica Boliviana San Pablo, Bolivia.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9366-2684>

INTRODUCCIÓN

El cambio climático está afectando a los microbios del suelo en las zonas agrícolas, lo cual tiene un impacto negativo en la agricultura y el medio ambiente (Mukhtar et al., 2023; Clegg y Pawar, 2024; Khan y Ball, 2024). Los microbiomas a través de procesos bioquímicos y biofísicos, alteran el ambiente del suelo, mejoran la estructura del suelo y pueden ayudar con la mitigación del cambio climático (Zhelezova et al., 2025). La gestión de microbiota mediante prácticas como enmiendas orgánicas, rotaciones culturales y biocontrol constituye una estrategia emergente para que los suelos sean más resilientes (De Corato, 2020). Este escenario, se puede predecir con las técnicas novedosas como la ingeniería microbiana asistida por inteligencia artificial (Iqbal et al., 2025).

Los estudios muestran con bastante claridad que las redes de colaboración transdisciplinaria y sostenida son mecanismos vitales para que las prácticas agrícolas sean verdaderamente sostenibles y resilientes frente al cambio climático (Vázquez et al., 2022; Tsegaye et al., 2024). Sin embargo, en los aspectos más críticos de la microbiota del suelo todavía existe vacíos que resulta difícil ignorar como la sequía extrema, olas de calor y las lluvias torrenciales (Gutiérrez, 2021; Lara-Rodríguez y Travieso-Bello, 2022; Zandt et al., 2023; Villavicencio-Gutiérrez et al., 2023). A esto, se suma la falta de estudios que integren la metagenómica con modelado predictivo, lo que permitiría anticipar el futuro de los microbianos bajo escenarios climáticos cambiantes (Pérez-Sosa y Granados-Ramírez, 2020; Luna-Robles et al., 2022; López-Teloxa y Monterroso-Rivas, 2024).

Estudios han evidenciado contundentemente de que las bacterias, hongos y arqueas sostienen la estabilidad del ecosistema suelo-planta, reforzando la resiliencia ecológica y facilitando la remediación ambiental (Chen et al., 2024; Wang et al., 2024). Tecnologías como la metagenómica y los genomas ensamblados por metagenoma permiten explorar comunidades microbianas con un nivel detallado para comprender mejor sus respuestas al estrés climático (Banerjee et al., 2024).

Las nuevas herramientas también están cambiando el panorama como metodologías de modelado predictivo basadas en inteligencia artificial que podrían trasladarse al estudio de los suelos agrícolas para anticipar patrones de resiliencia (McIntire et al., 2022; Li et al., 2024; Pace et al., 2025). Además, las redes

de co-ocurrencia microbiana han mostrado que la diversidad y conectividad de estas comunidades no son casualidad, si no dependen estrechamente de las condiciones climáticas y ciertos taxones actúan como auténticos indicadores de resiliencia (Smith et al., 2022; Pechlivanis et al., 2024).

Todo esto nos lleva a una evidencia de la necesidad de avanzar hacia una investigación que no solo llene vacíos en la literatura, sino que genere soluciones prácticas y accesibles para los agricultores. Estrategias como diversificar cultivos, recarbonizar suelos o adoptar prácticas agroecológicas no son simples opciones, sino son herramientas concretas para convertir el conocimiento científico en acción (Nalluri y Karri, 2024). En la actualidad el entendimiento del futuro de la microbiota del suelo sigue siendo limitado por la falta de estudios que combinen metagenómica con modelos predictivos (Pérez-Sosa y Granados-Ramírez, 2020; Rosales-Martínez et al., 2020; López-Teloxa y Monterroso-Rivas, 2024).

Por todo esto, el objetivo de este artículo es examinar de manera integral el impacto del cambio climático sobre la microbiota del suelo agrícola. Se busca comprender sus respuestas funcionales frente a eventos extremos, explorar las estrategias de manejo microbiano que pueden mitigar esos efectos y destacar los avances en metagenómica y modelado predictivo. Este enfoque multidimensional no pretende solo enriquecer la literatura académica, sino también acercar el conocimiento a la práctica, para asegurar sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes en un contexto de creciente incertidumbre climática.

METODOLOGÍA

El apartado de método de esta revisión teórica se construyó con un enfoque sistemático, diseñado para recopilar y organizar información sobre el impacto del cambio climático en la microbiota del suelo agrícola y para detectar con claridad dónde están los vacíos de conocimiento. La intención es aportar un panorama actualizado y al mismo tiempo, abrir preguntas que todavía no tienen respuesta.

Proceso de búsqueda y selección de fuentes

Para la búsqueda de información recurrimos a bases de datos reconocidas por su solidez académica como Scopus, Web of Science (WOS), SciELO y Latindex. La exploración se limitó a los últimos cinco años (2020-2025), con el propósito de acceder a los avances más recientes de la investigación. Se consideraron artículos

en español e inglés, lo que permitió abarcar tanto la producción científica regional como la internacional. Las palabras clave fueron: cambio climático, microbiota del suelo, eventos climáticos extremos, estrategias de manejo microbiano y tecnologías metagenómicas. Para que los resultados fueran más precisos, se emplearon operadores booleanos (AND, OR), mezclando los términos de manera flexible.

Criterios de inclusión y exclusión

Se definieron criterios claros para asegurar que los estudios seleccionados fueran relevantes y de alta calidad. Se incluyeron artículos originales y revisiones, mientras que se descartaron tesis, editoriales o publicaciones sin base científica sólida. La relevancia temática fue el criterio más importante porque solo se consideraron estudios que abordaban de manera directa la interacción entre cambio climático y microbiota del suelo. Esto implicaba que los trabajos debían analizar efectos funcionales, estrategias de mitigación o la utilización de herramientas emergentes, como la metagenómica y el modelado predictivo. Se dejaron fuera aquellos artículos que presentaban deficiencias metodológicas evidentes, ya sea por un diseño experimental poco claro o por análisis demasiado superficiales, porque la idea fue construir un panorama sólido y confiable de la evidencia disponible.

