



El uso de biofertilizantes en la agricultura moderna sus avances, desafíos y perspectivas

The use of biofertilizers in modern agriculture, its advances, challenges and perspectives

Palacios-López, Luisa Anabel ^{1*}

¹ Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador, Jipijapa; <https://orcid.org/0000-0002-9257-7557>, luisa.palacios@unesum.edu.ec

* Autor Correspondencia

 <https://doi.org/10.70881/mcj/v1/n2/16>

Cita: Palacios-López, L. A. (2023). El uso de biofertilizantes en la agricultura moderna sus avances, desafíos y perspectivas. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 1(2), 52-64. <https://doi.org/10.70881/mcj/v1/n2/16>

Recibido: 13/05/2023
Revisado: 20/05/2023
Aceptado: 26/05/2023
Publicado: 12/06/2023

Copyright: © 2023 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC)**.

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Resumen: Los biofertilizantes son una alternativa sostenible en la agricultura moderna, ya que reducen el uso de fertilizantes químicos y mejoran la salud del suelo. Este estudio revisa sus avances, retos y perspectivas, destacando que los microorganismos vivos en los biofertilizantes aumentan la productividad agrícola hasta en un 30%, mejoran la estructura del suelo y disminuyen la dependencia de insumos químicos. Sin embargo, su adopción enfrenta desafíos como la producción a gran escala, la sensibilidad al almacenamiento y la falta de conocimiento técnico entre los agricultores. Además, la carencia de incentivos económicos y políticas públicas limita su implementación. Superar estas barreras requiere colaboración interdisciplinaria, investigación avanzada y capacitación, promoviendo sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes frente al cambio climático.

Palabras clave: biofertilizantes; sostenibilidad agrícola; microorganismos beneficiosos; fertilidad del suelo.

Abstract: Biofertilizers are a sustainable alternative in modern agriculture, as they reduce the use of chemical fertilizers and improve soil health. This study reviews their advances, challenges and prospects, highlighting that live microorganisms in biofertilizers increase agricultural productivity by up to 30%, improve soil structure and decrease dependence on chemical inputs. However, their adoption faces challenges such as large-scale production, storage sensitivity and lack of technical knowledge among farmers. In addition, the lack of economic incentives and public policies limits their implementation. Overcoming these barriers requires interdisciplinary collaboration, advanced research and training, promoting more sustainable and resilient agricultural systems in the face of climate change.

Keywords: biofertilizers; agricultural sustainability; beneficial microorganisms; soil fertility.

1. Introducción

La agricultura moderna enfrenta el desafío de equilibrar la necesidad de aumentar la productividad con la preservación del medio ambiente. El uso intensivo de fertilizantes químicos ha contribuido significativamente al incremento de los rendimientos agrícolas; sin embargo, también ha generado problemas como la degradación del suelo, contaminación de recursos hídricos y afectaciones a la salud humana (Zelaya Molina et al., 2020). En este contexto, los biofertilizantes emergen como una alternativa sostenible, promoviendo el crecimiento vegetal mediante la actividad de microorganismos beneficiosos (Martínez & Dibut, 2012).

Los biofertilizantes son preparados que contienen microorganismos vivos, los cuales, al ser aplicados a semillas, plantas o suelos, colonizan la rizosfera o el interior de la planta, aumentando la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo (Alfonso et al., 2005). Su aplicación no solo mejora la fertilidad del suelo, sino que también contribuye a la sostenibilidad agrícola al reducir la dependencia de fertilizantes químicos (Grageda-Cabrera et al., 2012). Además, el uso de biofertilizantes fomenta el equilibrio ecológico y permite la regeneración de ecosistemas degradados, promoviendo un enfoque agroecológico integral (Zelaya Molina et al., 2020).

A pesar de los beneficios asociados al uso de biofertilizantes, su adopción en la agricultura moderna enfrenta diversos retos. Entre ellos se encuentran la variabilidad en la eficacia bajo diferentes condiciones agroecológicas, la limitada vida útil de los productos biológicos y la falta de conocimiento técnico por parte de los agricultores (Grageda-Cabrera et al., 2012). Además, la producción a gran escala y la comercialización de biofertilizantes requieren inversiones significativas en investigación y desarrollo, así como marcos regulatorios que garanticen su calidad y eficacia (Martínez & Dibut, 2012). Estos desafíos subrayan la necesidad de estrategias de implementación que incluyan capacitación técnica y financiamiento para fomentar su adopción.

