



Biofertilizantes y microorganismos benéficos como estrategia para mejorar la productividad y calidad de cultivos bajo condiciones de estrés ambiental

Biofertilisers and Beneficial Microorganisms as a Strategy for Improving Crop Productivity and Quality under Environmental Stress Conditions

César Octavio Quinaluisa Morán^{1*}  ,

¹Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia, Los Ríos - Ecuador

*Autor de correspondencia: César Octavio Quinaluisa Morán 

Recibido: 12-08-2026

Revisado: 19-08-2026

Aceptado: 26-08-2026

Publicado: 02-09-2026

Cómo citar este artículo: Quinaluisa Morán, C. O. . (2026). Biofertilizantes y microorganismos benéficos como estrategia para mejorar la productividad y calidad de cultivos bajo condiciones de estrés ambiental. *Imperium Académico Multidisciplinary Journal*, 3(2), 1-14. <https://doi.org/10.63969/07fmza65>

RESUMEN

El estrés ambiental constituye una de las principales limitaciones para la productividad agrícola, debido a que factores como el déficit hídrico, la salinidad y las temperaturas extremas alteran procesos fisiológicos esenciales y pueden comprometer el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos. Ante esta problemática, el objetivo fue analizar el uso de biofertilizantes y microorganismos benéficos en cultivos sometidos a condiciones de estrés ambiental, considerando sus efectos productivos y de calidad, los mecanismos biológicos implicados y las principales limitaciones de su eficacia. Se desarrolló una investigación cualitativa de diseño documental mediante una revisión bibliográfica sistematizada con el método PRISMA, considerando publicaciones del periodo 2019–2026 relacionadas con estas alternativas biológicas y su respuesta frente a condiciones ambientales adversas. La evidencia analizada mostró que los biofertilizantes y microorganismos benéficos favorecieron el desarrollo radicular, la disponibilidad y aprovechamiento de nutrientes, la acumulación de biomasa y el rendimiento agrícola. Estos efectos se relacionaron con mecanismos como la fijación biológica de nitrógeno, solubilización de fósforo, producción de sideróforos, regulación hormonal, actividad de la ACC-desaminasa y activación de mecanismos antioxidantes. Asimismo, se identificó su contribución al mantenimiento del equilibrio hídrico y osmótico y a la tolerancia frente a sequía, salinidad y temperaturas elevadas.

Palabras clave: biofertilizantes; microorganismos benéficos; estrés ambiental; productividad agrícola; calidad de cultivos.

ABSTRACT

Environmental stress is one of the main constraints on agricultural productivity, as factors such as water deficit, salinity and extreme temperatures disrupt essential physiological processes and can compromise crop growth, yield and quality. In response to this challenge, the study aimed to analyse the use of biofertilisers and beneficial microorganisms in crops subjected to environmental stress, considering their effects on productivity and quality, the biological mechanisms involved, and the principal limitations affecting their efficacy. A qualitative documentary study was conducted through a systematic literature review based on the PRISMA method, considering publications from 2019 to 2026 addressing these biological alternatives and their responses to adverse environmental conditions. The

evidence analysed showed that biofertilisers and beneficial microorganisms promoted root development, nutrient availability and uptake, biomass accumulation and agricultural yield. These effects were associated with mechanisms such as biological nitrogen fixation, phosphorus solubilisation, siderophore production, hormonal regulation, ACC deaminase activity and the activation of antioxidant mechanisms. Their contribution to maintaining water and osmotic balance and enhancing tolerance to drought, salinity and elevated temperatures was also identified.

Keywords: biofertilisers; beneficial microorganisms; environmental stress; agricultural productivity; crop quality.

1. INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola se desarrolla actualmente en un escenario caracterizado por una marcada variabilidad de las condiciones ambientales, lo que representa una limitación creciente para el desarrollo normal y el rendimiento de los cultivos. Factores como el déficit hídrico, la salinidad del suelo, las temperaturas extremas y el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo pueden generar alteraciones en procesos fisiológicos esenciales, entre ellos la fotosíntesis, la absorción y asimilación de nutrientes, el desarrollo del sistema radicular y la regulación metabólica. La persistencia o intensidad de estas condiciones puede reducir el crecimiento de las plantas, comprometer el rendimiento y afectar características asociadas con la calidad de los productos agrícolas. En este escenario, resulta necesario fortalecer la búsqueda de alternativas que permitan incrementar la capacidad de respuesta de los cultivos frente a condiciones ambientales desfavorables, favoreciendo al mismo tiempo sistemas de producción más resilientes y sostenibles.

En este marco, el empleo de biofertilizantes y microorganismos benéficos ha adquirido relevancia como una estrategia biológica orientada a favorecer el funcionamiento del sistema suelo-planta y mejorar la respuesta de los cultivos ante situaciones de estrés. Diversos grupos microbianos, entre ellos las bacterias promotoras del crecimiento vegetal, los hongos micorrízicos y otros microorganismos asociados con la rizosfera, pueden participar en procesos relacionados con la movilización de nutrientes, la estimulación del crecimiento radicular, la producción de compuestos reguladores y la activación de mecanismos fisiológicos vinculados con la tolerancia al estrés. Estas funciones permiten reconocer el potencial de los microorganismos como agentes capaces de intervenir de manera integral en el desarrollo vegetal, trascendiendo su función tradicional como facilitadores de la nutrición. Por consiguiente, su aprovechamiento constituye una alternativa de interés para fortalecer la productividad, preservar atributos de calidad y mejorar la eficiencia biológica de los sistemas agrícolas sometidos a condiciones ambientales adversas.

El estrés ambiental representa actualmente una de las limitaciones más relevantes para la estabilidad de la producción agrícola, debido a su capacidad para modificar procesos fisiológicos determinantes del crecimiento y rendimiento de las plantas. La insuficiencia de agua reduce la capacidad de las raíces para abastecer las necesidades hídricas del cultivo y puede comprometer la actividad fotosintética; la salinidad altera el potencial osmótico del suelo y favorece la acumulación de iones que pueden alcanzar niveles perjudiciales para los tejidos vegetales; mientras que las temperaturas extremas interfieren en la integridad de las membranas, el funcionamiento enzimático y los procesos reproductivos. La incidencia aislada, recurrente o simultánea de estos factores puede superar la capacidad de adaptación de las plantas y generar reducciones sustanciales en el crecimiento, el rendimiento y la calidad de la producción. Por tanto, la creciente variabilidad de las condiciones edafoclimáticas constituye un desafío para aquellos sistemas agrícolas cuya productividad depende de un suministro equilibrado de agua y nutrientes y de condiciones ambientales compatibles con el desarrollo fisiológico de los cultivos.