TEXTO PRINCIPAL

Cambio climático y fenómenos extremos

El cambio climático es una alteración profunda y duradera en los patrones del clima que afecta a todo el

planeta o a una región (Arrieta y Arpi, 2021). Este factor incluye variaciones en la precipitación, en frecuencia de sequías, en lluvias intensas y otros eventos extremos que, a la larga, transforman los ecosistemas (Rosales-Martínez et al., 2020; Santillán-Fernández et al., 2021; Pappo et al., 2023). Estos cambios tienen repercusiones directas en la producción agrícola (Tabla 1), ya que afectan no solo en la cantidad de productos, sino también en su calidad. Además, estudios afirman que los eventos extremos, como sequías e inundaciones, incrementan la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas, interrumpiendo ciclos productivos (Rosales-Martínez et al., 2020; Salas y Maldonado, 2020; Nalluri y Karri, 2024; Sun et al., 2025). Este contexto de inestabilidad implica que los agricultores deben adaptarse constantemente a las nuevas condiciones (Kumari et al., 2023; Nalluri y Karri, 2024; Trujillo, 2024; Ogwu y Kosoe, 2025).

Altas temperaturas pueden inducir al estrés hídrico en las plantas, lo que afecta a su crecimiento y productividad (Tabla 1). A su vez, las variaciones de precipitación pueden llevar a una saturación del suelo y por ende, a problemas de anaerobiosis que alteran la microbiota y la disponibilidad de nutrientes (Debouk et al., 2020; Barahona-Mejía et al., 2022; t Zandt et al., 2023). Esta evidencia refuerza que en los fenómenos climáticos extremos se requiere integrar la ecología microbiana del suelo, ya que los microorganismos desempeñan funciones clave en el ciclo de nutrientes, en la estabilidad del suelo y en la resistencia vegetal (Wang et al., 2024; Xu et al., 2024).

Tabla 1. Impactos del cambio climático en la agricultura y soluciones tecnológicas emergentes.

Aspecto	Impacto en la agricultura	Adaptación y mitigación
Aumento de la temperatura.	Reduce los rendimientos de los cultivos, altera los ciclos de crecimiento y aumenta la evaporación de agua en los suelos.	Agricultura de precisión utilizando sensores remotos y sistemas de riego automatizados para gestionar el uso del agua.
Sequías prolongadas.	Afecta a la disponibilidad de agua, reduce la capacidad de los suelos para almacenar nutrientes y afecta la salud microbiana del suelo.	Tecnologías de conservación de agua como sistemas de riego tecnificado. Implementación de cultivos resistentes a la sequía a través de la biotecnología y la mejora genética.
Inundaciones y erosión del suelo.	Incide significativamente en la capacidad productiva de las tierras agrícolas y en la calidad de los suelos.	Restauración de suelos degradados mediante el uso de biochar, compost entre otros.
Incremento de enfermedades y plagas.	El cambio climático favorece la incidencia de plagas y enfermedades que afectan a los cultivos.	Uso de plaguicidas biológicos y estrategias de control biológico mediante microorganismos. Técnicas de edición genética para hacer que las plantas sean más resistentes a factores adversos.
Cambios en la disponibilidad de nutrientes.	Tiene efectos negativos en la disponibilidad de nutrientes en los suelos y afecta el crecimiento de las plantas.	Bioremediación del suelo utilizando microorganismos para mejorar la absorción de nutrientes y reducir la toxicidad del suelo.

Impacto en la biodiversidad agrícola.	La alteración de los ecosistemas agrícolas reduce la biodiversidad de cultivos y aumentar el riesgo de pérdidas agrícolas.	Agricultura regenerativa, que promueva la diversificación de cultivos y la rotación de especies para mejorar la biodiversidad.
---------------------------------------	--	--

Las investigaciones revelan que los ecosistemas naturales cuentan con una microbiota del suelo mucho más diversa y estable que los agroecosistemas intensivos (Gupta et al., 2022). Esta disminución en la diversidad microbiana dificulta la recuperación de los suelos tras eventos climáticos extremos, lo que subraya la urgencia de desarrollar estrategias de manejo sostenible (Demyanyuk et al., 2020). Además, los factores edáficos como la humedad, el pH y la disponibilidad de nutrientes condicionan la estructura y la dinámica de la microbiota, generando respuestas muy distintas cuando el suelo se enfrenta a perturbaciones climáticas (Ni et al., 2021; Silva et al., 2025). Por otra parte, los microorganismos transforman propiedades físicas e hidrológicas del suelo como la estabilidad estructural y la capacidad de retención de agua, lo que resulta clave para amortiguar los efectos de sequías (Iqbal et al., 2025).

Para comprender a fondo las dinámicas microbianas frente a fenómenos extremos se requiere enfoques avanzados de metagenómica y la construcción de genomas ensamblados (Rivera-Urbalejo et al., 2021; Banerjee et al., 2024). Además, la manipulación dirigida del microbioma mediante prácticas agroecológicas puede favorecer el desarrollo de suelos supresivos de patógenos (De Corato, 2020). Estudios recientes muestran que los climas áridos y polares exhiben comunidades menos diversas, pero con redes más densas de co-ocurrencia, mientras que en climas templados la diversidad y modularidad son mayores (Pechlivanis et al., 2024). Estos patrones sugieren que la resiliencia microbiana ante fenómenos extremos depende tanto de la diversidad como de la conectividad de sus redes (Boyle et al., 2024).

Los microorganismos del suelo no son solo parte de la naturaleza, sino que se han convertido en un factor clave para ayudar a los cultivos a resistir los cambios del calentamiento global, ya que la evidencia científica muestra que estos diminutos organismos no solo participan en los ciclos biogeoquímicos, sino que también responden con sorprendente plasticidad a estreses como sequías, inundaciones o variaciones extremas de temperatura. En esas condiciones,

se juega la regulación de procesos críticos como la mineralización de nutrientes, el ciclo del carbono o la estabilidad hidrológica de los suelos (Santillán-Fernández et al., 2021; t Zandt et al., 2023; Sun et al., 2025). Por tanto, la diversidad microbiana funciona como un seguro biológico, mientras más rica y funcional sea la comunidad, mayor es la capacidad de recuperación del agroecosistema. En contraste, los sistemas intensivos que erosionan esta diversidad también debilitan su propia capacidad de sostener procesos esenciales (Demyanyuk et al., 2020; Silva et al., 2025).

Microbiota del suelo manifiesta sensibilidad a factores ambientales

La microbiota del suelo está formada por un universo diminuto fascinante como bacterias, hongos y protozoos (Tabla 2), cada uno cumple silenciosamente funciones importantes para mantener la salud del suelo y tener buenas cosechas (Rosabal-Ayan et al., 2021; López-Teloxa y Monterroso-Rivas, 2024). Estos microorganismos no solo cumplen tareas básicas como descomponer la materia orgánica, fijar nitrógeno y hacer que los nutrientes estén disponibles para las plantas, sino también sostienen la fertilidad y el rendimiento de los cultivos (Rosabal-Ayan et al., 2021; Garbarino-Mendiondo, 2023; Singh et al., 2023; Jiao et al., 2024). Pero son extraordinariamente sensibles a los cambios de temperatura, la humedad y a la disponibilidad de oxígeno (Wu et al., 2023; Sun et al., 2025).

