

De la fertilización al uso de biofertilizantes con mirada ecológica, un cambio de paradigma necesario

From fertilization to the use of biofertilizers with an ecological perspective: a necessary paradigm change

 Luis Gómez-Jorrín * and  Sol Santander-Mendoza

Instituto de Suelos, Boyeros, La Habana, Cuba. E-mail: sol.santander@isuelos.cu

* Autor para correspondencia: Luis Gómez-Jorrín, e-mail: gomezjo@isuelos.cu

RESUMEN: La transición desde los fertilizantes químicos hacia los biofertilizantes, como parte de un manejo integrado de la nutrición vegetal, exige un cambio de paradigma en la agricultura. La Revolución Verde impulsó un enfoque industrializado de la fertilización, centrado en el rendimiento, pero con graves impactos ambientales: contaminación, degradación del suelo y pérdida de biodiversidad. Frente a esto, surge el manejo integrado de nutrientes, que combina fertilizantes minerales, orgánicos y biofertilizantes para optimizar la eficiencia y minimizar daños ecológicos. Los biofertilizantes, formulados con microorganismos beneficiosos, mejoran la absorción de nutrientes, protegen los cultivos y fortalecen la salud del suelo. En Cuba, su adopción -ejemplificada con productos como BIOFER®, AZOFERT® y FOSFORINA®- ha reducido la dependencia de insumos externos. No obstante, estos no sustituyen por completo a los fertilizantes minerales, sino que los complementan, especialmente en sistemas agroecológicos. Para una transición exitosa, es clave entender el suelo como un sistema vivo, considerar ciclos de nutrientes e interacciones microbianas, e integrar conocimientos técnicos y locales. Además, se requiere evaluar rigurosamente los biofertilizantes en diversos contextos, asegurando así sistemas agrícolas sostenibles y resilientes.

Palabras clave: manejo integrado, transición agroecológica, sostenibilidad, salud del suelo.

ABSTRACT: The transition from chemical fertilizers to biofertilizers, as part of integrated plant nutrition management, requires a paradigm change in agriculture. The Green Revolution promoted an industrialized approach to fertilization, focused on yield, but with serious environmental impacts: pollution, soil degradation, and biodiversity loss. In response, integrated nutrient management (INM) has emerged, combining mineral, organic, and biofertilizers to optimize efficiency and minimize ecological damage. Biofertilizers, formulated with beneficial microorganisms, improve nutrient absorption, protect crops, and strengthen soil health. In Cuba, their adoption-exemplified by products such as BIOFER®, AZOFERT®, and FOSFORINA®-has reduced dependence on external inputs. However, they do not completely replace mineral fertilizers, but rather complement them, especially in agroecological systems. For a successful transition, it is key to understand the soil as a living system, consider nutrient cycles and microbial interactions, and integrate technical and local knowledge. Furthermore, biofertilizers need to be rigorously evaluated in diverse contexts, thus ensuring sustainable and resilient agricultural systems.

Keywords: Integrated Management, Agroecological Transition, Sustainability, Soil Health.

INTRODUCCIÓN

La fertilización bajo la Revolución Verde

La Revolución Verde constituyó un proceso de modernización de la agricultura, donde el conocimiento tecnológico suplantó al conocimiento determinado por la experiencia práctica del agricultor (Cecon, 2008). De acuerdo a (Molina, 2021) la fertilización constituyó el tercer “elemento tecnológico” de la agricultura industrial, junto a la mecanización y la selección y producción de semillas,

los cuales permitieron lograr altos rendimientos en suelos con baja o muy baja fertilidad.

Según (Dagognet, 1973) la práctica agrícola bajo la Revolución Verde desarrolló un esquema de fertilización centrado en la planta, con el aporte de sólo aquellos elementos químicos considerados necesarios para aumentar el rendimiento (“forzamiento”). Así, se obtuvieron cosechas sin devolver nada al suelo, calificado como un simple soporte del crecimiento vegetal, que podía incluso, ser sustituido (Bourguignon & Bourguignon, 2015).

Recibido: 15/02/2025

Aceptado: 08/09/2025

Conflictos de intereses: Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Contribuciones de autor: **Conceptualización:** L.A. Gómez-Jorrín y S. Santander-Mendoza. **Curación de datos:** S. Santander-Mendoza.

Análisis formal: L.A. Gómez-Jorrín. **Investigation:** L.A. Gómez-Jorrín y S. Santander-Mendoza. **Metodología:** L.A. Gómez-Jorrín.