La justificación para profundizar en el estudio de los biofertilizantes radica en su potencial para transformar prácticas agrícolas hacia modelos más sostenibles. Al reducir el uso de agroquímicos, se mitigan los impactos ambientales negativos y se promueve la salud del ecosistema agrícola (Zelaya Molina et al., 2020). Además, la implementación de biofertilizantes puede contribuir a la seguridad alimentaria al mejorar la calidad y cantidad de los cultivos (Alfonso et al., 2005). Este impacto positivo refuerza su relevancia en un contexto global donde la sostenibilidad de los sistemas alimentarios es una prioridad crítica.

La viabilidad de integrar biofertilizantes en la agricultura moderna depende de múltiples factores, incluyendo la adaptación de los microorganismos a diferentes tipos de suelo y cultivos, la capacitación de los agricultores en su uso adecuado y el desarrollo de políticas públicas que incentiven su adopción (De los Santos-Villalobos et al., 2018). La colaboración entre instituciones de investigación, sector privado y comunidades agrícolas es esencial para superar las barreras existentes y facilitar la transición hacia prácticas más ecológicas (Grageda-Cabrera et al., 2012).

El objetivo de este artículo es realizar una revisión exhaustiva de los avances, retos y perspectivas asociados al uso de biofertilizantes en la agricultura moderna. Se analizarán estudios recientes que evidencian su eficacia en la mejora de la productividad

agrícola y la sostenibilidad ambiental, así como las limitaciones y desafíos que enfrentan para su adopción generalizada. Asimismo, se discutirán las oportunidades futuras para la integración de biofertilizantes en sistemas agrícolas contemporáneos, proporcionando una visión integral de su potencial y las estrategias necesarias para su implementación efectiva.

2. Materiales y Métodos

El presente artículo se desarrolló mediante un enfoque exploratorio y cualitativo, basado en una revisión bibliográfica exhaustiva y sistemática de fuentes académicas relevantes. Esta metodología se eligió debido a la naturaleza del estudio, orientado a analizar y sintetizar el conocimiento disponible sobre los avances, retos y perspectivas del uso de biofertilizantes en la agricultura moderna. La revisión bibliográfica permitió recopilar información actualizada y representativa, enfocándose en estudios que ofrecieran una comprensión integral del tema desde diversas perspectivas científicas y prácticas.

El proceso metodológico inició con la delimitación clara del objetivo de investigación, estableciendo como punto de partida el análisis de la importancia de los biofertilizantes como alternativa sostenible en la agricultura moderna. A partir de este enfoque, se identificaron palabras clave y combinaciones de términos para realizar búsquedas específicas en bases de datos académicas de alto impacto, como Scopus, Web of Science, ScienceDirect y SpringerLink. Los términos empleados incluyeron "biofertilizantes", "fertilizantes biológicos", "microorganismos benéficos", "sostenibilidad agrícola" y "agricultura regenerativa". Estas búsquedas se limitaron principalmente a publicaciones de los últimos 15 años, aunque se consideraron estudios seminales anteriores que fueran esenciales para el desarrollo conceptual del tema.

Los criterios de inclusión para la selección de fuentes incluyeron documentos publicados en revistas científicas indexadas, estudios revisados por pares, revisiones sistemáticas y metaanálisis. También se consideraron investigaciones empíricas relevantes que ofrecieran datos cuantitativos o cualitativos sobre la aplicación de biofertilizantes en diversos contextos agrícolas. Por otro lado, se excluyeron publicaciones no indexadas, artículos de opinión, documentos con métodos poco claros o estudios que carecieran de rigor científico. Adicionalmente, se priorizó la búsqueda de artículos en inglés y español, lo que permitió acceder a un amplio espectro de literatura y contextos globales.

Tras la recopilación inicial, se llevó a cabo una lectura crítica de los resúmenes y, en casos pertinentes, del contenido completo de los documentos seleccionados. Este proceso permitió evaluar la relevancia de cada artículo en relación con los objetivos del estudio, asegurando que las fuentes incluidas ofrecieran información sólida y complementaria. Una vez completada esta etapa, los datos obtenidos se organizaron en categorías temáticas para facilitar su análisis. Estas categorías incluyeron: definición, clasificación y características de los biofertilizantes; beneficios en términos de sostenibilidad y productividad; retos asociados a su uso e implementación; y perspectivas futuras para su adopción a gran escala.