En los sistemas agrícolas intensivos, la diversidad y abundancia microbiana disminuye de forma significativa en comparación con suelos naturales (Demyanyuk et al., 2020). Cuando los microorganismos desaparecen, el suelo pierde su red de seguridad frente a fenómenos climáticos extremos (Quilca-Parillo et al., 2022; Kumari et al., 2023). Por ejemplo, estudios que analizaron tres décadas de investigación encontraron que la estabilidad y diversidad microbiana están directamente ligadas a la capacidad de las plantas para resistir condiciones adversas y mantener la productividad (Wang et al., 2024).

Tabla 2. Microbiota del suelo agrícola y su influencia en la resiliencia productiva.

Descripción	Desafíos para la resiliencia productiva	Tecnologías emergentes
El suelo alberga una variedad de microorganismos como bacterias, hongos, actinobacterias y arqueas, que realizan funciones esenciales para el ecosistema.	La alteración de la composición microbiana del suelo debido al uso excesivo de fertilizantes y pesticidas puede reducir la biodiversidad microbiana, afectando la calidad del suelo y la producción agrícola.	Uso de biofertilizantes y biocontroladores microbianos para restaurar la microbiana del suelo. Uso de metagenómica para monitorear y seleccionar especies microbianas beneficiosas.
Las interacciones entre microorganismos son cruciales para la disponibilidad de nutrientes y la salud del suelo.	La alteración de las interacciones microbianas por prácticas agrícolas intensivas puede reducir la capacidad del suelo para descomponer materia orgánica, afecta la fertilidad y disminuye la resistencia de las plantas a enfermedades y plagas.	Edición genética de microorganismos para mejorar su capacidad de interactuar favorablemente con las plantas y optimizar la descomposición de nutrientes.
Una alta diversidad microbiana se asocia con suelos más saludables y resistentes a perturbaciones externas.	La pérdida de biodiversidad microbiana debido al monocultivo y la degradación del suelo disminuye la capacidad de los suelos para adaptarse a cambios ambientales, como sequías o inundaciones.	Análisis de redes microbianas para evaluar la biodiversidad y restaurar la función del suelo. Uso de inoculantes microbianos para aumentar la diversidad microbiana.
La microbiota agrícola juega un rol clave en la adaptación de las plantas a condiciones de estrés abiótico, como a la sequía o al exceso de salinidad.	La alteración de la microbiota del suelo por el cambio climático podría afectar la resistencia de las plantas a condiciones extremas de temperatura, sequía, salinidad o reduciendo la productividad agrícola.	Biotechnología para seleccionar o crear microorganismos que mejoren la tolerancia de las plantas a factores de estrés, como hongos o bacterias que incrementen la tolerancia a la sequía.
Los microorganismos del suelo participan activamente en el ciclo de carbono, nitrógeno y fósforo, facilitando la disponibilidad de nutrientes.	La pérdida de funciones microbianas esenciales para el reciclaje de nutrientes puede llevar a una mayor dependencia de fertilizantes sintéticos, lo que afecta la sostenibilidad del sistema agrícola y contribuye al cambio climático.	Biofertilizantes y biochar derivados de microorganismos para mejorar la retención de nutrientes y secuestrar carbono en el suelo.

La caracterización de la microbiota del suelo a través de genomas ensamblados por metagenómica permite detectar cambios funcionales en microorganismos clave (Figura 1). Estudios recientes revelan que las comunidades microbianas forman redes de interacción que responden de manera diferenciada según el gradiente climático (Siddique et al., 2023; Pechlivanis et al., 2024). Por lo cual, preservar y manejar adecuadamente estos diminutos se vuelve fundamental para asegurar sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes (Ogwu y Kosoe, 2025). Las estrategias prácticas como la aplicación de biofertilizantes, enriquecen el suelo con materia orgánica, también se puede apostar por un manejo agroecológico que ayudaría a mantener comunidades microbianas más estables (Pappo et al., 2023).

La resiliencia no se trata solo de tener muchas especies, sino de la estructura de las redes de co-ocurrencia. Estudios revelan que, en climas áridos o polares, aunque existe menor diversidad, las redes microbianas son más densas, mientras que en climas templados la diversidad es mayor, pero las interacciones resultan más modulares (Chu et al.,

2020; Pechlivanis et al., 2024). Por tanto, la estabilidad de un agroecosistema no puede evaluarse solo por el número de microbios presentes, sino también se debe considerarse la forma que se conectan entre sí (Chen et al., 2024; Sanders y Frago, 2024).

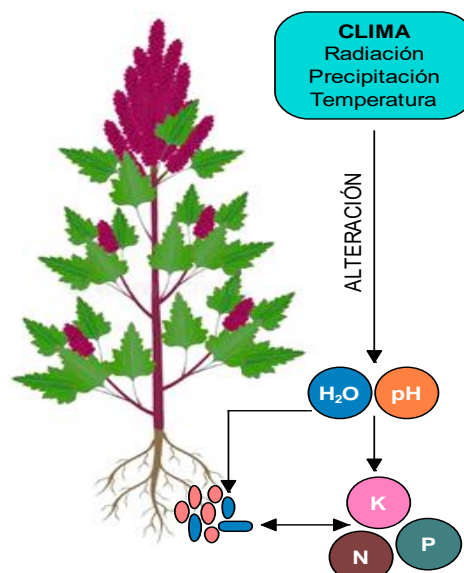


Figura 1. Los cambios climáticos remodelan la interacción entre los recursos del suelo y microbios.

Los factores como el pH, la humedad y la disponibilidad de nutrientes, no solo determinan la diversidad de microorganismos (Figura 1), sino también su capacidad de adaptación a las presiones ambientales (Zhang et al., 2024; Silva et al., 2025). Lo sorprendente es que los microorganismos, además de responder a estímulos químicos o biológicos, también dejan una huella física modificando la textura del suelo, regulando su porosidad y su capacidad de retener agua, lo que le convierten en verdaderos amortiguadores frente a los extremos climáticos (Zhou et al., 2022; Iqbal et al., 2025). La combinación de modelado predictivo, la inteligencia artificial y el análisis multi-ómicos permite anticipar la forma que reaccionará la microbiota del suelo ante los cambios ambientales y a partir de esa mirada adelantada, se puede diseñar prácticas de manejo más inteligentes, flexibles y proactivas (McIntire et al., 2022; Araújo et al., 2023; Li et al., 2024; Pace et al., 2025). Además, cuando estas herramientas se apoyan en redes científicas transdisciplinarias, el conocimiento se convierte en estrategias agrícolas adaptativas, capaces de aumentar la resiliencia de los cultivos (Tsegaye et al., 2024).

