

Microorganismos del suelo y sus usos potenciales en la agricultura frente al escenario del cambio climático

Soil microorganisms and their potential uses in agriculture in the face of climate change scenario

Lissy Rosabal Ayan  Paulina Macías Coutiño  Magnolia Maza González 

Rogelio López Vázquez  Francisco Guevara Hernández* 

Acceso Abierto

*Correspondencia:

francisco.guevara@unach.mx
Facultad de Ciencias Agronómicas,
Universidad Autónoma de Chiapas,
Villaflora, Chiapas, México.

Recibido: 24-03-2021
Aceptado para publicación:
13-08-2021
Publicado en línea: 20-09-2021

Palabras clave:

Agroecosistemas;
biorremediación;
cambio climático;
consorcio microbiano;
microorganismos del suelo;
potencial biotecnológico;
sistema edáfico.

Key words:

Agroecosystems;
Bioremediation;
biotechnological potential;
climate change;
edaphic system;
microbial consortia;
soil microorganism.

Citación:

Rosabal Ayan L, Macías Coutiño P, Maza González M, López Vázquez R, Guevara Hernández F. Microorganismos del suelo y sus usos potenciales en la agricultura frente al escenario del cambio climático. Magna Scientia UCEVA 2021; 1: 104-17. <https://doi.org/10.54502/msuceva.v1n1a14>.

Resumen

El objetivo de la presente revisión es indagar sobre las interacciones biológicas de los microorganismos del suelo y su potencial biotecnológico en los sistemas agrícolas frente al panorama actual del cambio climático. En este sentido, se hace urgente la búsqueda de estrategias que permitan obtener sistemas productivos sostenibles y resilientes. En virtud de ello, el uso de microorganismos benéficos, constituye una estrategia para el desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles y reducir el impacto negativo de productos químicos y fertilizantes. Investigaciones sobre consorcios microbianos, han permitido estudiar los mecanismos que emplean los microorganismos para establecerse y permanecer en el sistema suelo. Los microorganismos del suelo no actúan de manera aislada, se dinamizan mediante múltiples interacciones, las cuales, contribuyen al buen funcionamiento y equilibrio ecológico del sistema edáfico. Las diferentes funciones que realizan los microorganismos en los sistemas agrícolas, están influenciadas por factores bióticos y abióticos; para lo cual, han desarrollado una capacidad de adaptación admirable y útil para el diseño de estrategias que permitan mitigar los efectos negativos del cambio climático. La inoculación con microorganismos, mejora la disponibilidad de nutrientes para las plantas; contribuye al aprovechamiento de una fuente de nutrientes renovables e incrementan la disponibilidad de nutrientes poco móviles en el suelo, como lo es el fósforo (P).

Abstract

The aim of this review is to inquire about the biological interactions of soil microorganisms and their biotechnological potential in agricultural systems in the face of the current climate change scenario. In this sense, the search for strategies that allow obtaining sustainable and resilient production systems is urgent. By virtue of this, the use of beneficial microorganisms, constitutes a strategy for the development of more sustainable agricultural systems and to reduce the negative impact of chemical products and fertilizers. Latest research on microbial consortiums has made it possible and lead to study the mechanisms used by soil microorganisms to establish themselves and remain in the soil system. Soil microorganisms do not act in isolation, they are made dynamic through multiple interactions, which contribute to the proper functioning and ecological balance of the edaphic system. The different functions that microorganisms perform in agricultural systems, are influenced by biotic and abiotic factors; for which, they have developed an admirable and useful adaptation ability for the design of strategies that have allowed to mitigate the negative effects of climate change. Inoculation with microorganisms, improves the availability of nutrients for plants; contributes to the use of a renewable nutrient source and increases the availability of nutrients that are not very mobile in the soil, such as phosphorus (P).