Para garantizar un manejo eficiente de la información, se emplearon herramientas de gestión bibliográfica como Mendeley y Zotero, lo que permitió la sistematización de las referencias, la creación de una base de datos organizada y la integración de las citas en

el texto del artículo. Estas herramientas también facilitaron la identificación de patrones recurrentes en la literatura revisada, destacando áreas de consenso y controversia dentro del campo de estudio.

El análisis cualitativo se centró en identificar y sintetizar tendencias, brechas de conocimiento y desafíos críticos, lo que permitió construir un marco teórico que respaldara la discusión de los hallazgos. Además, se emplearon métodos de triangulación de datos para asegurar la validez de las interpretaciones, considerando múltiples perspectivas y contextos presentes en los estudios seleccionados. Este enfoque analítico no solo garantizó una evaluación crítica de la literatura, sino que también permitió proponer posibles líneas de investigación futura, destacando la necesidad de enfoques interdisciplinarios que integren conocimientos biológicos, agrícolas, económicos y sociales.

Una característica distintiva de la metodología aplicada fue su enfoque en la relevancia práctica de los hallazgos. Esto implicó considerar no solo los aspectos técnicos de los biofertilizantes, sino también su impacto en la sostenibilidad agrícola, la viabilidad económica y las implicaciones sociales de su uso. Esta perspectiva integral busca ofrecer una base sólida para académicos, profesionales del sector agrícola y responsables de la formulación de políticas públicas interesados en promover prácticas agrícolas sostenibles.

La metodología aplicada asegura la reproducibilidad y transparencia del proceso de investigación. Cada paso fue diseñado para proporcionar un análisis riguroso y fundamentado, garantizando que las conclusiones derivadas del estudio sean fiables y útiles para avanzar en el conocimiento sobre los biofertilizantes. Este enfoque metodológico no solo enriquece la literatura existente, sino que también proporciona herramientas conceptuales y prácticas para enfrentar los desafíos de la agricultura moderna.

3. Resultados

3.1. Avances en el uso de biofertilizantes

Los biofertilizantes representan una herramienta clave en la transición hacia sistemas agrícolas más sostenibles y eficientes. A continuación, se analizan de manera detallada los principales avances asociados a su uso, incluyendo su impacto en la productividad agrícola, la calidad del suelo, la reducción de fertilizantes químicos y el impulso hacia prácticas agrícolas sostenibles.

3.1.1. Incremento en la productividad agrícola

El uso de biofertilizantes ha demostrado mejorar significativamente los rendimientos de cultivos diversos, gracias a su capacidad para aumentar la disponibilidad de nutrientes esenciales como el nitrógeno y el fósforo. Los microorganismos presentes en los biofertilizantes, como bacterias fijadoras de nitrógeno del género *Rhizobium* o solubilizadoras de fósforo como *Pseudomonas*, actúan en la rizosfera para optimizar el aprovechamiento de nutrientes por parte de las plantas (Kumar et al., 2021). Estudios han evidenciado que cultivos como el maíz, el trigo y la soya muestran incrementos de

hasta un 30% en sus rendimientos al ser tratados con biofertilizantes en comparación con fertilizantes químicos convencionales (Meena et al., 2020).

Adicionalmente, los biofertilizantes favorecen el desarrollo de raíces más robustas, lo que aumenta la capacidad de las plantas para absorber agua y nutrientes. Esto es especialmente relevante en regiones con suelos de baja fertilidad o expuestos a condiciones climáticas adversas, donde los biofertilizantes han permitido sostener la productividad agrícola en escenarios de estrés hídrico y salinidad (Bhattacharyya et al., 2020).

3.1.2. Mejora en la calidad del suelo

Los biofertilizantes no solo benefician a los cultivos, sino que también contribuyen a la salud del suelo a largo plazo. A diferencia de los fertilizantes químicos, que pueden causar acidificación y pérdida de materia orgánica, los biofertilizantes estimulan la actividad biológica en el suelo. Microorganismos como las micorrizas arbusculares promueven la formación de agregados del suelo, mejorando su estructura y aumentando su capacidad para retener agua y nutrientes (Alori et al., 2017).

Además, el uso continuo de biofertilizantes en lugar de insumos químicos permite la regeneración del contenido orgánico del suelo, incrementando su fertilidad natural. Investigaciones han demostrado que la aplicación de biofertilizantes a largo plazo eleva los niveles de carbono orgánico y promueve un equilibrio favorable en la población microbiana del suelo, creando un ecosistema más resiliente (Fageria & Baligar, 2014). Este enfoque es crucial para la restauración de suelos degradados y el mantenimiento de la biodiversidad edáfica, fundamental para el equilibrio ecológico.