Funciones de la microbiota ante estrés climático

Durante los periodos de sequía, su actividad enzimática de los microorganismos se reduce significativamente, pero cuando el calor incrementa, la respiración microbiana se acelera y libera carbono hacia la atmósfera (Jurado-Guerra et al., 2021; Santillán-Fernández et al., 2021). Este exceso se convierte en gases de efecto invernadero, rompiendo poco a poco el delicado equilibrio de los ecosistemas,

lo que compromete directamente procesos esenciales para el mantenimiento de la fertilidad del suelo (Salas y Maldonado, 2020; Jurado-Guerra et al., 2021; Kumari et al., 2023).

Bajo escenarios de cambio climático, los estudios recientes afirman que las olas de calor y sequía son cada vez más frecuentes y que provocan cambios importantes en la estructura funcional de las comunidades microbianas (Zandt et al., 2023; Sun et al., 2025). Estas perturbaciones no solo afectan al suelo, si no alteran los ciclos del carbono y del nitrógeno, reduciendo la eficiencia metabólica de ciertos microorganismos y poniendo en riesgo procesos ecológicos (Gralka et al., 2020; Singh et al., 2023). La resiliencia funcional de la microbiota depende tanto de su diversidad como de las interacciones entre bacterias, hongos y arqueas, que sostienen procesos biogeoquímicos esenciales incluso en condiciones de estrés ambiental (Wang et al., 2024). La diversidad y las interacciones de los microorganismos son la base silenciosa que sostiene la fertilidad del suelo en condiciones de estrés (Figura 2). El efecto del estrés climático sobre la microbiota no es uniforme, sino que depende de la interacción entre el clima y los propios factores del suelo (Silva et al., 2025). Asimismo, los microorganismos van mucho más allá de regular los ciclos biogeoquímicos (Iqbal et al., 2025). Por ejemplo, al modificar sustancialmente las propiedades físicas e hidrológicas del suelo, establecen comunidades microbianas más funcionales que mantengan su actividad metabólica incluso en condiciones extremas, por tal motivo es primordial mantener a estos microbios implementando prácticas como la aplicación de enmiendas orgánicas, el compostaje o la biofumigación (De Corato, 2020).

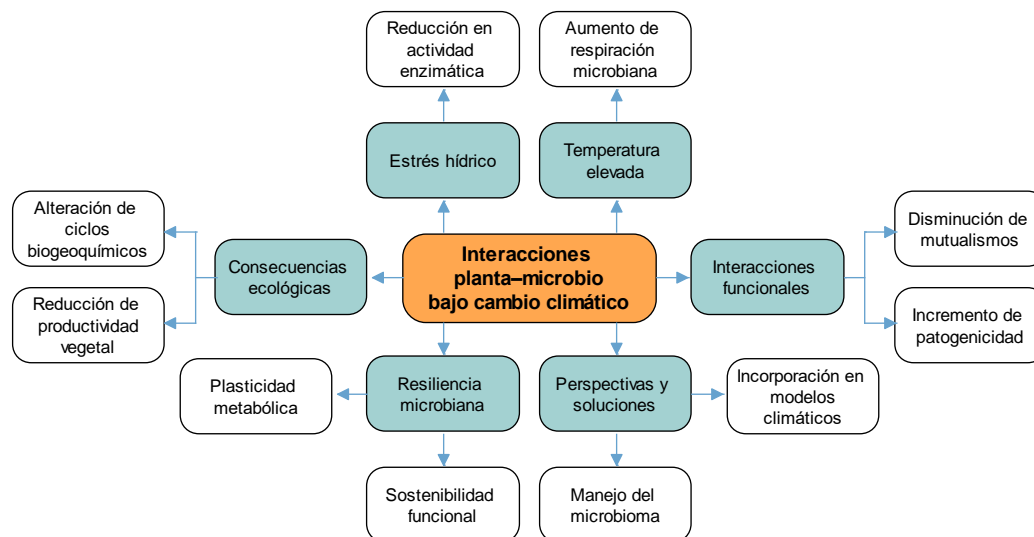


Figura 2. Interrelación entre los factores climáticos, las respuestas microbianas, las funciones ecosistémicas y la resiliencia.

Las complejidades de los microorganismos ponen de manifiesto que se necesita combinar análisis funcionales, metagenómica y modelado predictivo para entenderlos en toda su dimensión (Figura 2). En este sentido, el modelado predictivo apoyado en inteligencia artificial y datos multi-ómicos puede aplicarse en la agricultura para anticipar como responderá la microbiota frente al estrés climático (McIntire et al., 2022; Araújo et al., 2023 y Li et al., 2024). Esto permitirá diseñar estrategias de manejo mucho más inteligentes y efectivas (Tsegaye et al., 2024).

Algunos estudios sugieren que las comunidades más diversas mantienen mejor la funcionalidad, mientras que otros indican que la selección natural favorece a especies más resistentes, aunque estas podrían no ofrecer los mismos beneficios para el ecosistema (Quilca-Parillo et al., 2022; Trujillo, 2024). La intensificación agrícola tiende a reducir tanto la diversidad como la funcionalidad microbiana, limitando la capacidad del suelo para sostener procesos esenciales como la fijación de nitrógeno y la mineralización de carbono y aumentando su vulnerabilidad a fenómenos extremos (Demyanyuk et al., 2020).

El uso de genomas ensamblados por metagenómica permite identificar genes y rutas metabólicas responsables de la adaptación microbiana a sequías, inundaciones y a los cambios de temperatura, ofreciendo una visión más precisa de su funcionalidad bajo estrés (Banerjee et al., 2024). Además, para evaluar la resiliencia funcional dentro de un marco socio-ecológico más amplio es clave (Pappo et al., 2023). Estudios globales de co-ocurrencia también muestran que la resiliencia no depende solo de la riqueza de especies, sino de como se conectan e interactúan entre ellas (Pechlivanis et al., 2024).

Estrategias de manejo microbiano y prácticas regenerativas

El manejo microbiano se refiere a las técnicas implementadas para optimizar la salud y la funcionalidad de la microbiota del suelo ante los desafíos presentados por el cambio climático. Entre estas estrategias se encuentran el uso de biofertilizantes, enmiendas orgánicas y prácticas agrícolas regenerativas (Rosabal-Ayan et al., 2021; Trujillo, 2024; Ogwu y Kosoe, 2025). El uso de microorganismos benéficos, como las rizobacterias

salud del suelo (Rosabal-Ayan et al., 2021; Kumari et al., 2023; Singh et al., 2023). La aplicación de enmiendas orgánicas puede estimular el crecimiento microbiano (Barahona-Mejia et al., 2022; Kumari et al., 2023).