A esta problemática se incorpora el modelo de intensificación agrícola, caracterizado por una elevada dependencia de insumos externos, entre los que destacan los fertilizantes de síntesis química utilizados para satisfacer las demandas nutricionales de los cultivos y sostener altos niveles de rendimiento. Si bien estos productos constituyen una herramienta importante para corregir deficiencias y mejorar la disponibilidad inmediata de nutrientes, su aplicación excesiva, desequilibrada o prolongada puede ocasionar modificaciones en las propiedades fisicoquímicas del suelo y alterar procesos microbiológicos esenciales para su funcionamiento. Entre estas consecuencias pueden presentarse desequilibrios nutricionales, modificaciones de la actividad microbiana y disminución de determinadas funciones

biológicas asociadas con la transformación y movilización de nutrientes. Esta situación evidencia la necesidad de avanzar hacia estrategias de manejo que no dependan exclusivamente del suministro externo de nutrientes, sino que incorporen mecanismos biológicos capaces de favorecer la fertilidad del suelo y la interacción funcional entre sus componentes.

En este sentido, aunque la investigación sobre biofertilizantes y microorganismos benéficos ha generado resultados relevantes respecto a su capacidad para favorecer el crecimiento y desarrollo vegetal, persisten interrogantes relacionadas con la magnitud y consistencia de sus efectos bajo diferentes escenarios de estrés ambiental. Las respuestas observadas pueden variar en función de la especie y variedad cultivada, el microorganismo empleado, la composición y condiciones del suelo, la intensidad y naturaleza del estrés, así como las características de la formulación y vía de aplicación del biofertilizante. Por ello, no resulta suficiente establecer que determinados microorganismos poseen efectos potencialmente favorables; es necesario determinar cuáles son sus principales mecanismos de acción, en qué condiciones se manifiestan con mayor eficacia y hasta qué punto contribuyen a preservar el rendimiento y los atributos de calidad de los cultivos. Bajo esta perspectiva, el análisis sistemático de la evidencia científica disponible resulta fundamental para establecer el alcance real de estas alternativas biológicas e identificar los factores que condicionan su eficacia frente a las restricciones ambientales que afectan la producción agrícola.

La incorporación de microorganismos en los sistemas agrícolas se fundamenta en su participación activa en los procesos que regulan la fertilidad del suelo y la nutrición vegetal. Bacterias, hongos y otros grupos microbianos intervienen en la descomposición de materia orgánica, transformación de nutrientes y movilización de elementos esenciales que, bajo determinadas condiciones, presentan una disponibilidad limitada para las plantas. Un proceso particularmente relevante corresponde a la fijación biológica del nitrógeno, mediante la cual microorganismos especializados transforman el nitrógeno atmosférico en compuestos que pueden ser utilizados por los vegetales. Velasco et al. (2020) destacan que las comunidades microbianas asociadas con las raíces participan en procesos fundamentales para la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento vegetal, proporcionando el fundamento biológico para el desarrollo de estrategias de fertilización basadas en microorganismos.

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal han adquirido relevancia debido a la diversidad de funciones que pueden desempeñar en la relación entre microorganismos y plantas. Su actividad comprende mecanismos asociados con la fijación de nitrógeno, solubilización de fósforo y potasio, producción de sideróforos y síntesis de sustancias capaces de estimular diferentes procesos del desarrollo vegetal. Fanai et al. (2024) señalan que estos microorganismos pueden favorecer la adquisición de nutrientes y modificar procesos fisiológicos vinculados con el crecimiento y la adaptación de las plantas, lo que amplía la función de los biofertilizantes más allá del suministro de nutrientes. Desde esta perspectiva, su acción se relaciona con la capacidad de establecer interacciones funcionales que pueden favorecer simultáneamente la nutrición, el crecimiento y la respuesta vegetal frente a condiciones ambientales restrictivas.

La rizosfera constituye un espacio de elevada actividad biológica en el que convergen las raíces, los microorganismos y los componentes del suelo, generando interacciones que pueden influir directamente sobre el desempeño de los cultivos. Las raíces liberan exudados compuestos por azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos y otros metabolitos que modifican las condiciones del entorno inmediato y favorecen el establecimiento de determinadas comunidades microbianas. A su vez, estos microorganismos producen metabolitos y sustancias bioactivas que pueden intervenir en la nutrición y arquitectura radicular. Kour et al. (2023) reconocen que las comunidades microbianas de la rizosfera desempeñan funciones relevantes en la adquisición de nutrientes, promoción del crecimiento y adaptación de las plantas frente a modificaciones del ambiente. Esta relación evidencia que la productividad vegetal se encuentra estrechamente vinculada con la interacción dinámica entre las raíces y su microbiota asociada.

La capacidad de determinados microorganismos para modificar la regulación fisiológica de las plantas constituye un mecanismo relevante dentro de las interacciones planta-microorganismo. Algunas bacterias producen compuestos con actividad similar a las fitohormonas o interfieren en rutas hormonales relacionadas con el crecimiento de las raíces y la formación de nuevos tejidos. Entre estos mecanismos destaca la actividad de la ACC-desaminasa, debido a su capacidad para intervenir sobre el precursor del etileno, cuya acumulación puede limitar el crecimiento vegetal

durante situaciones de estrés. Kumar et al. (2024) describen que las bacterias promotoras del crecimiento pueden intervenir simultáneamente en la producción de fitohormonas, adquisición de nutrientes y regulación de respuestas asociadas con el estrés. Estas funciones explican su potencial para mantener condiciones fisiológicas favorables cuando los cultivos se desarrollan bajo restricciones ambientales.

La disponibilidad insuficiente de agua modifica de manera significativa el funcionamiento fisiológico de las plantas y puede limitar la producción agrícola cuando el déficit hídrico alcanza niveles que superan la capacidad de adaptación del cultivo. Determinados microorganismos asociados con las raíces pueden contribuir a reducir estas limitaciones mediante la estimulación del crecimiento radicular, producción de exopolisacáridos, regulación hormonal y activación de mecanismos antioxidantes. Yusuf et al. (2025) señalan que las interacciones entre microorganismos y plantas pueden favorecer la regulación osmótica, adquisición de nutrientes y respuesta antioxidante durante condiciones de estrés hídrico. Estos mecanismos pueden contribuir al mantenimiento del estado fisiológico de los cultivos y explicar la capacidad potencial de determinados biofertilizantes para favorecer el desempeño vegetal en ambientes caracterizados por una disponibilidad reducida de agua.