3.1.3. Reducción de fertilizantes químicos

Uno de los principales aportes de los biofertilizantes es su capacidad para sustituir parcialmente los fertilizantes químicos, cuya producción y uso tienen un impacto ambiental significativo. Según la FAO (2020), el uso excesivo de fertilizantes químicos es responsable de problemas como la eutrofización de cuerpos de agua, emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación del suelo. Los biofertilizantes, al mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes, permiten reducir la dependencia de estos insumos sin comprometer la productividad agrícola.

Por ejemplo, en cultivos como el arroz y el trigo, la combinación de biofertilizantes con dosis reducidas de fertilizantes químicos ha logrado mantener altos niveles de rendimiento, al tiempo que disminuye hasta en un 50% la cantidad de fertilizantes químicos requeridos (Pathak et al., 2019). Este enfoque no solo mitiga el impacto ambiental, sino que también representa un ahorro económico significativo para los agricultores, especialmente en contextos de economías emergentes.

La agricultura sostenible se ha convertido en un desafío crucial en la actualidad, donde es necesario equilibrar la productividad con la preservación ambiental. La imagen compara los biofertilizantes y los fertilizantes químicos, resaltando sus impactos económicos, ambientales y productivos. Mientras los biofertilizantes ofrecen una alternativa sostenible con menores costos y menor impacto ambiental, los fertilizantes químicos, aunque más comunes, generan efectos negativos a largo plazo tanto en la

economía de los agricultores como en los ecosistemas. La adopción de prácticas agrícolas sostenibles es clave para garantizar un futuro más verde y equilibrado.

Figura 1.

Biofertilizantes vs. Fertilizantes químicos: Un enfoque hacia la sostenibilidad agrícola



Elija prácticas agrícolas sostenibles para un futuro más verde.

Nota: La elección entre biofertilizantes y fertilizantes químicos impacta directamente la productividad, economía y el medio ambiente (Autores, 2023).

La comparación presentada en la imagen enfatiza las diferencias significativas entre los biofertilizantes y los fertilizantes químicos. Los biofertilizantes promueven una productividad sostenible, permiten ahorros económicos y reducen significativamente el impacto ambiental al mejorar la calidad del suelo y los ecosistemas. Por el contrario, los fertilizantes químicos, aunque proporcionan resultados rápidos, comprometen la productividad a largo plazo debido al deterioro del suelo, aumentan los costos económicos y generan un mayor impacto ambiental como la contaminación de aguas y pérdida de biodiversidad. La balanza visual refuerza la necesidad de adoptar soluciones ecológicas como los biofertilizantes, destacando su potencial para transformar la agricultura en una práctica más sostenible y responsable.

3.1.4. Impulso a la sostenibilidad agrícola

El uso de biofertilizantes encaja perfectamente en los modelos de agricultura sostenible, ya que combina productividad con conservación ambiental. Al ser productos biológicos, los biofertilizantes no generan residuos tóxicos ni dañan la biodiversidad, lo que los hace compatibles con sistemas agroecológicos y orgánicos. Además, al promover la regeneración del suelo y reducir el impacto ambiental de la agricultura, contribuyen al cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como el ODS 2 (Hambre cero) y el ODS 15 (Vida en la tierra).

Asimismo, los biofertilizantes tienen un papel destacado en la mitigación del cambio climático. Su uso reduce las emisiones de óxido nitroso, un potente gas de efecto invernadero, asociado al uso de fertilizantes nitrogenados químicos. También fomentan prácticas de manejo sostenible del suelo que aumentan su capacidad para secuestrar carbono, contribuyendo así a estrategias globales de mitigación del cambio climático (Lal, 2015).

Para concluir, la adopción de biofertilizantes fomenta una agricultura más inclusiva y resiliente. Estos productos biológicos son accesibles para pequeños agricultores que

enfrentan limitaciones económicas, ya que pueden producirse localmente con recursos disponibles en cada región. Esto, a su vez, impulsa el desarrollo rural, creando oportunidades económicas y promoviendo la equidad en el acceso a tecnologías agrícolas avanzadas.

3.2. Retos en la implementación

La implementación de biofertilizantes en la agricultura moderna, a pesar de sus múltiples beneficios, enfrenta una serie de retos críticos que deben ser abordados para garantizar su adopción efectiva y sostenida. Estos desafíos se centran en las dificultades relacionadas con la producción y almacenamiento de los productos, los costos asociados y la falta de incentivos económicos, así como las deficiencias en la capacitación técnica de los agricultores. A continuación, se analizan en profundidad estos puntos clave.