Estrategias como el compostaje, las rotaciones de cultivos o la biofumigación pueden transformar suelos deteriorados en ecosistemas robustos, capaces de resistir patógenos y condiciones adversas (De Corato, 2020; Banerjee et al., 2024; Wang et al., 2024; Iqbal et al., 2025; Silva et al., 2025). La implementación de sensores, algoritmos predictivos y metagenómica facilitaría la alerta temprana de los problemas que enfrentaría los suelos (McIntire et al., 2022; Araújo et al., 2023; Li et al., 2024; Pace et al., 2025). Además, conocer la biogeografía microbiana y las redes globales de microorganismos es como facilitarle al suelo un mapa y un plan de acción (Chu et al., 2020; Pechlivanis et al., 2024).

El manejo microbiano adaptativo como una estrategia prometedora es incorporar enmiendas orgánicas como biochar, compost, entre otros que muestren mejoras notables en la fertilidad del suelo, en la retención hídrica y en la resistencia de las comunidades microbianas frente a condiciones adversas (Rosabal-Ayan et al., 2021; Kumari et al., 2023; Yuan et al., 2024). Además, prácticas como biofumigación o rotación de cultivos pueden inducir suelos supresivos, capaces de frenar patógenos y amortiguar impactos negativos (De Corato, 2020). Estas intervenciones funcionan mejor en suelos saludables; en aquellos ya degradados, la restauración de la diversidad y la conectividad microbiana se vuelve difícil (Demyanyuk et al., 2020).

Avances recientes en la evaluación del suelo ante el cambio climático

La metagenómica y el modelado predictivo son muy importantes para saber como los microbios del suelo lidian con el cambio climático (Rosabal-Ayan et al., 2021; Quilca-Parillo et al., 2022). Los modelos que se basan en inteligencia artificial y datos del campo ayudan a simular como el clima afecta y pensar en ideas para adaptarse mejor (Rodríguez-Moreno et al., 2021; Huerta, 2023; Kumari et al., 2023). Para tener éxito dependerá entender bien como los microbios interactúan y como participan en los ciclos de carbono y nitrógeno (Wang et al., 2024).

El daño al suelo y la pérdida de microorganismos en campos de cultivo pueden afectar la precisión de los

modelos (Demyanyuk et al., 2020). Para que las predicciones sean útiles, hay que utilizar los datos de la zona específica (Orosco-Medina y Ramos-Castillo, 2020; Singh et al., 2023). Además, se debe incluir datos del suelo como la retención de agua y su estructura en situaciones extremas (Iqbal et al., 2025). Los factores como el pH, nutrientes y humedad influyen en los microbios, así que los modelos deben considerar estos factores para una buena precisión (Silva et al., 2025).

Herramientas nuevas como soilomics combinan la metagenómica con sensores que transmiten en tiempo real y programas de inteligencia artificial (Ogwu y Kosoe, 2025). Si a esto le sumamos la teledetección, los sensores remotos y los modelos de como se recupera un agroecosistema, podemos saber qué tan bien está el suelo (Pappo et al., 2023). Incorporar datos de redes microbianas junto con perfiles metagenómicos mejoraría significativamente la capacidad predictiva (Chu et al., 2020; Pechlivanis et al., 2024).

Las herramientas como la metagenómica y la secuenciación masiva revelan rutas metabólicas sensibles al clima, mientras que los genomas ensamblados por metagenoma muestran funciones críticas a los diminutos habitantes (Banerjee et al., 2024). Además, plataformas como soilomics combinan datos multi-ómicos, sensores en tiempo real e inteligencia artificial, abriendo la posibilidad de anticipar como reaccionarían las comunidades microbianas frente a extremos climáticos (McIntire et al., 2022; Araújo et al., 2023; Li et al., 2024; Pace et al., 2025). Sin embargo, todo esto solo tiene valor si logramos capturar la complejidad de estas interacciones y contrastarlas con la realidad del suelo (Wang et al., 2024; Orosco-Medina y Ramos-Castillo, 2020).

Pese a estos avances, aún quedan importantes limitaciones, ya que buena parte de los estudios se concentran en regiones puntuales, lo que dificulta extrapolar resultados a distintos contextos edáficos y socioeconómicos. Además, todavía falta integrar la información microbiológica con variables agronómicas y factores sociales o de gobernanza, lo que limita el salto de la teoría a la práctica (Pappo et al., 2023; Nalluri y Karri, 2024).

Persisten interrogantes fundamentales por resolver, lo que evidencia la necesidad de impulsar investigaciones transdisciplinarias que unan ecología

microbiana, biotecnología, modelado climático y participación activa de actores locales. Iniciativas como la red de investigación de agroecosistemas a largo plazo son un camino sólido para vincular la ciencia con la práctica agrícola (Tsegaye et al., 2024). Este tipo de enfoques permitiría no solo profundizar en la comprensión de las interacciones microbiota-clima, sino también diseñar estrategias adaptadas, escalables y sostenibles. De lograrse, estas sinergias podrían convertirse en un pilar para la construcción de agroecosistemas resilientes e inteligentes al clima (Demyanyuk et al., 2020; Wang et al., 2024; Iqbal et al., 2025; Silva et al., 2025).

CONCLUSIONES

La microbiota en el suelo es clave para que los campos resistan mejor los cambios del clima, estos pequeños seres vivos hacen cosas importantísimas que no vemos, pero controlan el ciclo del carbono, ayudan a que los nutrientes se aprovechen, conservan la tierra fértil y hacen que las plantas resistan mejor a las sequías, inundaciones y a las temperaturas altas. La variedad de estos microbios ayuda a proteger el suelo, como si fuera un seguro de vida que permite que siga produciendo, aunque el clima esté en condiciones extremas.

La estabilidad de estos grupos de seres vivos no solo se basa en cuántas clases de estos existen, sino que tantos de cada uno hay y como se llevan entre ellos. Por ejemplo, hay grupos pequeños que pueden ser muy fuertes si se ayudan mucho entre sí, pero hay otros que cambian rápido para sobrevivir. También importante qué tan húmedo es el lugar, qué tan ácido es el suelo y qué tanta comida existe, porque todo eso cambia como viven estos grupos pequeños, para que estén bien, hay que cuidarlos y cambiar lo que hacemos según el lugar, como si estuviéramos hablando con la tierra, los seres vivos que viven en ella y las personas que la trabajan.