Introducción

El suelo es un sistema dinámico y complejo que alberga una gran biodiversidad; siendo el espacio de diversos procesos biogeoquímicos indispensables para la vida. Los microorganismos, diminutos y abundantes en esta red de interacciones, son los principales actores que mantienen el equilibrio ecológico de este ecosistema [1]. Gracias a la microbiota del suelo, ocurren procesos esenciales que dan lugar a la sucesión natural del flujo de elementos, que comprenden: *i*) la descomposición de la materia orgánica; *ii*) el reciclaje de nutrientes como el nitrógeno (N), fósforo (P) y carbono (C); *iii*) la nutrición vegetal [2].

Sin embargo, el suelo es un recurso natural no renovable. La constante presión antropogénica a la que se someten los ecosistemas, origina una serie de efectos negativos sobre el equilibrio ecológico de estos. Actualmente, la agricultura enfrenta la problemática de la degradación de los suelos; este recurso cada vez más pierde su capacidad para brindar servicios ecosistémicos como la purificación del agua o la regulación de los ciclos biogeoquímicos [3]. Por lo tanto, los sistemas agrícolas, resultan altamente dependientes al uso indiscriminado de agroquímicos para tratar de sostener la productividad de los cultivos y proveer alimento a una población humana en crecimiento desmedido [4].

Aunado a ello, el panorama actual del cambio climático, exige que se tomen acciones para mitigar los gases de efecto invernadero que se producen como consecuencia del agroextractivismo [5]. Como alternativa al uso de productos químicos, surge un creciente interés en la investigación de los microorganismos edáficos como inóculos microbianos aplicados a los cultivos; debido a las interacciones planta-suelo-microorganismos, que propician y dan lugar a los distintos procesos biológicos, permitiendo conservar la fertilidad del suelo [6–9].

Estos inóculos, llamados biofertilizantes, contienen microorganismos benéficos que ayudan a mejorar la calidad del suelo y promueven el desarrollo vegetativo de los cultivos [10]. Recientemente, han tenido un auge en los sistemas agrícolas de gran escala, como una vía sustentable de bajo costo que, además, ayuda a mantener la estructura del suelo y conservar la biodiversidad de los agroecosistemas [11].

Los biofertilizantes se componen de consorcios microbianos, como bacterias y hongos; los cuales actúan sinérgicamente para mejorar aspectos que permiten el acercamiento hacia una agricultura sostenible y sistemas productivos resilientes ante los efectos negativos del cambio climático. La fijación de nitrógeno (N), la producción de sideróforos, la producción de hormonas que regulan el crecimiento, la protección ante patógenos, la tolerancia a la sequía y la síntesis e intercambio de nutrientes con las plantas, son algunos de los procesos que permiten los agroecosistemas equilibrados [12]. Sean elaborados a nivel industrial o artesanal, estos consorcios microbianos, son estudiados para conocer su potencial biotecnológico y su incidencia en la reducción del uso de agroquímicos [13]; biorremediar los suelos [14]; producir alimentos inocuos [15], entre otros. Finalmente, transitar hacia agroecosistemas más sostenibles [16].

Debido a su importancia, se requiere escalar estas investigaciones al grado de la identificación de la capacidad de adaptación y establecimiento en nuevos ambientes de estos microorganismos y así, poder diseñar estrategias que permitan mitigar y eliminar los efectos del cambio climático. Por lo antes expuesto, el objetivo de la presente revisión es indagar sobre las interacciones biológicas de los microorganismos del suelo y su potencial biotecnológico en los sistemas agrícolas frente al panorama actual del cambio climático.