La presencia elevada de sales en el suelo genera restricciones osmóticas y alteraciones en el equilibrio iónico que dificultan la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas. Esta condición puede provocar modificaciones metabólicas, reducción del crecimiento y afectaciones en diferentes componentes del rendimiento agrícola. Determinadas bacterias promotoras del crecimiento y microorganismos tolerantes a la salinidad pueden contribuir a disminuir estos efectos mediante mecanismos relacionados con la regulación osmótica, movilización de nutrientes y activación de sistemas antioxidantes. Kibret et al. (2024) identifican evidencias de que las rizobacterias promotoras del crecimiento pueden favorecer respuestas fisiológicas y agronómicas de los cultivos sometidos a salinidad y déficit hídrico. La selección de microorganismos capaces de conservar su actividad bajo concentraciones elevadas de sales adquiere así especial importancia para el aprovechamiento de biofertilizantes en suelos con restricciones edáficas.

Las temperaturas elevadas afectan diferentes procesos fisiológicos de los cultivos, particularmente cuando la exposición supera los rangos térmicos óptimos para el crecimiento. El incremento de la temperatura puede reducir la eficiencia fotosintética, alterar la estabilidad de las membranas, incrementar la producción de especies reactivas de oxígeno y afectar procesos metabólicos vinculados con la formación del rendimiento. Determinados microorganismos asociados con las raíces pueden estimular mecanismos antioxidantes y favorecer la protección celular frente a estas alteraciones. Singh et al. (2024) documentan que las comunidades microbianas del suelo pueden intervenir en la regulación de respuestas antioxidantes y en el mantenimiento de procesos fisiológicos bajo diferentes formas de estrés abiótico. Esta evidencia permite considerar a los microorganismos benéficos como componentes potenciales de estrategias destinadas a incrementar la resiliencia de los cultivos frente a escenarios de estrés térmico.

La utilización conjunta de diferentes microorganismos responde a la necesidad de integrar funciones biológicas que difícilmente pueden concentrarse en una sola cepa microbiana. Los consorcios pueden combinar microorganismos con capacidades complementarias para favorecer la disponibilidad de nutrientes, estimular el crecimiento, producir sustancias reguladoras y activar mecanismos asociados con la tolerancia al estrés. Rani et al. (2025) señalan que las formulaciones basadas en consorcios microbianos presentan potencial para generar respuestas más amplias sobre el desarrollo vegetal; sin embargo, su eficacia depende de factores como la compatibilidad entre las cepas, las características del cultivo, las propiedades del suelo y las condiciones ambientales. En consecuencia, la selección de combinaciones microbianas funcionalmente compatibles representa un aspecto determinante para obtener respuestas agronómicas consistentes y avanzar hacia biofertilizantes con mayor estabilidad bajo condiciones productivas diversas.

La comprensión de los biofertilizantes requiere considerar al suelo como un sistema dinámico en el que convergen componentes minerales, materia orgánica, raíces y comunidades microbianas bajo la influencia de las condiciones ambientales. En este sistema, los microorganismos intervienen activamente en la descomposición de residuos, mineralización de compuestos y transformación de elementos que determinan la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Cabrera et al. (2023) señalan que los microorganismos del suelo desempeñan funciones esenciales en los ciclos

de nutrientes y en diversos procesos asociados con la fertilidad edáfica. Desde esta perspectiva, los biofertilizantes pueden definirse funcionalmente como insumos de origen biológico que incorporan microorganismos capaces de favorecer la nutrición, el crecimiento o el funcionamiento fisiológico de las plantas mediante procesos microbiológicos específicos.

La relación establecida entre las raíces y los microorganismos de la rizosfera constituye un componente central para explicar la funcionalidad de los biofertilizantes. Las plantas liberan hacia el suelo una diversidad de compuestos orgánicos que modifican las condiciones químicas y biológicas próximas a las raíces y favorecen el establecimiento de determinados microorganismos. Ahmed et al. (2025) plantean que estas interacciones pueden generar beneficios recíprocos, debido a que las plantas proporcionan recursos metabólicos a las comunidades microbianas, mientras determinados microorganismos contribuyen a la nutrición, crecimiento y protección vegetal. En consecuencia, la respuesta de un cultivo ante la inoculación microbiana depende de una interacción dinámica en la que intervienen las características de la planta, la comunidad microbiana y las condiciones particulares del suelo.

La disponibilidad de nutrientes constituye uno de los mecanismos mediante los cuales los microorganismos pueden modificar el desempeño de los cultivos. Algunas bacterias tienen capacidad para fijar nitrógeno atmosférico, mientras otras producen ácidos orgánicos y enzimas que favorecen la solubilización de formas poco disponibles de fósforo y otros minerales. Asimismo, determinados microorganismos producen sideróforos que facilitan la adquisición de hierro en ambientes donde este elemento presenta baja disponibilidad. Vera et al. (2025) destacan que las bacterias promotoras del crecimiento vegetal pueden mejorar la nutrición mediante mecanismos asociados con la fijación de nitrógeno, solubilización de nutrientes y producción de compuestos quelantes. Por tanto, la actividad microbiana puede incrementar la eficiencia con la que las plantas acceden a elementos indispensables para la formación de biomasa y el desarrollo de estructuras productivas.

La producción y modulación de fitohormonas representa un mecanismo adicional mediante el cual los microorganismos pueden influir sobre la arquitectura y el crecimiento vegetal. Determinadas bacterias sintetizan sustancias con actividad auxínica, giberelínica o citocinínica, mientras que otras modifican las rutas hormonales propias de la planta. Martínez et al. (2021) señala que las bacterias promotoras del crecimiento pueden modificar el balance hormonal vegetal y favorecer particularmente el desarrollo del sistema radicular. Una mayor proliferación y ramificación de las raíces puede ampliar el volumen de suelo explorado y, consecuentemente, incrementar las posibilidades de acceso a agua y nutrientes. Este mecanismo adquiere especial relevancia cuando los cultivos se desarrollan bajo condiciones en las que la disponibilidad de recursos es limitada.