Las estrategias de manejo microbiano, como inocular microorganismos benéficos o usar biochar y compost, son buenas opciones para que el suelo se recupere. Sin embargo, su éxito depende de proyectos integrales y sostenidos en el tiempo, sobre todo en suelos degradados, donde primero hay que recuperar la diversidad y la conectividad microbiana. En la actualidad, las herramientas como la metagenómica, los análisis multi-ómicos, la inteligencia artificial y las plataformas de monitoreo inteligente permiten observar funciones críticas con una precisión inédita y orientar

prácticas agrícolas más sostenibles. Sin embargo, es asegurarse de que estas herramientas se validen en campo, se adapten a las condiciones locales y que el conocimiento llegue de manera efectiva a quienes toman decisiones y trabajan la tierra.

A pesar de los avances, persisten vacíos importantes como falta de estudios en sistemas de pequeña escala en regiones semiáridos, áridos y tropicales donde existe poca integración de la información molecular con variables agronómicas y sociales y resulta difícil convertir los hallazgos en políticas públicas concretas. Por eso, es urgente avanzar hacia enfoques transdisciplinarios y colaborativos que unan ciencia, tecnología y saber local con el fin de crear sistemas agrícolas robustos, eficientes y ambientalmente sostenibles que puedan satisfacer las necesidades alimentarias y preservar los recursos naturales en tiempos impredecibles.

BIBLIOGRAFÍA

- Araújo, SO; Peres, RS; Ramalho, JC; Lidon, F; Barata, J. 2023. Machine Learning Applications in Agriculture: Current Trends, Challenges, and Future Perspectives (en línea). *Agronomy* 13(12): 2976. Disponible en <https://doi.org/10.3390/agronomy13122976>
- Arrieta, YC; Arpi, R. 2021. Efecto del cambio climático sobre el rendimiento agrícola de los principales productos en la región puno: periodo 1964-2019 (en línea). *Semestre Económico* 10(2):59-71. Disponible en <https://doi.org/10.26867/se.2021.v10i2.120>
- Banerjee, G; Papri, SR; Banerjee, P. 2024. Protocol for the construction and functional profiling of metagenome-assembled genomes for microbiome analyses (en línea). *STAR Protocols* 5(1):103167. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.xpro.2024.103167>
- Barahona-Mejía, VD; Garmendia, YY; Villalta-Pineda, KG; Aguilar-García, JA. 2022. Efectos del cambio climático en Centroamérica (en línea). *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático* 8(16):2018-2028. Disponible en <https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i16.15227>
- Boyle, JA; Murphy, BK; Ensminger, I; Stinchcombe, JR; Frederickson, ME. 2024. Resistance and resilience of soil microbiomes under climate change (en línea). *Ecosphere* (15):1-22. Disponible en <https://doi.org/10.1002/ecs2.70077>
- Chen, C; Wang, XW; Liu, YY. 2024. Stability of ecological systems: A theoretical review (en línea). *Physics Reports* (1088):1-41. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.08.001>
- Chu, H; Gao, GF; Ma, Y; Fan, K; Delgado-Baquerizo, M. 2020. Soil microbial biogeography in a changing world: recent advances and future perspectives (en línea). *mSystems* 5(2):e00803-19. Disponible en <https://doi.org/10.1128/msystems.00803-19>
- Clegg, T; Pawar, S. 2024. Variation in thermal physiology can drive the temperature-dependence of microbial community richness (en línea). *eLife* 13:e84662. Disponible en <https://doi.org/10.7554/eLife.84662>
- Debouk, H; San Emeterio, L; Marí, T; Canals, RM; Sebastià, MT. 2020. Plant functional diversity, climate and grazer type regulate soil activity in natural grasslands (en línea). *Agronomy* 10(9):1291. Disponible en <https://doi.org/10.3390/agronomy10091291>
- De Corato, U. 2020. Disease-suppressive compost enhances natural soil suppressiveness against soil-borne plant pathogens: A critical review (en línea). *Rhizosphere* (13):100192. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100192>
- Demyanyuk, O; Symochko, L; Shatsman, D. 2020. Structure and dynamics of soil microbial communities of natural and transformed ecosystems (en línea). *Journal of Environmental Research, Engineering and Management* 76(4):97-105. Disponible en <https://doi.org/10.5755/j01.irem.76.4.23508>
- Garbarino-Mendiola, PA. 2023. La educación para el cambio climático como herramienta de mitigación (en línea). *MLS Educational Research* 7(1):7-23. Disponible en <https://doi.org/10.29314/mlser.v7i1.1015>
- Gupta, A; Singh, UB; Sahu, PK; Paul, S; Kumar, A; Malviya, D; Singh, S; Kuppasamy, P; Singh, P; Paul, D; Rai, JP; Singh, HV; Manna, MC; Crusberg, TC; Kumar, A; Saxena, AK. 2022. Linking soil microbial diversity to modern agriculture practices: a review (en línea). *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19(5):3141. Disponible en <https://doi.org/10.3390/ijerph19053141>
- Gutiérrez, D. 2021. Efectos del cambio global sobre la dinámica poblacional de la fauna de montaña (en línea). *Ecosistemas* 30(1):2177. Disponible en <https://doi.org/10.7818/ecos.2177>
- Gralka, M; Szabo, R; Stocker, R; Cordero, OX. 2020. Trophic interactions and the drivers of microbial community assembly (en línea). *Current Biology* 30(19):R1176–R1188. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.08.007>
- Huerta, AR. 2023. Avances y desafíos en el proceso de institucionalización de la evaluación de la política climática en México (en línea). *Cuadernos de Gobierno y Administración Pública* 9(2):99-112. Disponible en <https://doi.org/10.5209/cgap.83576>
- Iqbal, S; Begum, F; Nguchu, BA; Claver, UP; Shaw, P. 2025. The invisible architects: microbial communities and their transformative role in soil health and global climate changes (en línea). *Environmental Microbiome* 20(36). Disponible en <https://doi.org/10.1186/s40793-025-00694-6>
- Jiao, F; Qian, L; Wu, J; Zhang, D; Zhang, J; Wang, M; Sui, X; Zhang, X. 2024. Diversity and composition of soil acidobacterial communities in different temperate forest types of Northeast China (en línea). *Microorganisms* 12(5):963. Disponible en <https://doi.org/10.3390/microorganisms12050963>
- Jurado-Guerra, P; Velázquez-Martínez, M; Sánchez-Gutiérrez, RA; Álvarez-Holguín, A; Domínguez-Martínez,