Supervisión: L.A. Gómez-Jorrín y S. Santander-Mendoza. **Validation:** L.A. Gómez-Jorrín y S. Santander-Mendoza. **Redacción-borrador original:** L.A. Gómez-Jorrín y S. Santander-Mendoza. **Redacción-revisión y edición:** S Santander-Mendoza y L.A. Gómez-Jorrín.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



No obstante, esta concepción tecnológica sólo fue posible gracias al aumento masivo del consumo y la producción de fertilizantes de síntesis química, el cual pasó de 4 millones de toneladas (N, P₂O₅ y K₂O) al finalizar la II Guerra Mundial a 17 millones de toneladas en 1950 y 130 millones de toneladas a finales de los años 80 (Mazoyer & Roudart, 2002) con un alto costo energético.

Este uso extensivo y desequilibrado de los fertilizantes de origen mineral para incrementar la producción generó diversos efectos negativos, tales como: la contaminación de agua, aire y suelo (Rahman y Zhang, 2018), la eutrofización, el efecto invernadero (Goenadi et al., 2018, Liu et al., 2014; Youssef & Eissa, 2014) y la acumulación tóxica de metales pesados (Atafar et al., 2010). Por su parte, (Aktar et al., 2009) señalan que el uso prolongado de fertilizantes puede afectar la estructura del suelo y conducir a la disminución de contenido de nutrientes, incrementando, además, la susceptibilidad de los cultivos a diversas enfermedades.

Por ello, se han desarrollado propuestas conducentes a un uso más racional de los fertilizantes de origen mineral, mediante el incremento de la eficiencia de uso de nutrientes (EUN), definido mediante varios conceptos (Liu et al., 2014), siendo los más empleados: i) el “Factor Parcial de Productividad (rendimiento obtenido por unidad de fertilizante aplicado) y ii)“Balance Parcial de nutrientes” (Nutrientes tomados del sistema en relación a la cantidad aplicada) (Kumar & Baweja, 2024), este último indicador es más robusto cuando se apoya con la información del estado del suelo y el manejo integrado de la nutrición vegetal, el cual propone el uso de diferentes fuentes, tales como residuos de cosecha, fertilizantes orgánicos (dando preferencia a los componentes locales) y biofertilizantes

basados en inoculantes microbianos de manera conjunta a los fertilizantes de origen mineral; considerando su balance, interacciones y la sincronía con la demanda de nutrientes por parte del cultivo (Aulakh & Malhi, 2004; Darjee et al., 2023; Kumar & Baweja, 2024). Las estrategias de manejo integrado de la nutrición propician también la innovación constante y el intercambio de conocimientos entre productores, técnicos, decisores e investigadores (Srivastava & Ngullie, 2009).

El siguiente trabajo tiene como objetivo señalar algunas características particulares de los biofertilizantes y las consecuencias de éstas en su integración en las tecnologías de producción.

DESARROLLO DEL TEMA

Los biofertilizantes como alternativa en el marco del manejo integrado de la nutrición vegetal

Los biofertilizantes se definen como sustancias que contienen organismos vivos con propiedades beneficiosas para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Mącik et al., 2020). De acuerdo a (Sanjuán et al., 2023) se diferencian de otro tipo de bioproductos por participar en la provisión de nutrientes a las plantas.

Estos microorganismos utilizan mecanismos diversos para mejorar la absorción de nutrientes, mejorar la fertilidad del suelo y aumentar el rendimiento de los cultivos, tales como la fijación de nitrógeno, la solubilización de potasio y fósforo y la excreción de fitohormonas y otros metabolitos, sustancias que suprimen los fitopatógenos, protegen a las plantas del estrés abiótico y biótico y promueven la desintoxicación de contaminantes (Chakraborty & Akhtar, 2021; Kumar & Baweja, 2024; Mukherjee et al., 2023).