Cambio en las propiedades del suelo y su efecto en la microbiota edáfica

El equilibrio del suelo se lleva a cabo entre sus propiedades físicas, químicas y biológicas; lo que da lugar a un dinamismo que promueve las condiciones apropiadas para sostener una amplia diversidad de organismos [17]. En este espacio, se desarrollan los microorganismos, tanto eucariotas como procariotas; esta diversidad, crea múltiples interacciones complejas y variadas entre poblaciones microbianas, lo que contribuye a constituir las características propias del suelo [18]. Las comunidades microbianas juegan un rol importante en el suelo, tanto así, que son responsables del 80-90% de sus procesos [18]; principalmente al modificar su estructura, mejorar la fertilidad y reciclar nutrientes [19]. Mediante el reciclaje de los micro y macroelementos, los microorganismos regulan la disponibilidad de nutrientes, propiciando un suelo fértil

y plantas sanas que sustentan el reino animal; por lo que estos organismos microscópicos, constituyen la base de la cadena alimentaria al movilizar compuestos elementales en la biosfera [20,21].

En trabajos previos, se ha observado que los procesos microbianos son indicadores tempranos de la calidad del suelo y pueden anticipar su estado antes que los parámetros físicos o químicos. Entre estos procesos microbianos, la respiración edáfica, la actividad deshidrogenasa y las bacterias fijadoras de nitrógeno, han sido reconocidas como los parámetros más sensibles entre distintos parámetros microbiológicos y bioquímicos. La respiración edáfica y la capacidad bacteriana para la fijación de nitrógeno atmosférico, son dos de las variables que pueden ser utilizadas para medir indirectamente la actividad microbiológica y, estimar así, la capacidad del suelo para el reciclado de nutrientes y el impacto de la actividad humana sobre éste [22].

En materia de reciclaje de nutrientes, los microorganismos son fundamentales en el ciclo del carbono orgánico del suelo (COS), entre otros nutrientes; por lo tanto, son protagónicos en procesos que mitigan los efectos del cambio climático. Existen evidencias de que tienen la capacidad de producir o consumir gases de efecto invernadero (GEI) como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) [23]. Este último gas, es un potente GEI, 298 veces más letal que el CO_2 y sus emisiones, representan entre el 56-70% de todas las fuentes de GEI a nivel mundial [24].

Un estudio en pastizales australianos, reportó que la elevada concentración de CO_2 en la atmósfera, provocó cambios en arqueas, hongos y bacterias [25]. Así también, se ha demostrado que el aumento de CO_2 aumentó la población de acidobacterias en el suelo [26]. El ambiente biogeoquímico de un suelo, influye sobre las respuestas metabólicas microbianas. Sin embargo, en un ecosistema tan dinámico como el suelo, la mayoría de los microorganismos, evolucionaron estrategias para adaptarse a las condiciones variables del ambiente. Según sea el caso, el microorganismo presente, se adapta y permanece en estado de dormancia o muere. Su respuesta será diferente a los tipos de estrés, según su genética o estados fisiológicos [27].

Jansson y Hofmockel [28], por su parte, ilustran las diferentes respuestas que puede darse en las comunidades microbianas respecto al estrés que se someten. Un

incremento en la temperatura puede resultar en: *i*) la pérdida de COS; *ii*) la variación en las poblaciones de bacterias o arqueas y *iii*) una disminución en la abundancia de los hongos. La sequía es proclive a disminuir la descomposición del COS, reducir la biomasa microbiana y la producción de CO_2 . No obstante, las bacterias supervivientes, pueden producir moléculas para retener la turgencia celular y pueden entrar en estado latente [28].