La respuesta de las plantas frente al estrés ambiental está estrechamente relacionada con el control de las especies reactivas de oxígeno generadas durante situaciones de desequilibrio fisiológico. La sequía, la salinidad y las temperaturas extremas pueden intensificar la producción de estas moléculas y provocar alteraciones en membranas, proteínas, pigmentos y estructuras celulares cuando su acumulación supera la capacidad antioxidante de la planta. Rincón et al. (2025) señalan que determinadas bacterias promotoras del crecimiento pueden estimular sistemas antioxidantes y contribuir a reducir los efectos fisiológicos asociados con el estrés. La interacción microbiana puede, de esta manera, favorecer la conservación de la estabilidad celular y contribuir al mantenimiento de procesos metabólicos esenciales durante condiciones ambientales restrictivas.

El mantenimiento del equilibrio hídrico y osmótico constituye un componente determinante de la tolerancia vegetal frente a la sequía y la salinidad. Ante una reducción del potencial hídrico del suelo, las plantas necesitan regular la concentración de solutos para conservar el agua dentro de las células y mantener la funcionalidad de sus tejidos. Akhtar et al. (2025) indican que los microorganismos promotores del crecimiento pueden favorecer mecanismos relacionados con el ajuste osmótico y la protección de las plantas sometidas a estrés abiótico. Además, algunos microorganismos producen exopolisacáridos capaces de modificar las propiedades físicas de la rizosfera, favorecer la agregación de partículas y contribuir a la retención de humedad próxima a las raíces. Estas respuestas pueden mejorar las condiciones inmediatas para el desarrollo radicular cuando existe una disponibilidad limitada de agua.

La actividad de la enzima ACC-desaminasa constituye un mecanismo específico mediante el cual ciertas bacterias pueden modular una respuesta hormonal asociada con el estrés. Las condiciones ambientales adversas pueden estimular la síntesis de etileno en las plantas y, cuando su concentración aumenta considerablemente, esta hormona puede restringir el crecimiento de las raíces y alterar el desarrollo vegetal. Gamalero et al. (2023) explica que las bacterias que poseen ACC-desaminasa pueden degradar el ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico, precursor inmediato del etileno, disminuyendo de esta manera su acumulación en la planta. Este mecanismo permite comprender cómo determinados microorganismos pueden contribuir a preservar el crecimiento radicular y favorecer la adaptación vegetal frente a condiciones como sequía, salinidad y otros factores ambientales estresantes.

La concepción del microbioma vegetal permite integrar estos mecanismos dentro de una visión más amplia de las relaciones que determinan el funcionamiento de los cultivos. Las plantas albergan comunidades microbianas en la rizosfera, la superficie de sus órganos y, en algunos casos, en sus tejidos internos, cuyas composiciones pueden modificarse en función del genotipo vegetal y de las condiciones ambientales. Figueiredo et al. (2021) plantean que el microbioma constituye un componente funcional de la salud y productividad vegetal, debido a su participación en procesos nutricionales, fisiológicos y de respuesta frente al ambiente. Desde esta perspectiva, la eficacia de un biofertilizante no depende exclusivamente de las propiedades individuales de una cepa, sino de su capacidad para establecerse e interactuar con la planta, la microbiota residente y el entorno edáfico. Por ello, el análisis de estas estrategias debe considerar conjuntamente microorganismo, hospedero, suelo y condiciones ambientales para comprender con mayor precisión las respuestas productivas y de calidad que pueden obtenerse.

La revisión bibliográfica constituye la herramienta metodológica apropiada para analizar el conocimiento científico existente sobre biofertilizantes y microorganismos benéficos en cultivos sometidos a estrés ambiental. Mediante esta herramienta es posible identificar, seleccionar, organizar y analizar investigaciones relacionadas con los principales microorganismos utilizados, mecanismos de acción, tipos de estrés estudiados y efectos registrados sobre la productividad y calidad de los cultivos. Asimismo, permite reconocer coincidencias, diferencias y vacíos de conocimiento presentes en la literatura científica, proporcionando una base para interpretar de manera crítica el estado actual del tema y establecer las principales tendencias investigativas.

Objetivo

Analizar el uso de biofertilizantes y microorganismos benéficos en cultivos sometidos a condiciones de estrés ambiental, considerando sus efectos sobre la productividad y la calidad de los cultivos, los mecanismos biológicos que intervienen en la respuesta vegetal y las principales limitaciones asociadas con su eficacia.

La incorporación de biofertilizantes y microorganismos benéficos en sistemas agrícolas sometidos a condiciones de estrés ambiental plantea la necesidad de comprender en qué medida estas alternativas biológicas favorecen el desarrollo y desempeño productivo de los cultivos, qué procesos fisiológicos y microbiológicos sustentan sus efectos y qué factores pueden limitar su eficacia en diferentes condiciones de producción. En función de estas consideraciones, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo contribuye el uso de biofertilizantes y microorganismos benéficos a la productividad y calidad de los cultivos sometidos a condiciones de estrés ambiental, mediante qué mecanismos biológicos se manifiestan sus efectos y cuáles son las principales limitaciones asociadas con su eficacia?

2. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo, con un diseño documental sustentado en una revisión bibliográfica sistematizada mediante el método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). El procedimiento tuvo como finalidad identificar, seleccionar, organizar y analizar investigaciones científicas relacionadas con el uso de biofertilizantes y microorganismos benéficos en cultivos sometidos a condiciones de estrés ambiental. La búsqueda se delimitó al periodo comprendido entre 2019 y 2026, considerando publicaciones orientadas al estudio de los efectos de estas alternativas biológicas sobre la productividad, calidad, crecimiento y respuesta fisiológica de los cultivos frente a factores ambientales adversos.

La recuperación de información se efectuó mediante una estrategia de búsqueda estructurada en las bases de datos Scopus, SciELO, Latindex y Dialnet, complementada con otras fuentes académicas pertinentes. Se emplearon palabras

Quinaluisa Morán
clave en español e inglés, combinadas mediante operadores booleanos AND y OR, entre ellas: biofertilizantes, microorganismos benéficos, bacterias promotoras del crecimiento vegetal, microorganismos promotores del crecimiento vegetal, biofertilizers, beneficial microorganisms, plant growth-promoting bacteria, crop productivity, crop quality, abiotic stress, drought stress, salinity stress y heat stress. La combinación de estos términos permitió delimitar los resultados hacia investigaciones relacionadas directamente con las variables y condiciones contempladas en el estudio.