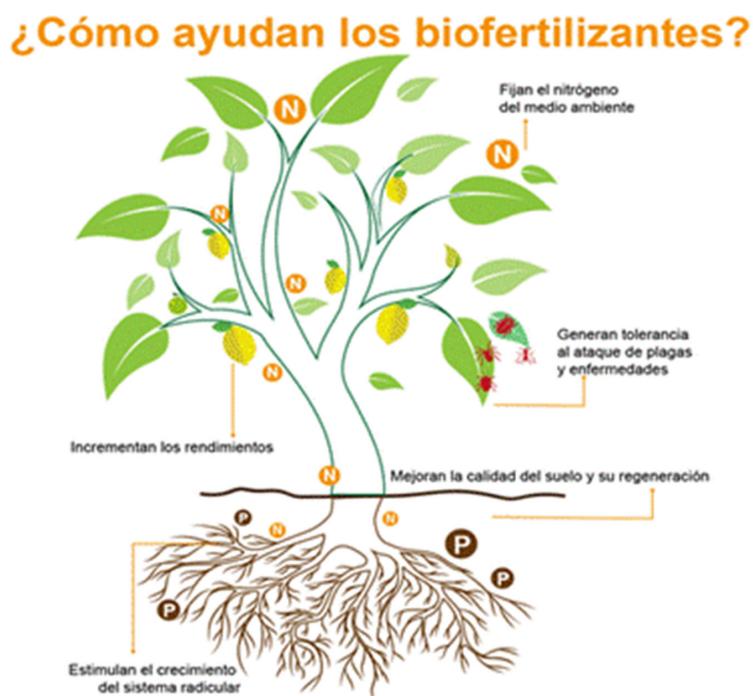


Figura 1. Beneficios del uso de biofertilizantes. Según (Gliessman, 2000; Gliessman et al., 2007)

(Gómez et al., 2016) señalan entre las ventajas del uso de biofertilizantes su capacidad para suplementar o movilizar nutrientes con un mínimo de recursos no renovables, la generación de procesos microbianos rápidos, las pequeñas dosis aplicadas y la capacidad de solucionar problemas locales específicos.

(Machín Sosa et al., 2010) y (Rosset et al., 2011) identifican a Cuba como el país latinoamericano que adoptó los paquetes tecnológicos de la Revolución Verde con mayor intensidad, lo que conllevó a los efectos ambientales ya mencionados anteriormente. Por otra parte, la crisis causada por el colapso de bloque socialista en 1989 - 1990 (el denominado “Período Especial”) y los efectos del bloqueo de Estados Unidos, provocaron la búsqueda de alternativas para mantener la producción de alimentos en el país.

En este sentido, Cuba incluyó en 1991 la producción de biofertilizantes o inoculantes microbianos como programa estratégico, lo cual ha contribuido no sólo a la sustitución de fertilizantes de origen mineral importados, sino también a producir alimentos más sanos para la población y proteger el medio ambiente (Gómez et al., 2016).

Como resultado de ello, en la actualidad el “Programa de Bioproductos de Uso Agrícola en Cuba” reconoce como biofertilizantes basados en inoculación microbiana los siguientes productos, incluidos en el balance del Ministerio de la Agricultura:

No obstante, si bien los biofertilizantes constituyen una importante alternativa en la nutrición vegetal y un elemento fundamental dentro de un esquema de manejo integrado de la misma (Bloemberg et al., 2000), resulta indispensable destacar dos elementos al respecto: i) sólo los inoculantes fijadores de nitrógeno *sustituyen un porcentaje variable* de la necesidad nutricional de la planta mediante el proceso de fijación biológica del nitrógeno (FBN) y, ii) el resto de los inoculantes (solubilizadores de fósforo y potasio, micorrizas) *incrementan* la eficiencia de uso de estos macronutrientes, mediante el aprovechamiento de sus formas insolubles *ya existentes* en el suelo; característica asociada a la condición de éste y a una posible fertilización mineral previa (fertilización residual), por lo que no pueden, *en ningún sentido sustituir a los fertilizantes de origen mineral por completo* (Okon & Labandera-Gonzalez, 1994; Vessey, 2003).

Considerando estos aspectos, los biofertilizantes han sido adoptados exitosamente en diversos sistemas de producción a nivel mundial como alternativa de manejo de la nutrición vegetal (Sansinenea, 2021), mostrando un crecimiento del 10 - 13% de su mercado mundial en los últimos años, estimado en USD 6,34 billones en 2032 (Joshi & Gauraha, 2022). Este incremento está asociado además a la búsqueda de opciones favorecidas por los consumidores, aquellas que promueven una mayor sostenibilidad y alimentos más saludables.

Tabla 1. Biofertilizantes desarrollados y empleados en Cuba

Producto	Principio activo y uso	Sustitución de nutrientes	Institución responsable
BIOFER®	Bacteria del género <i>Rhizobium</i> , para inocular leguminosas de grano.	Sustituye entre el 30% y el 50% de la fertilización nitrogenada.	Instituto de Suelos (IS)
AZOFERT®	Bacterias del género <i>Bradyrhizobium</i> , para inocular leguminosas de grano, forrajeras y de pasto.	Sustituye entre el 30% y el 50% de la fertilización nitrogenada.	Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA)
NITROFIX®	Bacterias del género <i>Azospirillum</i> para la inoculación líquida de caña de azúcar y otras gramíneas.	Sustituye entre el 50% y 70% de la fertilización nitrogenada y estimula el desarrollo vegetal.	Instituto Cubano de Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)
FOSFORINA®	Bacteria <i>Pseudomonas fluorescens</i> . Se emplea en una amplia gama de cultivos.	Sustituye entre el 15% y 30% de la fertilización fosfórica, estimula el crecimiento y confiere protección contra patógenos.	Instituto de Suelos (IS)
DIMARGON®	Bacteria <i>Azotobacter</i> . Se emplea en una amplia variedad de cultivos.	Estimula el crecimiento vegetal y sustituye hasta un 35% del fertilizante nitrogenado.	Instituto de Investigaciones Fundamentales de la Agricultura Tropical Alejandro de Humboldt (INIFAT)
EcoMic®	Cepas de hongos micorrizógenos. Se emplea en una amplia variedad de cultivos.	Sustituye dosis de N, P y K hasta un 30% y confiere resistencia a estrés y ataque de patógenos.	Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA)