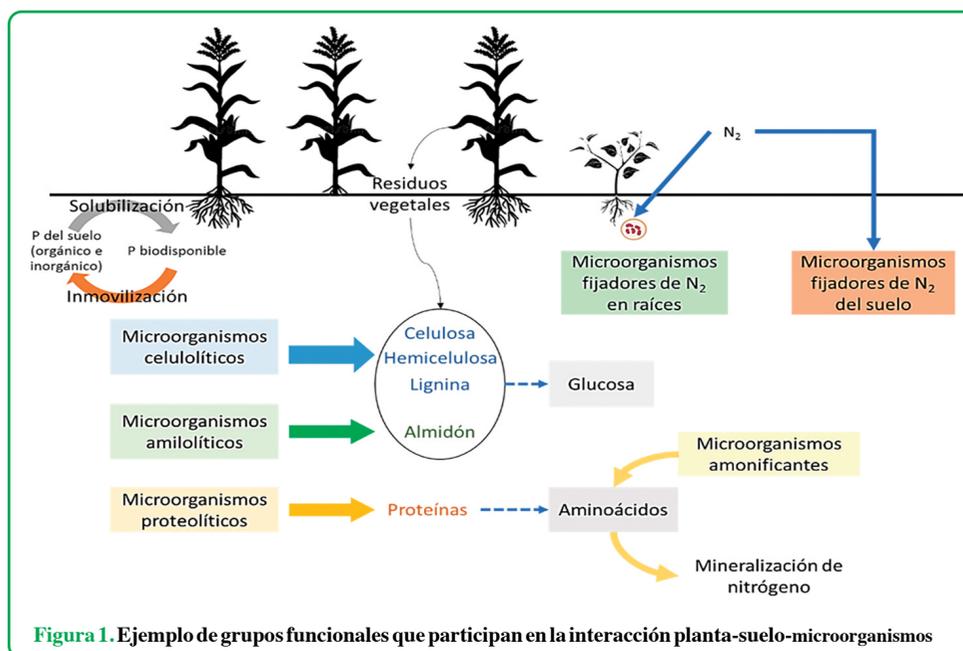
Los suelos que presentan una abundancia relativa de hongos, contienen mayor cantidad de carbono, debido a que estos organismos son más eficientes en utilizar el carbono que las bacterias; lo cual, implica que producen mayor cantidad de biomasa por unidad de carbono utilizada [29]. Esto responde a que la diversidad de los microorganismos en el suelo, depende del sustrato y condiciones en que se desarrollan. Un factor importante es la cantidad de materia orgánica que representa la base sobre la que se desarrollan; la fuente de energía y nutrientes, y donde se puede encontrar aproximadamente, 5% de nitrógeno total y de otros elementos esenciales como fósforo (P), magnesio (Mg), calcio (Ca), azufre (S) y diversos micronutrientes [30]. A su vez, las bacterias necesitan de los exudados de las plantas para su crecimiento, por lo que es importante mantener coberturas vegetales que propicien la interacción planta-microorganismos de forma continua [31].

Incluso, los diferentes usos que se le dé al suelo, pueden afectar diferencialmente a los microorganismos, modulando así los servicios ecosistémicos brindados por estos grupos [22]. Por ejemplo, los fuegos son un peligro para los ecosistemas por una combinación de malas prácticas agrícolas y la temporada de sequías; ante este escenario, el fuego produce una renovación de las reservas de nitrógeno y carbono del suelo, reduce la biomasa microbiana y la presencia de hongos. Después de que se logra controlar el fuego, se presentan suelos degradados, erosionados y se evidencia la pérdida en cobertura vegetal, lo cual, impacta en la microbiota edáfica debido a la asociación de los microorganismos con las raíces de las plantas [28]. Otro de los factores más importantes en la fertilidad del suelo, es el pH. Una modificación de este, puede activar o inactivar las enzimas que los microorganismos producen y actuar sobre la disponibilidad o fijación de minerales nutritivos. Se puede decir que, en suelos con pH de 5.6, existen la mayoría de los microorganismos beneficiosos para los cultivos, y sus enzimas,

son activas [32]. Esto reitera que conocer la ecología microbiana del suelo, es fundamental para conocer en un futuro, los impactos que tendrá el cambio climático sobre estos ecosistemas y buscar estrategias de mitigación [28]. El análisis de las comunidades bacterianas, permite inferir sobre las funciones positivas y negativas de los gremios o poblaciones que la conforman [33], lo que permite el aprovechamiento de consorcios, cepas y metabolitos bacterianos con actividades funcionales aprovechables por el hombre. Sin embargo, solo se ha podido cultivar del 1-10% de las comunidades microbianas que se desarrollan en los suelos [18].