- PA; Gutiérrez-Luna, R; Garza-Cedillo, RD; Luna-Luna, M; Chávez-Ruiz, MG. 2021. Los pastizales y matorrales de zonas áridas y semiáridas de México: estatus actual, retos y perspectivas (en línea). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* (12):261-285. Disponible en <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5875>
- Kumari, E; Kumari, S; Das, SS; Mahapatra, M; Sahoo, JP. 2023. Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) for sustainable agriculture: current prospective and future challenges (en línea). *AgroEnvironmental Sustainability* 1(3):274-285. Disponible en <https://doi.org/10.59983/s2023010309>
- Khan, A; Ball, BA. 2024. Soil microbial responses to simulated climate change across polar ecosystems (en línea). *Science of the Total Environment* 909:168556. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168556>
- Lara-Rodríguez, NZ; Travieso-Bello, AC. 2022. Enfoques econométricos para estimar impactos económicos del cambio climático en la agricultura (en línea). *UVserva* (13):141-162. Disponible en <https://doi.org/10.25009/uvs.vi13.2835>
- Li, Y; Cui, X; Yang, X; Liu, G; Zhang, J. 2024. Artificial intelligence in predicting pathogenic microorganisms' antimicrobial resistance: challenges, progress, and prospects (en línea). *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology* (14):1482186. Disponible en <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1482186>
- López-Teloxa, LC; Monterroso-Rivas, AI. 2024. Soil organic carbon loss in agricultural systems of Mexico due to climate change (en línea). *Current Topics in Agronomic Science* 4(2):11-28. Disponible en <https://doi.org/10.5154/r.ctas.2024.04.04>
- Luna-Robles, EO; Cantú-Silva, I; Bejar-Pulido, SJ. 2022. Efectos del cambio climático en la gestión sostenible del recurso suelo: Effects of climate change on the sustainable management of soil resource (en línea). *Tecnociencia Chihuahua* 16(3):e1097. Disponible en <https://doi.org/10.54167/tch.v16i3.1097>
- Mukhtar, H; Wunderlich, RF; Muzaffar, A; Ansari, A; Shipin, OV; Cao, TND; Lin, YP. 2023. Soil microbiome feedback to climate change and options for mitigation (en línea). *Science of the Total Environment* (882):163412. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163412>
- McIntire, EJB; Chubaty, AM; Cumming, SG; Andison, D; Barros, C; Boisvenue, C; Haché, S; Luo, Y; Micheletti, T; Stewart, FEC. 2022. Perfict: A Re-imagined foundation for predictive ecology (en línea). *Ecology letters* 25(6):1345-1351. Disponible en <https://doi.org/10.1111/ele.13994>
- Nalluri, N; Karri, VR. 2024. Enhancing resilience to climate change through prospective strategies for climate-resilient agriculture to improve crop yield and food security (en línea). *Plant Science Today* 11(1):06-20. Disponible en <https://doi.org/10.14719/pst.2159>
- Ni, H; Jing, X; Xiao, X; Zhang, N; Wang, X; Sui, Y; Sun, B; Liang, Y. 2021. Microbial metabolism and necromass mediated fertilization effect on soil organic carbon after long-term community incubation in different climates (en línea). *ISME Journal* 15(9):2561-2573. Disponible en <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00950-w>
- Ogwu, MC; Kosoe, EA. 2025. Integrating green infrastructure into sustainable agriculture to enhance soil health, biodiversity, and microclimate resilience (en línea). *Sustainability* 17(9):3838. Disponible en <https://doi.org/10.3390/su17093838>
- Orosco-Medina, IO; Ramos-Castillo, LA. 2020. Modelado de la producción de sedimentos en una cuenca con poca información incluyendo los potenciales efectos del cambio climático y el cambio de uso de suelo (en línea). *Acta Universitaria* (30):1-19. Disponible en <https://doi.org/10.15174/au.2020.2901>
- Pace, R; Schiano Di Cola, V; Monti, MM; Affinito, A; Cuomo, S; Loreto, F; Ruocco, M. 2025. Artificial intelligence in soil microbiome analysis: a potential application in predicting and enhancing soil health-a review (en línea). *Discover Applied Sciences* 7(85). Disponible en <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06381-4>
- Pappo, E; Wilson, CH; Pitts, JJ; Hammond, WM; Flory, SL. 2023. Toward a new perspective on evaluating climate change resilience of agroecosystems (en línea). *Ecosphere* 14(9):e4594. Disponible en <https://doi.org/10.1002/ecs2.4594>
- Pechlivanis, N; Karakatsoulis, G; Kyritsis, K; Tsagiopoulou, M; Sgardelis, S; Kappas, I; Psomopoulos, F. 2024. Microbial co-occurrence network demonstrates spatial and climatic trends for global soil diversity (en línea). *Scientific Data* 11(672). Disponible en <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03528-1>
- Pérez-Sosa, E; Granados-Ramírez, GR. 2020. Posibles efectos del cambio climático en la región productora de cacao en Tabasco, México. Tlalli (en línea). *Revista de Investigación en Geografía*, (3):39-67. Disponible en <https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2020.3.1069>
- Quilca-Parillo, FL; Cruz-Escobar, M; Inquilla-Mamani, J; López-Paz, PM. 2022. El cambio climático afecta a la producción de la cebada grano en la región Puno-Perú (en línea). *Idesia (Arica)* 40(4):53-62. Disponible en <https://doi.org/10.4067/s0718-34292022000400053>
- Rivera-Urbalejo, AP; Vázquez, D; Fernández-Vázquez, JL; Rosete-Enríquez, M; Cesa-Luna, C; Morales-García, YE; Muñoz-Rojas, J; Quintero-Hernández, V. 2021. Aportes y dificultades de la metagenómica de suelos y su impacto en la agricultura (en línea). *Acta Biológica Colombiana* 26(3):449-461. Disponible en <https://doi.org/10.15446/abc.v26n3.85760>
- Rosabal-Ayan, L; Macías-Coutiño, P; Maza-González, M; López-Vázquez, R; Guevara-Hernández, F. 2021. Microorganismos del suelo y sus usos potenciales en la agricultura frente al escenario del cambio climático (en línea). *Magna Scientia UCEVA* 1(1):103-16. Disponible en <https://doi.org/10.54502/msuceva.v1n1a14>
- Rosales-Martínez, V; Rubio, A; Casanova-Pérez, L; Fraire-Cordero, S; Flota-Bañuelos, C; Galicia, F. 2020. Percepción de citricultores ante el efecto del cambio climático en campeche (en línea). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11(4):727-740. Disponible en