Tomado de: (Gómez et al., 2016 pp. 144).

Biofertilización en la transición agroecológica

Según (Pimentel & Pimentel, 2007) la transición agroecológica se define como el proceso de transformación de los sistemas convencionales de producción hacia el manejo agroecológico. Dicho proceso no sólo comprende elementos técnicos, productivos y ecológicos, sino también aspectos socioculturales y económicos del entorno del agricultor, su familia y su comunidad, por lo que la transición agroecológica debe entenderse como un proceso de cambio multilineal que ocurre a través del tiempo (Conway, 1987).

En este sentido, (Glissman, 2002) plantea tres etapas en la transición agroecológica: i) la reducción de insumos, ii) la sustitución de dichos insumos y, iii) el logro de sistemas auto regulables a través de la recuperación de las funciones ecosistémicas mediante su re-diseño (Figura 2). Por su parte, (Altieri & Nicholls, 2007), destacan que la diversificación de los sistemas (incremento de la biodiversidad) y el manejo de los suelos constituyen los pilares de los procesos de transición, y actúan de manera sinérgica en la salud de los agroecosistemas.

Bajo esta concepción, el uso de biofertilizantes constituye una acción asociada a la etapa 2 de la transición y requiere, además, abandonar la idea del suelo como

sustrato inerte, promovida por la Revolución Verde, por la consideración del suelo como un organismo, un componente del agroecosistema complejo, viviente y dinámico (Glissman, 2000; Glissman et al., 2007).

Este cambio de visión, del suelo sustrato al suelo vivo, debe traer como consecuencia una transformación del paradigma de la fertilización como práctica. Según (Molina, 2021), la Revolución Verde trasladó a la agricultura modelos análogos a la producción industrial con dinámicas lineales, donde mayores insumos generan mayor producción. Asumir la transición agroecológica, significa entonces, repensar el uso de biofertilizantes abandonando estas lógicas propias de la fertilización con insumos de origen mineral; considerando, sobre todo, su carácter de inoculante vivo que es incorporado en un medio también vivo.

La biofertilización implica la introducción de un (o unos) organismo (s) en un medio físico con condiciones extremadamente hostiles (el suelo), donde se establecen relaciones ecológicas complejas: simbiosis, competencia, depredación (Erktan et al., 2020). Así, este proceso resulta entonces muy diferente a la aplicación de un elemento químico inerte en “dosis” previamente establecidas para “compensar” deficiencias. Se trata de pasar de un pensamiento lineal a uno complejo.



Figura 2. Etapas de la transición agroecológica. Según (Glissman, 2000; Glissman et al., 2007).

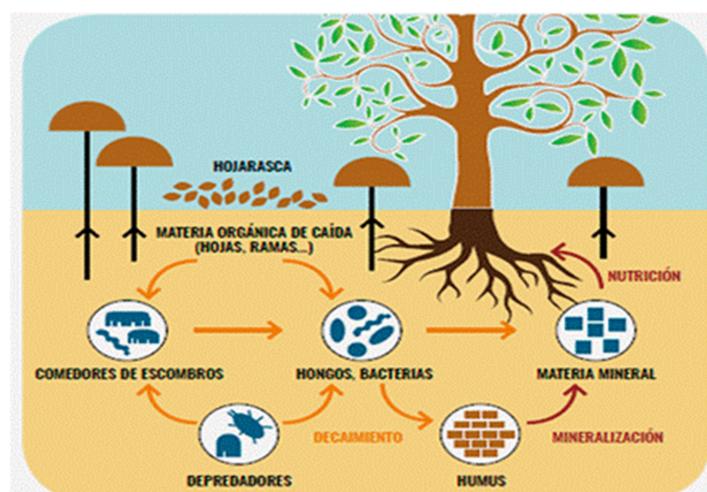


Figura 3. El suelo como sistema vivo. Tomado de: <https://www.az3oeno.com/pensadero-vinos/tu-vinedo/agroenologia/suelo-vivo>

Por otra parte, la aplicación de biofertilizantes no influencia únicamente las propiedades fisicoquímicas del suelo, sino que afecta su biodiversidad, la estructura de la comunidad microbiana nativa y su funcionabilidad (Castro-Sowinski et al., 2007; Javoreková et al., 2015). (Castro-Sowinski et al., 2007) señalan que estos efectos varían significativamente de una población nativa a otra, con ciertas poblaciones microbianas que pueden aumentar y otras disminuir, e incluso, en algunos casos, no provocar variaciones.