Grupos funcionales de microorganismos

El éxito en la restauración del suelo, está influenciado por la actividad microbiana presente y la cantidad de vínculos que se den en la interacción planta-suelo-microorganismos. Según un estudio desarrollado por Beltrán [34], se pone en evidencia que la densidad de los grupos de microorganismos, se incrementa con relación a la densidad de nutrientes, ya sea por descomposición de la materia orgánica o por la solubilización de elementos; debido a este comportamiento, estas poblaciones se denominan grupos funcionales (figura 1).



Los grupos funcionales del suelo, son poblaciones de microorganismos que no están emparentados taxonómicamente, pero participan en la transformación bioquímica de compuestos orgánicos e inorgánicos. Pueden ser usados como indicadores de calidad del suelo y, como herramienta biotecnológica, para mejorar las propiedades del mismo [35]. Para efectos de la presente revisión, se utilizará la siguiente clasificación de los grupos funcionales: *i*) celulolíticos; *ii*) amilolíticos; *iii*) proteolíticos; *iv*) fijadores de nitrógeno (N) y *v*) movilizados y solubilizadores de fósforo (P).

Microorganismos celulolíticos

La materia orgánica como alimento, es uno de los factores que determinan el crecimiento microbiano alrededor de

este sustrato. La actividad microbiana se ve limitada por los carbohidratos dentro del sustrato, debido a la competencia en torno al carbono; por lo que dependen de la disponibilidad de este elemento para su crecimiento y desarrollo [36]. Los microorganismos de la rizósfera, se alimentan de compuestos orgánicos que componen la biomasa vegetal como la lignina, la celulosa, la hemicelulosa y otros polisacáridos; lo que les da la capacidad de no depender de exudados radiculares para sobrevivir [37,38]. Al presentar una relación directa con la transformación de la materia orgánica del suelo, se consideran los más sensibles para detectar cambios producidos por una perturbación intensa como el laboreo de suelo [39].

Así también, la abundancia de microorganismos del suelo, dependerá de la distribución de los recursos.

A medida que el carbono orgánico disminuye con la profundidad del suelo, la actividad microbiana será menor; por el contrario, esta puede ser abundante desde la superficie mientras que exista un constante suministro de materia orgánica [40]. Complementariamente, López et al. [41], encontraron que las capacidades celulolíticas, son comunes en bacterias presentes en la capa superior del suelo del bosque y en la hojarasca. Además, aislaron 22 géneros de cepas bacterianas del suelo de montaña, las que se han descrito, capaces de degradar la celulosa; siendo la mayoría, *Phyla Firmicutes*, *Actinobacteria*, *Proteobacteria* y *Bacteroidetes*.

Microorganismos amilolíticos

A nivel del suelo, los microorganismos amilolíticos, desempeñan una función esencial en el ciclo del carbono. Tanto el almidón como la celulosa, son las fuentes más importantes de carbono en la naturaleza. El grupo de amilolíticos, degrada estos polímeros con la producción de enzimas extracelulares, las amilasas, lo que provoca la liberación de la glucosa como una molécula más asimilable para otras poblaciones de microorganismos [42,43].

Sin embargo, algunos factores ambientales como la reducción en la disponibilidad de oxígeno y las bajas temperaturas, pueden hacer más lentos estos procesos de descomposición por la disminución de la velocidad del metabolismo y la reducción de la actividad de las enzimas extracelulares [10,40]. Dentro de este grupo funcional, se encuentran los hongos de los géneros *Aspergillus* y *Penicillium* [36,44]; entre las bacterias, se destacan los géneros *Pseudomonas* y *Bacillus* [45] y Actinomicetos como *Streptomyces* [44].