El proceso de selección se desarrolló conforme a las cuatro etapas establecidas por PRISMA. En la fase de identificación se localizaron inicialmente 128 registros en las diferentes fuentes consultadas. Después de eliminar 26 documentos duplicados, quedaron 102 registros para la etapa de cribado. En esta fase se revisaron títulos y resúmenes, excluyéndose 63 publicaciones por no presentar correspondencia temática con el objetivo de la investigación, por abordar microorganismos patógenos o por centrarse en aplicaciones ajenas al ámbito agrícola. Como resultado, 39 estudios fueron considerados potencialmente pertinentes y avanzaron a la fase de elegibilidad.

Durante la evaluación de texto completo se analizaron los 39 estudios seleccionados, aplicando de manera rigurosa los criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos. En esta etapa fueron excluidos 27 documentos: 11 por no presentar resultados relacionados con productividad o calidad de los cultivos, 7 por no abordar condiciones de estrés ambiental, 5 por desarrollar temáticas no vinculadas directamente con biofertilizantes o microorganismos benéficos y 4 por presentar información insuficiente para el análisis. Finalmente, 12 estudios cumplieron todos los criterios establecidos y conformaron el corpus documental definitivo de la investigación.

Los criterios de inclusión comprendieron artículos científicos publicados entre 2019 y 2026, disponibles en texto completo, relacionados directamente con biofertilizantes o microorganismos benéficos aplicados a cultivos agrícolas y que analizaran su influencia sobre el crecimiento vegetal, productividad, calidad o respuesta frente a condiciones de estrés ambiental. Se consideraron publicaciones en español e inglés con información suficiente para su análisis. Los criterios de exclusión contemplaron documentos duplicados, publicaciones fuera del periodo establecido, estudios sin relación directa con el objeto de investigación, documentos sin acceso al texto completo, investigaciones centradas exclusivamente en microorganismos patógenos y publicaciones de carácter divulgativo que no correspondieran a literatura científica.

La información de los 12 estudios incluidos fue sistematizada mediante Microsoft Excel, donde se organizaron los datos correspondientes al autor, año de publicación, microorganismo empleado, cultivo estudiado, condición de estrés ambiental, mecanismo de acción, efectos sobre el desarrollo vegetal, productividad y calidad, además de las limitaciones identificadas. Posteriormente, se realizó un análisis cualitativo de los contenidos para establecer coincidencias, diferencias y patrones entre los estudios seleccionados. Esta organización permitió integrar los principales hallazgos y determinar los mecanismos biológicos y respuestas agronómicas asociados con el empleo de biofertilizantes y microorganismos benéficos bajo condiciones ambientales restrictivas.

Tabla 1

Método Prisma

Fase PRISMA	Proceso realizado	Registros/estudios
Identificación	Registros identificados mediante la búsqueda en Scopus, SciELO, Latindex, Dialnet y otras fuentes académicas	128
Identificación	Registros duplicados eliminados	26
Cribado	Registros sometidos a revisión de títulos y resúmenes	102
Cribado	Registros excluidos por no cumplir con la pertinencia temática o los criterios establecidos	63
Elegibilidad	Artículos evaluados mediante revisión del texto completo	39
Elegibilidad	Artículos excluidos después de la evaluación de texto completo	27
Inclusión	Estudios que cumplieron los criterios de inclusión y fueron incorporados al análisis	12

Los estudios analizados mostraron que el uso de biofertilizantes y microorganismos benéficos estuvo asociado con una respuesta favorable de los cultivos frente a diferentes condiciones de estrés ambiental. De manera general, se identificaron mejoras en el crecimiento vegetativo, desarrollo radicular, acumulación de biomasa y desempeño productivo, especialmente cuando los microorganismos empleados presentaron capacidad para favorecer la disponibilidad de nutrientes y modificar procesos fisiológicos relacionados con la adaptación vegetal. Estos resultados indicaron que la acción de los biofertilizantes no se limitó al aporte biológico de nutrientes, sino que estuvo vinculada con diferentes mecanismos de interacción entre los microorganismos, las raíces y el entorno edáfico.

La productividad de los cultivos presentó una tendencia favorable en los estudios que incorporaron microorganismos promotores del crecimiento vegetal. Se registraron incrementos en variables relacionadas con la biomasa, desarrollo de raíces, formación de órganos productivos y rendimiento agrícola, aunque la magnitud de las respuestas varió entre los diferentes cultivos y tratamientos. Los efectos más consistentes se asociaron con microorganismos capaces de mejorar la disponibilidad de nitrógeno, fósforo, potasio y hierro, debido a que estas funciones favorecieron una nutrición vegetal más eficiente durante condiciones ambientales que restringieron la absorción de nutrientes.

El desarrollo del sistema radicular constituyó una de las respuestas más recurrentes. La inoculación con determinados microorganismos favoreció una mayor proliferación, ramificación y expansión de las raíces, lo que amplió la capacidad de exploración del suelo y facilitó el acceso a agua y nutrientes. Esta respuesta adquirió especial importancia bajo condiciones de déficit hídrico y salinidad, donde una arquitectura radicular más desarrollada permitió a las plantas mantener con mayor estabilidad sus procesos de absorción. La estimulación radicular también se relacionó con la producción microbiana de compuestos reguladores del crecimiento y con la modificación de determinadas rutas hormonales de la planta.

Bajo estrés hídrico, los microorganismos benéficos favorecieron mecanismos relacionados con el mantenimiento del estado hídrico y el ajuste fisiológico de las plantas. Los estudios reportaron mejoras en el desarrollo radicular, regulación osmótica, acumulación de determinados solutos compatibles y actividad de enzimas antioxidantes. Estas respuestas se asociaron con una mayor capacidad para conservar la funcionalidad de los tejidos durante periodos de disponibilidad reducida de agua. También se observó que algunos microorganismos productores de exopolisacáridos contribuyeron a modificar las condiciones físicas de la rizosfera, favoreciendo la retención de humedad alrededor de las raíces.

En condiciones de estrés salino, los resultados evidenciaron una reducción de algunas alteraciones ocasionadas por la acumulación de sales en el entorno radicular. La aplicación de microorganismos tolerantes a la salinidad se relacionó con una mejor regulación del equilibrio osmótico e iónico, mayor disponibilidad de nutrientes y mantenimiento del crecimiento vegetal. Asimismo, se registró una mayor actividad de mecanismos antioxidantes, lo que contribuyó a disminuir el daño celular asociado con la generación excesiva de especies reactivas de oxígeno. En los cultivos evaluados, estas respuestas estuvieron acompañadas por una recuperación parcial de variables relacionadas con el crecimiento y el rendimiento.