Aspectos ecológicos fundamentales a considerar

El paradigma agroecológico implica la imitación y adaptación de los procesos naturales en los sistemas de producción, lo que requiere la comparación entre ambos tipos de sistema y la comprensión de sus diferencias.

En un ecosistema natural, la energía y la materia fluyen como resultado de un conjunto complejo de interacciones tróficas, con ciertas cantidades disipadas en diferentes puntos y momentos a lo largo de la cadena alimenticia, y con la cantidad más grande de energía moviéndose finalmente por la ruta de los desechos (Glissman et al., 2007; Glissman, 2002; E. P. Odum & Barrett, 1971; H. T. Odum, 1996). La producción anual del sistema se puede calcular en términos de productividad primaria neta o biomasa, con el correspondiente balance de energía.

Según (Pimentel & Pimentel, 2007) en los agroecosistemas, si bien, la radiación solar continúa siendo la mayor fuente de energía, se introducen también numerosos insumos de origen externos (frecuentemente no sostenibles). La cosecha, por su parte, constituye el principal desequilibrio en este balance, representando una importante extracción de biomasa y, por tanto, de nutrientes (Conway, 1987; Glissman, 2002).

Por otra parte, en un ecosistema natural, los nutrientes ingresan continuamente en pequeñas cantidades y circulan mediante una compleja serie de ciclos interconectados, formando parte de la biomasa viva o la materia orgánica del suelo (Likens & Bormann, 1974). En este proceso, los componentes biológicos resultan fundamentales en el movimiento eficiente de estos nutrientes, asegurando una pérdida mínima. En cambio, en los agroecosistemas, el reciclaje de nutrientes puede ser mínimo, o incluso nulo, perdiéndose cantidades considerables con la cosecha o como resultado de percolación o erosión (Tivy, 2014), haciéndose entonces necesaria su restitución. En este sentido, se debe considerar además que el manejo inadecuado del suelo suele modificar sus condiciones físicas (compactación y pérdida de estructura) y químicas, y promovido una “esterilización” del suelo, reduciendo a su componente viviente a la mínima expresión (Primavesi, 2002).

En el caso particular de Cuba, debido a las dificultades económicas del “período especial”, se “protegió” aproximadamente entre el 25-30% del área agrícola con fertilizantes de origen mineral; porcentaje que se

ha reducido principalmente a aplicaciones puntuales en siembras de papa y tabaco en los últimos cinco años. De esta manera, si consideramos el balance de materia y nutrientes en los agroecosistemas cubanos en la actualidad, vemos como *la gran mayoría de las producciones se están realizando a partir de la utilización de las reservas de nutrientes del suelo*, fenómeno que provoca sin duda, pérdida paulatina de la fertilidad y calidad de los mismos, y la consiguiente disminución de los rendimientos agrícolas.

En este sentido, (Lal et al., 1989) reconocen que el período en el que ocurre la pérdida de la fertilidad de los suelos, afectados por diversos tipos de degradación, varía en función de las condiciones previas del suelo, encontrándose en un rango entre los 50 años en suelos con elevada profundidad efectiva y fertilidad previas; a los 5 a 10 años en suelos con baja fertilidad inicial. No obstante, (Lal et al., 1989) destacan la posibilidad de que la degradación del suelo alcance un “punto de no retorno”, o “límite crítico”, donde las condiciones de las propiedades del suelo no pueden soportar una actividad agrícola económicamente viable y su recuperación resulta muy difícil.

Construir un nuevo paradigma

En este contexto, adquiere creciente importancia asumir el manejo integrado de la nutrición a través de las medidas que permitan mitigar el efecto de la extracción de nutrientes y optimicen la actuación de los biofertilizantes, como un componente fundamental de este esquema de trabajo. Ello implica la incorporación de residuos de cosecha, el uso de abonos verdes, la aplicación de abonos orgánicos y dosis ajustadas de fertilizantes de origen mineral que permitan garantizar una actuación más eficiente de los microorganismos inoculados; a través de la restitución de las interacciones tróficas esenciales que se requieren para mantener las funciones del agroecosistema.