- <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.1898>
- Rodríguez-Moreno, VM; Medina-García, G; Díaz-Padilla, G; Ruiz-Corral, JA; Estrada-Avalos, J; Mauricio-Ruvalcaba, JE. 2021. ¿Por qué México es un país altamente vulnerable al cambio climático? (en línea). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12(25):45-57. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i25.2819>
- Salas, EM; Maldonado, ES. 2020. Breve historia de la ciencia del cambio climático y la respuesta política global: un análisis contextual (en línea). VI Congreso Internacional De La Ciencia, Tecnología, Emprendimiento e Innovación 2019. *Kne Engineering*:717-738. Disponible en <https://doi.org/10.18502/keg.v5i2.6294>
- Santillán-Fernández, A; Cabrera, I; Ruiz, L; Carrillo-Ávila, E; Alatorre-Cobos, F; Bautista-Ortega, J. 2021. Resiliencia de la cobertura vegetal en el suroeste de México ante los efectos del cambio climático (en línea). *Revista Peruana de Biología* 28(2):e18187. Disponible en <https://doi.org/10.15381/rpb.v28i2.18187>
- Sanders, D; Frago, E. 2024. Ecosystem engineers shape ecological network structure and stability: A framework and literature review (en línea). *Functional Ecology* 38(8):1683-1696. Disponible en <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14608>
- Siddique, MBA; Khalid, A; Ditta, A; Mahmood, S; Alataway, A; Dewidar, AZ; Mattar, MA. 2023. Climate change variables modify microbial community structure and soil enzymes involved in nitrogen and phosphorus metabolism (en línea). *Rhizosphere* 28:100793. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100793>
- Silva, V; Brito, I; Alexandre, A. 2025. The vineyard microbiome: How climate and the main edaphic factors shape microbial communities (en línea). *Microorganisms* 13(5):1092. Disponible en <https://doi.org/10.3390/microorganisms13051092>
- Singh, BK; Delgado-Baquerizo, M; Egidi, E; Guirado, E; Leach, JE; Liu, H; Trivedi, P. 2023. Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward (en línea). *Nature Reviews Microbiology* 21(10):640-656. Disponible en <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>
- Sun, Y; Chen, HYH; Chen, X; Hisano, M; Chen, X; Reich, PB. 2025. Rising global temperatures reduce soil microbial diversity over the long term (en línea). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 122(35):e2426200122. Disponible en <https://doi.org/10.1073/pnas.2426200122>
- Smith, TP; Mombrikotb, S; Ransome, E; Kontopoulou, DG; Pawar, S; Bell, T. 2022. Latent functional diversity may accelerate microbial community responses to temperature fluctuations (en línea). *eLife* 11:e80867. Disponible en <https://doi.org/10.7554/eLife.80867>
- ‘t Zandt, D; Kolaříková, Z; Cajthaml, T; Münzbergová, Z. 2023. Plant community stability is associated with a decoupling of prokaryote and fungal soil networks (en línea). *Nature Communications* 14(1):3736. Disponible en <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39464-8>
- Trujillo, A. 2024. La responsabilidad histórica en la justicia climática y las inequidades de género en el cambio climático (en línea). *El Outsider: Revista de Relaciones Internacionales y Ciencias Políticas* (9):141-160. Disponible en <https://doi.org/10.18272/eo.v9i.3238>
- Tsegaye, T; Eve, M; Hapeman, CJ; Kleinman, PJA; Baffaut, C; Browning, DM; Coffin, AW; Spiegel, SA. 2024. The Long-Term Agroecosystem Research (LTAR) network: Cross-site transdisciplinary science to support a sustainable and resilient agricultura (en línea). *Journal of Environmental Quality* 53(6):777-786. Disponible en <https://doi.org/10.1002/jeq2.20649>
- Vázquez, C; Verdenelli, RA; Merlo, C; Pérez Brandán, CG; Kowaljaw, E; Meriles, JM. 2022. Influence of land-use changes on microbial community structure and diversity in a semiarid region (en línea). *Land Degradation & Development* 33(18):3690-3702. Disponible en <https://doi.org/10.1002/ldr.4416>
- Villavicencio-Gutiérrez, MR; Callejas-Juárez, N; Rogers-Montoya, NA; González-Hernández, V; González-López, R; Martínez-García, CG; Martínez-Castañeda, FE; 2023. Prospectiva ambiental al 2030 en sistemas de producción de leche de vaca en México (en línea). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 14(4):760-781. Disponible en <https://doi.org/10.22319/rmcp.v14i4.6410>
- Wang, X; Chi, Y; Song, S. 2024. Important soil microbiota's effects on plants and soils: A comprehensive 30-year systematic literature review (en línea). *Frontiers in Microbiology* (15):1347745. Disponible en <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1347745>
- Wu, D; Wang, W; Yao, Y; Li, H; Wang, Q; Niu, B. 2023. Microbial interactions within beneficial consortia promote soil health (en línea). *Science of the Total Environment* 900:165801. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165801>
- Xu, C; Zhang, H; Li, J; Liu, Y; Su, C. 2024. Microbial diversity drives soil multifunctionality along a reclamation chronosequence in an opencast coal mine (en línea). *Land Degradation & Development* 35(6):1985-1999. Disponible en <https://doi.org/10.1002/ldr.5031>
- Yuan, Y; Li, X; Liu, F; Tian, X; Shao, Y; Yuan, Z; Chen, Y. 2024. Differences in soil microbial communities across soil types in China's temperate forests (en línea). *Forests* 15(7):1110. Disponible en <https://doi.org/10.3390/f15071110>
- Zhang, J; Guo, X; Shan, Y; Lu, X; Cao, J. 2024. Effects of land-use patterns on soil microbial diversity and composition in the Loess Plateau, China (en línea). *Journal of Arid Land* 16(3):415-430. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s40333-024-0007-1>
- Zhelezova, A; Sorrentino, G; Otim, GI; Rocchi, I. 2025. Soil is alive – how does soil biota influence soil mechanical properties? A perspective review (en línea). *Biogeotechnics*, In Press, 100175. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.bgttech.2025.100175>
- Zhou, H; Li, X; Chen, Y; Wang, F. 2022. Effects of multiple global change factors on soil microbial richness, diversity and functional gene abundances: A meta-analysis (en línea). *Global Change Biology* 28(11):3853-3865. Disponible en <https://doi.org/10.1111/gcb.16230>

Artículo recibido en: 14 de octubre del 2025

Aceptado en: 10 de diciembre del 2025