3.2.1. Dificultades en la producción y almacenamiento

La producción de biofertilizantes implica una serie de complejidades técnicas que limitan su escalabilidad. El éxito de estos insumos biológicos depende de la selección adecuada de microorganismos que sean efectivos bajo diversas condiciones agroecológicas. Esto exige investigaciones avanzadas para identificar cepas específicas con capacidad de sobrevivir y desempeñarse de manera óptima en diferentes tipos de suelo y climas. Sin embargo, la diversidad microbiana y las interacciones ecológicas hacen que esta tarea sea técnicamente desafiante y costosa (Bhattacharyya & Jha, 2012).

Además, la producción industrial requiere instalaciones especializadas que cumplan con estándares estrictos de calidad. Estas instalaciones deben garantizar que los microorganismos mantengan su viabilidad durante la producción y el procesamiento. La contaminación microbiana y las variaciones en las condiciones de cultivo son riesgos comunes que pueden afectar la calidad del producto final, reduciendo su eficacia en el campo (Mitter et al., 2021).

El almacenamiento de biofertilizantes también representa un obstáculo importante. Los microorganismos que componen estos productos son sensibles a factores ambientales como la temperatura, la humedad y la luz. Sin condiciones de almacenamiento adecuadas, la viabilidad de estos microorganismos puede disminuir rápidamente, lo que afecta su efectividad en el momento de la aplicación (Mahanty et al., 2017). Esto es especialmente problemático en países en desarrollo, donde las infraestructuras de almacenamiento y transporte son limitadas.

3.2.2. Costos e incentivos limitados

Aunque los biofertilizantes son económicamente sostenibles a largo plazo debido a la reducción del uso de insumos químicos, su adopción inicial puede ser costosa para los agricultores. Los costos de producción y distribución de biofertilizantes son generalmente más altos que los de los fertilizantes químicos convencionales, lo que puede desalentar a los pequeños y medianos productores agrícolas. Este problema se agrava en regiones donde los agricultores operan con márgenes de beneficio reducidos y enfrentan incertidumbres climáticas y de mercado (Singh et al., 2020).

Otro aspecto crítico es la falta de incentivos económicos específicos para fomentar la transición hacia biofertilizantes. En muchos países, los programas gubernamentales de

subsidios están diseñados para apoyar el uso de fertilizantes químicos, relegando las alternativas biológicas a un segundo plano. La ausencia de políticas públicas orientadas a promover los biofertilizantes perpetúa un modelo agrícola dependiente de insumos químicos, dificultando la adopción de prácticas más sostenibles (FAO, 2020).

Además, la falta de mercados establecidos para biofertilizantes limita su accesibilidad. En zonas rurales, donde predominan los pequeños agricultores, la falta de cadenas de suministro eficientes impide que los biofertilizantes lleguen a los usuarios finales. Esta situación subraya la necesidad de desarrollar sistemas de distribución adecuados que permitan una mayor disponibilidad de estos productos.

3.2.3. Falta de capacitación técnica

El uso eficiente de biofertilizantes requiere un conocimiento especializado sobre su aplicación, manejo y compatibilidad con diferentes cultivos. Sin embargo, en muchos contextos agrícolas, los agricultores carecen de acceso a programas de capacitación técnica que les permitan adquirir estas habilidades. Esto conduce a una aplicación incorrecta de los productos, reduciendo su eficacia y, en algunos casos, causando efectos adversos en los cultivos (Choudhary et al., 2021).

La extensión agrícola desempeña un papel crucial en la difusión de conocimientos sobre biofertilizantes, pero en muchos países, este sector enfrenta limitaciones en recursos y personal capacitado. La falta de inversión en programas de extensión agronómica restringe la transferencia de tecnologías innovadoras a los agricultores, perpetuando el uso de métodos tradicionales menos sostenibles (Sharma et al., 2019).

Además, los prejuicios y la falta de información sobre los beneficios de los biofertilizantes generan desconfianza entre los agricultores. Muchos productores perciben estos insumos como menos efectivos en comparación con los fertilizantes químicos, lo que desalienta su adopción. Este problema se ve exacerbado por la ausencia de campañas educativas y de sensibilización que promuevan una comprensión integral de los beneficios ambientales y económicos de los biofertilizantes.