Esto requiere asumir una mirada sistémica, con la distinción (pero no aislamiento) de sus elementos, sus interrelaciones y sus propiedades emergentes. Entender cómo funciona cada uno de estos componentes (suelo - agua - planta - microorganismos, entre otros) en sí mismos y en su interrelación, para poder potenciar el empleo de los recursos locales, hacer más eficiente el funcionamiento del sistema, optimizar la productividad, minimizar los riesgos y garantizar su estabilidad y resiliencia.

En este sentido, reviste especial interés el uso de inoculantes microbianos como alternativa a la fertilización de origen mineral en relación con su efecto sobre la compleja red de microorganismos ya existentes en el suelo. En una relación de doble sentido, los inoculantes pueden afectar la composición, estructura y funcionalidad de la comunidad microbiana nativa y ésta a su vez, incidir sobre la eficiencia de la acción del inoculante a través de mecanismos tales como: competencia, antagonismo, sinergismo y cambios en la composición de los exudados radicales (Ambrosini et al., 2016).

Por ello, se hace necesario una comprensión mucho más precisa de los mecanismos de acción y aspectos ecológicos de los organismos empleados como inoculantes, de manera individual o como consorcios, así como una evaluación de campo más extensa y rigurosa de los nuevos productos, que incluya diversidad de tipos de suelos, especies de plantas, variedades de cultivo y condiciones ambientales (O'Callaghan et al., 2022).

Altieri 1991 refiere el marcado interés en el desarrollo de estrategias de manejo de suelo basadas en la autorregulación del ecosistema, que desplazan progresivamente la dependencia de insumos artificiales como fertilizantes y pesticidas. Según (Altieri, 1991; Bardgett & McAlister, 1999; Wardle et al., 1995; Yeates et al., 1997), la manipulación de la biota del suelo, estimulando los procesos claves del mismo, tales como la descomposición de la materia orgánica y la mineralización de los nutrientes, y su autorregulación constituyen requisitos fundamentales para la gestión de este tipo de sistema.

Por otra parte, este proceso de transición agroecológica debe también incorporar al conocimiento como uno de sus mayores y más valiosos insumos. De esta manera, el manejo productivo debe realizarse considerando y valorando las características del propio sistema, los recursos presentes en él y los conocimientos del productor (Sarandón, 2021). Frente a la uniformidad como característica preponderante del paisaje agrícola bajo la Revolución Verde, se requiere avanzar hacia sistemas que contemplen la heterogeneidad de sus componentes y de la agrobiodiversidad en particular (Martín-López et al., 2007), privilegiando una visión holística, no reduccionista, que se adapte a cada situación productiva en su complejidad, abandonando la búsqueda de “soluciones” únicas.

CONCLUSIONES

- Los biofertilizantes constituyen un componente fundamental del manejo integrado de la nutrición vegetal e un insumo prioritario en la etapa de sustitución de insumos (de origen mineral a biológico) en la transición agroecológica, mejorando la absorción de nutrientes y protegiendo a las distintas fuentes de estrés biótico y abiótico.
- Cuba posee una experiencia consolidada en el desarrollo y aplicación de biofertilizantes. No obstante, este trabajo destaca la necesidad de diferenciar la lógica de utilización de los biofertilizantes (un inoculante vivo) y los fertilizantes de origen mineral (un elemento inerte). Se señalan elementos tales como: i) el rol de los biofertilizantes en un esquema de manejo integrado de la nutrición, ii) su utilización en la transición agroecológica, iii) la consideración de los balances de materia, energía y ciclos de nutrientes y iv) la incorporación del conocimiento técnico y popular, como aspectos fundamentales para el aprovechamiento de los biofertilizantes como estrategia para la conservación y mejoramiento de la fertilidad de los suelos y el logro de la soberanía alimentaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aktar, M. W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 2(1), 1-12.
- Altieri, M. A. (1991). How best can we use biodiversity in agroecosystems? *Outlook on Agriculture*, 20(1), 15-23. <https://doi.org/10.1177/003072709102000105>
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2007). Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: Teoría, estrategias y evaluación. *Ecosistemas*, 16(1), 89-99.
- Ambrosini, A., de Souza, R., & Passaglia, L. M. (2016). Ecological role of bacterial inoculants and their potential impact on soil microbial diversity. *Plant and Soil*, 400(1), 193-207. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2727-7>
- Atafar, Z., Mesdaghinia, A., Nouri, J., Homae, M., Yunesian, M., Ahmadimoghaddam, M., & Mahvi, A. H. (2010). Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration. *Environmental Monitoring and Assessment*, 160(1), 83-89. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0659-x>
- Aulakh, M. S., & Malhi, S. S. (2004). Fertilizer nitrogen use efficiency as influenced by interactions with other nutrients. In J. R. Wilson (Ed.), *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment* (pp. 181-192). Scientific Publishers.
- Bardgett, R. D., & McAlister, E. (1999). The measurement of soil fungal: Bacterial biomass ratios as an indicator of ecosystem self-regulation in temperate meadow grasslands. *Biology and Fertility of Soils*, 29(3), 282-290. <https://doi.org/10.1007/s003740050554>
- Bloemberg, G. V., Wijfjes, A. H., Lamers, G. E., Stuurman, N., & Lugtenberg, B. J. (2000). Simultaneous imaging of *Pseudomonas fluorescens* WCS365 populations expressing three different autofluorescent proteins in the rhizosphere: New perspectives for studying microbial communities. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 13(11), 1170-1176.
- Bourguignon, C., & Bourguignon, L. (2015). *Le sol, la terre et les champs: Pour retrouver une agriculture saine. Sang de la terre*.
- Castro-Sowinski, S., Herschkovitz, Y., Okon, Y., & Jurkevitch, E. (2007). Effects of inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria on resident rhizosphere microorganisms. *FEMS Microbiology Letters*, 276(1), 1-11. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00878.x>
- Ceccon, E. (2008). La revolución verde: Tragedia en dos actos. *Ciencias*, 91, 4-14.
- Chakraborty, T., & Akhtar, N. (2021). Biofertilizers: Prospects and challenges for future. In D. P. Singh, H. B. Singh, & Prabha, R. (Eds.), *Biofertilizers: Study and impact* (pp. 575-590). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119724995.ch20>
- Conway, G. R. (1987). The properties of agroecosystems. *Agricultural Systems*, 24(2), 95-117.