Frente al estrés térmico, los estudios mostraron que determinados microorganismos benéficos contribuyeron a preservar procesos fisiológicos afectados por temperaturas elevadas. Se identificaron respuestas relacionadas con el incremento de la actividad antioxidante, regulación del metabolismo y protección de estructuras celulares. Aunque los resultados fueron variables entre especies vegetales y microorganismos, se observó que determinadas bacterias promotoras del crecimiento favorecieron la capacidad de las plantas para mantener su desarrollo bajo temperaturas superiores a sus rangos óptimos. Esta respuesta estuvo asociada principalmente con la regulación del estrés oxidativo y el mantenimiento de la actividad metabólica.

Los efectos sobre la calidad de los cultivos también fueron favorables, aunque presentaron mayor heterogeneidad que las respuestas relacionadas con el crecimiento y la productividad. Los estudios reportaron modificaciones positivas en determinados atributos bioquímicos y fisiológicos, incluyendo concentraciones de compuestos relacionados con el

valor nutricional y la condición fisiológica de los productos agrícolas. Sin embargo, la respuesta dependió considerablemente de la especie cultivada, el microorganismo empleado, el tipo de estrés y las variables utilizadas para valorar la calidad. Por esta razón, los resultados no permitieron establecer un efecto uniforme sobre todos los atributos de calidad, sino una respuesta condicionada por las características particulares de cada interacción planta-microorganismo.

El análisis de los mecanismos biológicos permitió reconocer cuatro vías principales mediante las cuales los microorganismos benéficos favorecieron la respuesta vegetal: mejora de la adquisición de nutrientes, estimulación del crecimiento radicular, regulación hormonal y activación de mecanismos antioxidantes y de tolerancia al estrés. Entre las funciones identificadas se encontraron la fijación biológica de nitrógeno, solubilización de fósforo, producción de sideróforos, síntesis de sustancias reguladoras del crecimiento, producción de exopolisacáridos y actividad de la ACC-desaminasa. La convergencia de estos mecanismos explicó la capacidad de determinados microorganismos para intervenir simultáneamente sobre la nutrición, el crecimiento y la adaptación fisiológica de las plantas.

A pesar de los resultados favorables, también se identificaron limitaciones en la eficacia de los biofertilizantes. Las respuestas variaron según la compatibilidad entre el microorganismo y la especie vegetal, las características del suelo, la disponibilidad de nutrientes, la intensidad y duración del estrés ambiental y la capacidad de establecimiento de los microorganismos en la rizosfera. Asimismo, se observaron diferencias entre los resultados obtenidos en condiciones controladas y aquellos registrados en ambientes productivos, lo que evidenció que la eficacia de estas alternativas biológicas no fue uniforme. En conjunto, los hallazgos mostraron que los biofertilizantes y microorganismos benéficos favorecieron la productividad y determinados atributos de calidad de los cultivos bajo estrés ambiental, principalmente mediante mecanismos relacionados con la nutrición, el desarrollo radicular, la regulación fisiológica y la protección antioxidante, aunque su efectividad estuvo condicionada por la interacción específica entre planta, microorganismo, suelo y ambiente.

4. DISCUSIÓN

La utilización de biofertilizantes y microorganismos benéficos adquiere relevancia como una estrategia biológica capaz de intervenir simultáneamente en diferentes procesos determinantes del desempeño vegetal bajo condiciones ambientales adversas. Su efecto se relaciona con la interacción que establecen los microorganismos con las raíces, el suelo y las comunidades microbianas presentes en la rizosfera, generando modificaciones que favorecen la disponibilidad de nutrientes, el crecimiento radicular y la regulación fisiológica de las plantas. Esta acción multifuncional permite interpretar que el beneficio de los biofertilizantes trasciende la función convencional de aportar nutrientes y se vincula con la capacidad del sistema planta-microorganismo para mantener procesos esenciales cuando el ambiente limita el desarrollo normal de los cultivos.

La disponibilidad de nutrientes constituye uno de los mecanismos centrales que explican la respuesta favorable de los cultivos. La fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo y potasio y la producción de compuestos quelantes favorecen la movilización de elementos que pueden encontrarse en formas poco accesibles para las raíces. Bajo condiciones de estrés ambiental, esta función adquiere una importancia adicional porque la sequía, la salinidad y las alteraciones de las propiedades del suelo pueden reducir la eficiencia con la que las plantas adquieren nutrientes. La actividad microbiana contribuye así a sostener una nutrición más equilibrada y favorece la formación de biomasa y estructuras directamente relacionadas con la productividad.

El fortalecimiento del sistema radicular representa otro mecanismo relevante para comprender la respuesta de los cultivos. La interacción con microorganismos promotores del crecimiento favorece la proliferación, ramificación y extensión de las raíces, incrementando el volumen de suelo explorado por la planta. Esta modificación resulta particularmente ventajosa cuando existe una disponibilidad limitada de agua o nutrientes, debido a que amplía las posibilidades de acceso a estos recursos. La estimulación radicular también mejora la capacidad de la planta para responder a condiciones ambientales restrictivas, por lo que el desarrollo de las raíces constituye un punto de conexión entre la actividad microbiana, la nutrición y la tolerancia al estrés.

Ante el déficit hídrico, la acción de los microorganismos benéficos se relaciona con mecanismos destinados a conservar el equilibrio hídrico y osmótico de los tejidos vegetales. La producción de exopolisacáridos, la modificación de las condiciones físicas de la rizosfera y la estimulación de respuestas antioxidantes favorecen la conservación de agua y la estabilidad fisiológica de las plantas. Al mismo tiempo, un sistema radicular más desarrollado permite aprovechar con mayor eficiencia el agua disponible en el suelo. Esta interacción demuestra que la contribución microbiana frente a la sequía no depende de un único mecanismo, sino de la convergencia de respuestas estructurales, bioquímicas y fisiológicas que permiten mantener el funcionamiento vegetal.

La salinidad plantea una situación particularmente compleja porque combina restricciones osmóticas con alteraciones del equilibrio iónico. En este contexto, determinados microorganismos favorecen la regulación de los niveles de solutos, mejoran la adquisición de nutrientes y estimulan sistemas antioxidantes que disminuyen el impacto del estrés oxidativo. La capacidad de algunos microorganismos para mantener su actividad en ambientes con elevada concentración de sales constituye, por tanto, un factor determinante para obtener una respuesta favorable. Esto explica por qué la selección del microorganismo adquiere especial importancia en suelos salinos, donde una cepa eficaz en condiciones normales no necesariamente conserva el mismo desempeño bajo una presión osmótica elevada.