Para superar los retos asociados a la implementación de biofertilizantes, es necesario adoptar un enfoque integral que abarque la mejora de las tecnologías de producción y almacenamiento, la creación de incentivos económicos específicos y la promoción de programas de capacitación técnica. Las políticas públicas deben desempeñar un papel central en este proceso, fomentando la investigación científica, estableciendo cadenas de suministro eficientes y promoviendo la educación agrícola. Solo a través de estas acciones será posible transformar los desafíos actuales en oportunidades para una agricultura más sostenible y resiliente.

4. Discusión

La discusión en torno al uso de biofertilizantes en la agricultura moderna revela una dualidad entre su potencial transformador y los desafíos inherentes a su adopción. Por un lado, los avances tecnológicos y científicos subrayan el impacto positivo de estos insumos biológicos en la productividad agrícola, la calidad del suelo y la sostenibilidad ambiental. Por otro, las limitaciones prácticas asociadas a su implementación requieren

un enfoque sistémico que integre conocimientos técnicos, políticas públicas y estrategias de capacitación.

El incremento en la productividad agrícola mediante biofertilizantes es ampliamente respaldado por la literatura científica. Diversos estudios han demostrado que microorganismos como bacterias fijadoras de nitrógeno y micorrizas arbusculares no solo mejoran la disponibilidad de nutrientes esenciales, sino que también potencian el desarrollo radicular, lo cual incrementa la capacidad de absorción de agua y minerales (Bhattacharyya & Jha, 2012). Estos beneficios, sin embargo, están condicionados por la correcta aplicación de los productos y por la compatibilidad de las cepas microbianas con los cultivos y suelos específicos (Mahanty et al., 2017). Por ello, es necesario ampliar las investigaciones sobre la adaptabilidad de los biofertilizantes a diferentes contextos agroecológicos, lo que permitirá maximizar sus beneficios en una mayor variedad de escenarios.

Otro aspecto crucial es la contribución de los biofertilizantes a la calidad del suelo. A diferencia de los fertilizantes químicos, que a menudo contribuyen a la degradación del suelo, los biofertilizantes mejoran su estructura y aumentan su biodiversidad. Esto no solo favorece el rendimiento de los cultivos, sino que también refuerza la resiliencia del suelo frente a desafíos como la erosión y la contaminación (Alori et al., 2017). No obstante, la discusión sobre su uso debe considerar las condiciones específicas de almacenamiento y transporte, ya que estos factores afectan directamente la viabilidad de los microorganismos y, en consecuencia, la eficacia del producto en el campo (Mitter et al., 2021).

En términos de sostenibilidad ambiental, los biofertilizantes destacan como una herramienta clave para mitigar los impactos negativos de la agricultura intensiva. Su uso reduce la dependencia de fertilizantes químicos, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación de cuerpos de agua. Además, su capacidad para promover el secuestro de carbono en el suelo los posiciona como aliados en la lucha contra el cambio climático (Lal, 2015). Sin embargo, estos beneficios solo pueden materializarse a través de una adopción generalizada, lo que plantea interrogantes sobre la viabilidad económica de su implementación a gran escala.

El análisis de los retos asociados a los biofertilizantes evidencia la necesidad de superar barreras estructurales. La producción y almacenamiento representan desafíos logísticos y tecnológicos significativos, especialmente en regiones donde las infraestructuras son limitadas. Por otro lado, la falta de incentivos económicos adecuados dificulta la transición de los agricultores hacia estas alternativas biológicas. En este sentido, las políticas públicas deben desempeñar un papel central, promoviendo subsidios específicos y fomentando la investigación y desarrollo de biofertilizantes (FAO, 2020). Además, la creación de cadenas de suministro eficientes y accesibles es fundamental para garantizar la disponibilidad de estos insumos en zonas rurales, donde su uso podría tener un impacto transformador en la productividad agrícola.

La capacitación técnica emerge como un elemento crítico para el éxito de los biofertilizantes. Los agricultores necesitan entender los beneficios y las técnicas de aplicación para maximizar la eficacia de estos productos. Sin programas de extensión agrícola y estrategias de sensibilización, es poco probable que los biofertilizantes se conviertan en una práctica generalizada (Sharma et al., 2019). La percepción de que los

biofertilizantes son menos efectivos que los fertilizantes químicos subraya la importancia de comunicar evidencias científicas claras sobre su impacto positivo, complementando esta información con capacitaciones prácticas que refuercen su confianza en estas tecnologías.