- Dagognet, F. (1973). *Des révolutions vertes: Histoire et principes de l'agronomie*. [Editorial].
- Darjee, S., Shrivastava, M., Langyan, S., Singh, G., Pandey, R., Sharma, A., Khandelwal, A., & Singh, R. (2023). Integrated nutrient management reduced the nutrient losses and increased crop yield in irrigated wheat. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(8), 1298-1309. <https://doi.org/10.1080/0003990X.2023.223810>
- Erktan, A., Or, D., & Scheu, S. (2020). The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions. *Soil Biology and Biochemistry*, 148, 107876. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107876>
- Gliessman, S. R. (2000). *Agroecosystem sustainability: Developing practical strategies*. CRC Press.
- Gliessman, S. R., Rosado-May, F. J., Guadarrama-Zugasti, C., Jedlicka, J., Cohn, A., Méndez, V. E., Cohen, R., Trujillo, L., Bacon, C., & Jaffe, R. (2007). Agroecología: Promoviendo una transición hacia la sostenibilidad. *Ecosistemas*, 16(1), 13-23.
- Glissman, S. (2002). *Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sustentable*. CATIE.
- Goenadi, D. H., Mustafa, A., & Santi, L. (2018). Bio-organo-chemical fertilizers: A new prospecting technology for improving fertilizer use efficiency (FUE). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 183(1), 012011. <http://doi:10.1088/1755-1315/183/1/012011>
- Gómez, L., Martínez-Viera, R., Funes-Aguilar, F., & Vázquez, L. (2016). Inoculantes microbianos y estimulantes. In F. Funes & L. L. Vázquez (Eds.), *Avances de la Agroecología en Cuba* (pp. 141-153). Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey.
- Javoreková, S., Maková, J., Medo, J., Kováčsová, S., Charousová, I., & Horák, J. (2015). Effect of bio-fertilizers application on microbial diversity and physiological profiling of microorganisms in arable soil. *Eurasian Journal of Soil Science*, 4(1), 54-61. <https://doi.org/10.18393/ejss.07093>
- Joshi, S. K., & Gauraha, A. K. (2022). Global biofertilizer market: Emerging trends and opportunities. In D. P. Singh, H. B. Singh, & Prabha, R. (Eds.), *Trends of applied microbiology for sustainable economy* (pp. 689-697). [Publisher].
- Kumar, G., & Baweja, P. (2024). Biofertilizer: A tool for sustainable agriculture in changing environment. *Bioengineering Research*, 1(1), 1-10.
- Lal, R., Hall, G., & Miller, F. (1989). Soil degradation: I. Basic processes. *Land Degradation & Development*, 1(1), 51-69.
- Likens, G. E., & Bormann, F. H. (1974). Linkages between terrestrial and aquatic ecosystems. *BioScience*, 24(8), 447-456. <https://doi.org/10.2307/1296852>
- Liu, J., Shen, J., Li, Y., Su, Y., Ge, T., Jones, D. L., & Wu, J. (2014). Effects of biochar amendment on the net greenhouse gas emission and greenhouse gas intensity in a Chinese double rice cropping system. *European Journal of Soil Biology*, 65, 30-39.
- Machín Sosa, B., Jaime, R., María, A., Lozano, Á., & Rocío, D. (2010). Revolución agroecológica el movimiento de campesino a campesino de la ANAP en Cuba. [Editorial/Source].
- Maćik, M., Gryta, A., & Frąc, M. (2020). Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. *Advances in Agronomy*, 162, 31-87. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.001>
- Martín-López, B., González, J. A., Díaz, S., Castro, I., & García-Llorente, M. (2007). Biodiversidad y bienestar humano: El papel de la diversidad funcional. *Ecosistemas*, 16(3), 69-80.
- Mazoyer, M., & Roudart, L. (2002). *Mondialisation, crise et conditions de développement durable des agricultures paysannes*. ULB--Université Libre de Bruxelles.
- Molina, J. E. (2021). La revolución verde como revolución tecnocientífica: Artificialización de las prácticas agrícolas y sus implicaciones. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, 21(42), 175-204. <https://doi.org/10.18270/rccfc.v21i42.3477>
- Mukherjee, B., Goswami, S., Pal, P., Mandal, T. K., Bhattacharya, U., Naskar, M. K., & Dutta, S. (2023). Improving crop nutrition through ecofriendly biofertilizers: Concept, types and benefits in agriculture. [Editorial].
- O'Callaghan, M., Ballard, R. A., & Wright, D. (2022). Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: Limitations and opportunities. *Soil Use and Management*, 38(3), 1340-1369. <https://doi.org/10.1111/sum.1281>
- Odum, E. P., & Barrett, G. W. (1971). *Fundamentals of ecology*. Saunders Philadelphia.
- Odum, H. T. (1996). Scales of ecological engineering. *Ecological Engineering*, 6(1-3), 7-19.
- Okon, Y., & Labandera-Gonzalez, C. A. (1994). Agronomic applications of Azospirillum: An evaluation of 20 years worldwide field inoculation. *Soil Biology and Biochemistry*, 26(12), 1591-1601.
- Pimentel, D., & Pimentel, M. H. (2007). *Food, energy, and society*. CRC Press.
- Primavesi, A. (2002). *Manejo ecológico do solo: A agricultura em regiões tropicais*. NBL Editora.
- Rahman, K. and Zhang, D. (2018) Effects of Fertilizer Broadcasting on the Excessive Use of Inorganic Fertilizers and Environmental Sustainability. *Sustainability*, 10, Article 759. - References - Scientific Research Publishing <https://share.google/z1kMfhmECgJTLsLhF>
- Rosset, P. M., Machín Sosa, B., Roque Jaime, A. M., & Ávila Lozano, D. R. (2011). The Campesino-to-Campesino agroecology movement of ANAP in Cuba: Social process methodology in the construction of sustainable peasant agriculture and food sovereignty.