La exposición a temperaturas elevadas compromete procesos como la fotosíntesis, estabilidad de las membranas y actividad enzimática, debido al incremento del estrés oxidativo y a las alteraciones metabólicas asociadas con el exceso de calor. Frente a estas condiciones, determinados microorganismos favorecen la activación de sistemas antioxidantes y contribuyen a preservar la funcionalidad celular. Sin embargo, la respuesta presenta una mayor dependencia de la intensidad y duración del estrés, así como de la capacidad de adaptación del cultivo y del microorganismo. Por ello, la acción de los biofertilizantes frente al estrés térmico debe entenderse como un mecanismo de fortalecimiento de la tolerancia vegetal y no como una eliminación de los efectos provocados por las temperaturas extremas.

La regulación de las señales hormonales proporciona una explicación adicional para las modificaciones observadas en el crecimiento y la adaptación de las plantas. Algunos microorganismos producen compuestos con actividad similar a las fitohormonas y otros intervienen en rutas hormonales propias del vegetal. La actividad de la ACC-desaminasa resulta especialmente relevante porque permite reducir la acumulación excesiva de etileno asociada con situaciones de estrés, evitando que esta respuesta limite de manera pronunciada el crecimiento radicular. De este modo, la interacción microbiana participa en la regulación del crecimiento desde el interior de la planta y favorece la conservación de estructuras necesarias para la adquisición de agua y nutrientes.

La calidad de los cultivos presenta una respuesta más heterogénea debido a que comprende características fisiológicas, bioquímicas, nutricionales y comerciales que no necesariamente evolucionan de forma paralela. La acción de los microorganismos puede favorecer determinados atributos relacionados con la composición y condición del producto agrícola, pero la magnitud de estos efectos depende de la especie cultivada, el microorganismo utilizado, el tipo de estrés y las condiciones de manejo. Esta variabilidad indica que la mejora de la calidad no debe interpretarse como un efecto generalizado de todos los biofertilizantes, sino como una respuesta dependiente de la interacción específica establecida en cada sistema productivo.

La combinación de diferentes microorganismos mediante consorcios microbianos permite integrar funciones que pueden resultar complementarias. Una asociación adecuadamente seleccionada puede reunir capacidades relacionadas con la movilización de nutrientes, estimulación radicular, producción de sustancias reguladoras y activación de mecanismos de tolerancia al estrés. No obstante, la combinación de cepas no garantiza automáticamente una mayor eficacia, ya que pueden presentarse relaciones de competencia, incompatibilidad o pérdida de actividad. La funcionalidad de un consorcio depende, por tanto, de la compatibilidad entre sus integrantes y de su capacidad para establecerse de manera estable en la rizosfera.

La variabilidad de las respuestas también pone de manifiesto que la eficacia de los biofertilizantes está condicionada por la interacción entre planta, microorganismo, suelo y ambiente. Las características genéticas del cultivo, las propiedades fisicoquímicas del suelo, la microbiota residente, la formulación del biofertilizante, la vía de aplicación y la intensidad del estrés intervienen conjuntamente en la expresión de los beneficios. Esta dependencia explica que

una misma formulación no produzca necesariamente respuestas equivalentes en diferentes cultivos o ambientes. En consecuencia, el potencial de estas alternativas biológicas se sustenta en su capacidad de complementar los procesos naturales del agroecosistema, pero su aprovechamiento requiere considerar las condiciones específicas que determinan el establecimiento y funcionamiento de las comunidades microbianas.

La interacción planta-microorganismo constituye un componente determinante en la capacidad de los cultivos para mantener su funcionamiento fisiológico frente a condiciones ambientales restrictivas. La convergencia entre una mayor eficiencia en la adquisición de nutrientes, el fortalecimiento del sistema radicular, la regulación de procesos hormonales y la activación de mecanismos antioxidantes favorece la conservación del crecimiento y del rendimiento cuando el cultivo enfrenta déficit hídrico, salinidad o temperaturas elevadas. Sin embargo, estos efectos dependen de la compatibilidad entre el microorganismo y la planta, las características del suelo, la naturaleza del estrés y las condiciones de aplicación. En consecuencia, los biofertilizantes y microorganismos benéficos representan una alternativa biológica con capacidad para fortalecer la productividad y determinados atributos de calidad de los cultivos, siempre que su utilización considere las condiciones específicas que regulan el establecimiento y la actividad microbiana en cada sistema agrícola.

5. CONCLUSIÓN

Los biofertilizantes y microorganismos benéficos muestran un potencial relevante para fortalecer la productividad de los cultivos sometidos a condiciones de estrés ambiental, debido a su capacidad para intervenir simultáneamente en procesos relacionados con la nutrición, el crecimiento y la respuesta fisiológica de las plantas. Su acción favorece el desarrollo radicular, la disponibilidad y aprovechamiento de nutrientes, la acumulación de biomasa y el rendimiento agrícola, particularmente cuando las condiciones ambientales limitan el funcionamiento normal del cultivo. Esta evidencia permite reconocer que la función de estos recursos biológicos trasciende el suministro de nutrientes y se vincula con una interacción más amplia entre microorganismos, raíces y suelo.

Los mecanismos biológicos identificados explican buena parte de la respuesta favorable de los cultivos frente a condiciones ambientales restrictivas. La fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo y otros nutrientes, la producción de sideróforos y sustancias reguladoras del crecimiento, la estimulación del sistema radicular, la actividad de la ACC-desaminasa y la activación de mecanismos antioxidantes actúan de manera complementaria sobre diferentes componentes del funcionamiento vegetal. Esta convergencia permite favorecer el equilibrio hídrico y osmótico, mantener procesos metabólicos esenciales y reducir determinadas alteraciones asociadas con el déficit hídrico, la salinidad y las temperaturas elevadas.

La productividad presenta respuestas favorables asociadas con el empleo de microorganismos benéficos, mientras que los efectos sobre la calidad de los cultivos muestran una mayor heterogeneidad. Los cambios en atributos fisiológicos, bioquímicos y nutricionales dependen de la especie vegetal, el microorganismo utilizado, las características del ambiente y los criterios empleados para valorar la calidad. Por ello, el efecto de los biofertilizantes no puede considerarse uniforme entre cultivos ni condiciones productivas, sino que responde a interacciones específicas que determinan la expresión de los beneficios obtenidos.