Los biofertilizantes representan un avance significativo hacia una agricultura más sostenible y respetuosa con el medio ambiente. No obstante, su implementación enfrenta retos que requieren un enfoque interdisciplinario y colaborativo. Es esencial que las políticas públicas, el sector privado y las instituciones de investigación trabajen en conjunto para desarrollar soluciones innovadoras que aborden los obstáculos existentes. Solo así será posible aprovechar plenamente el potencial de los biofertilizantes y transformar los sistemas agrícolas en modelos resilientes y sostenibles.

5. Conclusiones

Los biofertilizantes se consolidan como una de las alternativas más prometedoras para transformar los sistemas agrícolas tradicionales en modelos sostenibles y resilientes. Su capacidad para incrementar la productividad de los cultivos, mejorar la calidad del suelo y reducir la dependencia de insumos químicos evidencia su relevancia en un contexto global marcado por la necesidad de balancear la seguridad alimentaria con la conservación ambiental. Además, su contribución al fortalecimiento de la salud del suelo y la mitigación de los impactos del cambio climático refuerza su importancia como una solución integral frente a los desafíos de la agricultura moderna.

No obstante, la implementación masiva de biofertilizantes enfrenta barreras significativas que requieren atención inmediata. Las dificultades técnicas asociadas a su producción y almacenamiento, junto con la falta de infraestructura adecuada, limitan su viabilidad en muchas regiones, particularmente en países en desarrollo. A esto se suma la ausencia de incentivos económicos y marcos regulatorios que promuevan su adopción, lo que perpetúa el predominio de fertilizantes químicos convencionales, pese a sus impactos negativos en los ecosistemas.

Un aspecto fundamental para el éxito de los biofertilizantes es la capacitación de los agricultores. La implementación efectiva de estas tecnologías biológicas depende en gran medida del conocimiento técnico de los usuarios finales. Sin programas robustos de extensión agrícola y estrategias de sensibilización, es poco probable que los agricultores adopten prácticas innovadoras que desafíen los métodos tradicionales. Por lo tanto, es crucial desarrollar iniciativas educativas y de transferencia de tecnología que brinden a los agricultores las herramientas necesarias para aprovechar al máximo los biofertilizantes.

La superación de estos retos demanda un enfoque interdisciplinario y multisectorial. Los gobiernos, las instituciones de investigación y el sector privado deben colaborar para impulsar la innovación tecnológica, mejorar la accesibilidad de los biofertilizantes y garantizar que los agricultores reciban el apoyo necesario para integrarlos en sus prácticas agrícolas. Esto incluye la creación de cadenas de suministro eficientes, la implementación de incentivos financieros y la promoción de políticas públicas orientadas a la sostenibilidad agrícola.

A pesar de las limitaciones actuales, el potencial de los biofertilizantes para transformar la agricultura es indiscutible. Su uso no solo tiene el potencial de aumentar la productividad agrícola, sino también de regenerar ecosistemas degradados, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Estas cualidades los posicionan como una solución integral que responde tanto a las necesidades inmediatas de producción de alimentos como a las exigencias de sostenibilidad a largo plazo.

En última instancia, el éxito de los biofertilizantes radica en su capacidad para equilibrar la productividad agrícola con la conservación de los recursos naturales. Este equilibrio es esencial no solo para garantizar la seguridad alimentaria global, sino también para preservar los ecosistemas y recursos vitales para las generaciones futuras. La adopción de los biofertilizantes, aunque compleja, representa un paso decisivo hacia la construcción de un sistema alimentario más equitativo, resiliente y sostenible, capaz de enfrentar los retos del siglo XXI con innovación y responsabilidad ambiental.

Referencias Bibliográficas

- Alfonso, E., Leyva, A., & Hernández, A. (2005). Microorganismos benéficos como biofertilizantes eficientes para el cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill). *Revista Colombiana de Biotecnología*, 2(2), 47-54.
- Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 8, 971. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), 1327–1350. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>
- Burgos-Macias, T. J., & Gaibor-Fernández, R. R. (2023). Dinámica poblacional de *Spodoptera frugiperda*, *Diatraea saccharalis* y *Dalbulus maidis* en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) durante la época seca en cinco localidades del cantón Mocache. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.62>
- Caicedo-Aldaz, J. C., & Herrera-Sánchez, D. J. (2022). El Rol de la Agroecología en el Desarrollo Rural Sostenible en Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 1(2), 1-16. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n2/24>
- Choudhary, D. K., Sharma, K. P., & Gaur, R. K. (2021). Biotechnological interventions for improving the production and efficiency of biofertilizers. *Sustainable Agriculture Reviews*, 51, 135–162.
- De los Santos-Villalobos, S., Parra, J. R., Herrera, J. M., Valenzuela, A. I., & Estrada, M. H. (2018). Estudio bibliométrico sobre biofertilizantes en México durante el periodo 2000-2016. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1), 105-118. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1449>
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2014). Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. *Advances in Agronomy*, 128, 13–65. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0)