- The Journal of Peasant Studies, 38(1), 161-191.
<https://doi:10.1080/03066150.2010.538584>
- Sanjuán, J., Nápoles, M. C., Pérez-Mendoza, D., Lorite, M. J., & Rodríguez-Navarro, D. N. (2023). Microbials for agriculture: Why do they call them biostimulants when they mean probiotics? *Microorganisms*, 11(1), 153. <https://doi: 10.3390/microorganisms11010153>
- Sansinenea, E. (2021). Application of biofertilizers: Current worldwide status. *Biofertilizers*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821667-5.00004-X>.
- Sarandón, S. J. (2021). Agroecología: Una revolución del pensamiento en las ciencias agrarias. *Ciencia, tecnología y política*. <https://doi.org/10.24215/26183188e055>
- Srivastava, A., & Ngullie, E. (2009). Integrated nutrient management: Theory and practice. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*, 3(1), 1-30.
- Tivy, J. (2014). *Agricultural ecology*. Routledge.
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255(2), 571-586. <https://doi.org/10.1023/A:1026037216893>
- Wardle, D., Yeates, G., Watson, R., & Nicholson, K. (1995). The detritus food-web and the diversity of soil fauna as indicators of disturbance regimes in agro-ecosystems. *Plant and Soil*, 170(1), 35-43. <https://doi.org/10.1007/BF02183053>
- Yeates, G., Tate, K., & Newton, P. (1997). Response of the fauna of a grassland soil to doubling of atmospheric carbon dioxide concentration. *Biology and Fertility of Soils*, 25(3), 307-315. <https://doi.org/10.1007/s003740050320>
- Youssef, M., & Eissa, M. (2014). Biofertilizers and their role in management of plant parasitic nematodes. A review. *Journal of Biotechnology and Pharmaceutical Research*, 5(1), 1-6.