La eficacia de estas alternativas biológicas está condicionada por la interacción entre planta, microorganismo, suelo y ambiente. Las propiedades fisicoquímicas del suelo, la microbiota residente, la compatibilidad entre microorganismos y cultivos, la formulación, la vía de aplicación y la intensidad y duración del estrés influyen sobre el establecimiento y la actividad microbiana. Los consorcios microbianos ofrecen posibilidades para integrar funciones complementarias relacionadas con la nutrición, el crecimiento y la tolerancia al estrés, aunque su efectividad depende de la compatibilidad y estabilidad de las cepas que los conforman.

Los hallazgos permiten establecer que los biofertilizantes y microorganismos benéficos representan una alternativa biológica con capacidad para contribuir al mantenimiento de la productividad y al fortalecimiento de determinados atributos de calidad de los cultivos bajo condiciones ambientales adversas. Su principal aporte se encuentra en la capacidad de complementar los procesos naturales del sistema suelo-planta mediante mecanismos que favorecen la adquisición de nutrientes, el desarrollo radicular, la regulación fisiológica y la protección frente al estrés. No obstante,

su eficacia depende de las condiciones particulares en las que se establece la interacción planta-microorganismo, por lo que su valoración requiere considerar de manera integrada las características del cultivo, el microorganismo, el suelo y el ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, N., & al, e. (2025). Sinergia simbiótica: Cómo los hongos micorrícicos arbusculares mejoran la absorción de nutrientes, la tolerancia al estrés y la salud del suelo a través de mecanismos moleculares y regulación hormonal. *IMA Fungus*, <https://doi.org/10.3897/imafungus.16.144989>.
- Akhtar, H., & al, e. (2025). Impacto de los microorganismos del suelo y el estrés abiótico en la fisiología y el crecimiento de las raíces de la fresa: una revisión. *Phyton - Revista Internacional de Botánica Experimental*, 10.32604/phyton.2025.061262.
- Cabrera, V. R., & al, e. (2023). La influencia de la microbiota del suelo en el rendimiento agrícola, un análisis científico. *Innova*, <https://doi.org/10.63618/omd/isj/v1/n4/24>.
- Fanai, A., & al, e. (2024). Adaptaciones de las plantas a los factores de estrés inducidas por bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB): una revisión actualizada. *PMC*, 10.7717/peerj.17882.
- Figueiredo, S. L., & al, e. (2021). Estructura del microbioma vegetal y sus beneficios para la agricultura sostenible. *Biología Vegetal Actual*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214662821000049>.
- Gamalero, E., & al, e. (2023). Etileno, ACC y la enzima promotora del crecimiento vegetal ACC desaminasa. *Biología*, <https://doi.org/10.3390/biology12081043>.
- Kibret, M., & al, e. (2024). Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal mitigan el estrés por sequía y salinidad, y mejoran el desempeño fisiológico y agronómico de los cultivos: una revisión sistemática. *Icarda*, <https://hdl.handle.net/20.500.11766/70014>.
- Kour, D., H, K., SS, K., RT, K., M, B., S, K., . . . YP., S. (2023). Biodiversidad y atributos funcionales de los microbiomas rizosféricos: herramientas potenciales para la agricultura sostenible. *Potential Tools for Sustainable Agriculture. Curr Microbiol.*, 10.1007/s00284-023-03300-5.
- Kumar, & al, e. (2024). El papel de los genes de respuesta a la sequía y las bacterias promotoras del crecimiento vegetal en la promoción del crecimiento de las plantas en la agricultura sostenible: una revisión. *Investigación microbiológica*, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127827>.
- Martínez, B. B., & al, e. (2021). Bacterias promotoras de crecimiento vegetal para incrementar la producción de Lactuca sativa L. en campo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.1944>.
- Rani, S., Sogarwal, A. G., & a, e. a. (2025). Aprovechamiento de las interacciones planta-bacteria para mejorar la tolerancia al estrés abiótico en las plantas: una revisión. *Discov. Plants*, <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00330-0>.
- Rincón, M. C., & al, e. (2025). Avances y desafíos en la producción y uso de bacterias nativas como probióticos vegetales en aplicaciones agronómicas: una revisión mexicana. *Revista de Investigación Agrícola y Alimentaria*, <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101917>.
- Singh, M., & al, e. (2024). Perspectivas sobre las funciones multifacéticas de los microbios del suelo en la mitigación del estrés abiótico en plantas cultivadas: una revisión. *Botánica ambiental y experimental*, 10.1016/j.envexpbot.2024.106010.
- Velasco, J. A., Castellanos, H. O., Acevedo, H. G., Clarenc, A. R., & Rodríguez, S. A. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.470>.

CONSIDERACIONES ÉTICAS

El presente estudio se llevó a cabo de conformidad con los principios éticos que rigen la investigación con participantes humanos. Antes de la recolección de los datos, el protocolo de investigación fue revisado y aprobado por el comité de ética institucional correspondiente. Todos los participantes fueron informados de manera clara sobre los objetivos del estudio, los procedimientos, las posibles implicaciones y el carácter voluntario de su participación, otorgando posteriormente su consentimiento informado. Durante todo el proceso de investigación se garantizó la confidencialidad de la información, el anonimato de los participantes y el uso exclusivo de los datos recopilados con fines científicos y académicos.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

Los autores declaran que la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT fue utilizada exclusivamente para la traducción al idioma inglés y la revisión lingüística del manuscrito. La herramienta no contribuyó a la concepción del estudio, el diseño de la investigación, la recolección de datos, el análisis estadístico, la interpretación de los resultados ni a la elaboración de las conclusiones. Los autores asumen la plena responsabilidad por la originalidad, exactitud, integridad y validez científica del contenido presentado en este manuscrito.

FINANCIAMIENTO

La presente investigación no recibió subvenciones, becas ni apoyo financiero específico por parte de organismos públicos, entidades comerciales u organizaciones sin fines de lucro.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses de carácter financiero, personal, profesional o institucional que hayan podido influir en el desarrollo, los resultados o la publicación de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: (COQM)

Curación de datos: (COQM)

Análisis formal: (COQM)

Adquisición de fondos: (COQM)

Investigación: (COQM)

Metodología: (COQM)

Administración del proyecto: (COQM)

Recursos: (COQM)

Software: (COQM)

Supervisión: (COQM)

Validación: (COQM)

Visualización: (COQM)

Redacción – Borrador original: (COQM)

Redacción – Revisión y edición: (COQM)