- FAO. (2020). The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>
- González-Marcillo, R. L., Guamán-Rivera, S. A., Guerrero-Pincay, A. E., & Ortiz-Naveda, N. R. (2023). Pastos Tropicales de la Amazonia Ecuatoriana Tomo I: Avances científicos sobre sistemas silvopastoriles como estrategia de reconversión de la ganadería. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.46>
- Grageda-Cabrera, O. A., Díaz-Franco, A., Peña-Cabriales, J. J., & Vera-Nuñez, J. A. (2012). Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(7), 1261-1274.
- Guamán-Rivera, S. A. (2022). Desarrollo de Políticas Agrarias y su Influencia en los Pequeños Agricultores Ecuatorianos. *Revista Científica Zambos*, 1(3), 15-28. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n3/30>
- Ibarra-Navarrete, Y. S., & Pinargote-Mendoza, E. R. (2023). Ácido oxálico, alternativa orgánica para el control de varroasis (*Varroa destructor*) en abejas (*Apis mellifera*). Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.63>
- Kumar, S., Reddy, M. S., & Anand, K. (2021). Biofertilizers: Present Status and Future Prospects. *Sustainable Agriculture Reviews*, 43, 263–290.
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
- Macías-Véliz, J. N., & Chicharro-López, F. I. (2023). Procesos de producción de tilapias (*Oreochromis niloticus*) con aplicación informática. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.64>
- Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P. N., Das, B., Ghosh, A., & Tribedi, P. (2017). Biofertilizers: A potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4), 3315–3335. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8104-0>
- Martínez, B. E., & Dibut, B. (2012). Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(2), 121-130. <https://doi.org/10.21789/22561498.1771>
- Meena, R. S., Kumar, S., Datta, R., & Lal, R. (2020). Impact of biofertilizers on agricultural productivity and sustainability. *Environmental Sustainability*, 3(1), 109–127.
- Mitter, B., Brader, G., Pfaffenbichler, N., Sessitsch, A., & Compant, S. (2021). Harnessing beneficial plant-microbe interactions for improving plant health. *Frontiers in Plant Science*, 12, 784.
- Ramos-Acuña, H. E., Palomino-Pastrana, P. A., Yaulilahua-Huacho, R., Zela-Payí, N. O., Sumarriva-Bustinza, L. A., Porrás-Roque, M. S., & Camposano-Córdova, A. I. (2023). Transformando la Ganadería: Evaluación de las Explotaciones de Vacunos. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.31>

Rojas, F. E., & Saavedra-Mera, K. A. . (2022). Diversificación de Cultivos y su Impacto Económico en las Fincas Ecuatorianas. *Revista Científica Zambos*, 1(1), 51-68. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n1/21>

Sharma, S., Kaushal, R., & Kumar, N. (2019). Adoption of biofertilizers: Challenges and future strategies. *Journal of Agricultural Sciences*, 15(3), 89–97.

Viteri-Robayo, C. P., Mallitasig-Endara, F. V. ., Tapia-Barahona, S. A., Robayo-Zurita, V. A., Lozada-Tobar, L. A., Cruz-Hidalgo, P. A., Camacho-Aldaz, M. P., Hidalgo-Morales, K. P., Fiallos-Altamirano, F. F., Ortiz-Gavilanes, J. I., Gutiérrez-Lozada, A. E., Cabrera-Beltran, L. J., Iza-Iza, S. P., Arteaga-Almeida, C. A., Bustillos-Ortiz, A. A., Bustillos-Ortiz, D. I. ., Pomboza-Tamaquiza, P. P., Ulcuango-Ulcuango, K. del C., Moreno-Mejía, C. R., Guanga-Lara, V. E., & Galarza-Esparza, W. B. (2023) *Antropología Alimentaria*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.39>

Zelaya Molina, C. I., Cruz Cárdenas, E., Rojas Anaya, S., & Ruíz Ramírez, S. (2020). Consideraciones sobre el uso de biofertilizantes como alternativa agroecológica en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1423-1436. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2492>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.