Microorganismos proteolíticos

Las poblaciones microbianas proteolíticas, cumplen un papel importante en la degradación de la biomasa muerta [42]. Las enzimas proteasas producen la liberación de compuestos menores asimilables, como los aminoácidos, los cuales forman parte de la materia orgánica particulada y, pueden ser rápidamente, accesibles para los microorganismos [46]. Los microorganismos entonces, pueden competir con las raíces de las plantas por aminoácidos libres en la solución del suelo; especialmente,

cuando la actividad microbiana es tan intensa como en la rizósfera [37]. En el suelo, la amonificación, es un proceso clave para mejorar la disponibilidad de nitrógeno (N). Los microorganismos proteolíticos, son capaces de degradar proteínas extracelularmente; por lo tanto, participan en los procesos de mineralización del N proteínico de los residuos orgánicos [47].

Microorganismos libres fijadores de nitrógeno

Las bacterias fijadoras de nitrógeno pueden favorecer el establecimiento de las plantas, aumentar su productividad e incrementar el aprovechamiento de los suelos en términos de agua y nutrientes. También, aumentan la cantidad de nutrientes a nivel del follaje y permiten aumentar las tasas de sucesión en los sitios revegetalizados [48]. Los microorganismos libres fijadores de nitrógeno, contribuyen al mantenimiento de la diversidad a través de su influencia en la disponibilidad de diferentes fuentes de nitrógeno, tanto orgánico como inorgánico en los suelos [49]. Tal es el caso de *Rhizobium* spp. frecuentemente utilizado para la fijación de nitrógeno en asociación con leguminosas [50].

Movilizadores y solubilizadores de fósforo

El fósforo (P), es un macronutriente esencial pero limitante [51]. A pesar de que puede estar en grandes cantidades en los suelos, en la mayoría de los casos, no se encuentra disponible para ser absorbido. Los microorganismos por medio de la solubilización y/o mineralización del P inorgánico y orgánico; ponen a disposición de la planta el elemento a través de la producción de ácidos orgánicos y por medio de la acción enzimática [52]. A su vez, para poder vivir en suelos pobres en P, las bacterias han desarrollado diferentes mecanismos como adquisición, inmovilización, reemplazo y uso eficiente del P [42]. La forma inorgánica más disponible son los ortofosfatos, pero su alta demanda y fácil reactividad química por la biota, hace que disminuya sus concentraciones rápidamente en el suelo. Por lo tanto, recurren a formas orgánicas como los ésteres de fosfato y en menor medida, compuestos organofosforados; para ello, algunas bacterias producen enzimas que catalizan

reacciones para mineralizar estas moléculas de alto peso molecular. Para el caso del fósforo inorgánico, en la membrana bacteriana, existen transportadores específicos de fosfatos que permiten el paso de este elemento hacia el interior de la célula [53].

Entre las bacterias movilizadoras y solubilizadoras de P, se encuentran los géneros: *i) Erwinia; ii) Pseudomonas; iii) Bacillus; iv) Rhizobium; v) Klebsiella; vi) Burkholderia; vii) Serratia; viii) Achromobacter; ix) Agrobacterium; x) Micrococcus; xi) Aereobacter; xii) Flavobacterium; xiii) Enterobacter; xiv) Klebsiella; xv) Arthrobacter; xvi) Rhodobacter; xvii) Pantotea y xviii) Klebsiella*. Mientras que entre los hongos, se ubican los géneros *Aspergillus, Penicillium, Trichoderma y Fusarium* [54].

Efectos del uso indiscriminado de fertilizantes químicos en la producción agrícola

Ante la creciente demanda mundial de alimentos, se ha recurrido a prácticas agrícolas intensivas; como la labranza mecánica y el uso indiscriminado de agroquímicos, incluidos los fertilizantes, con el objeto de proporcionar a la planta, los nutrientes necesarios e incrementar la productividad de los cultivos. Sin embargo, es necesario reducir la dependencia a estos insumos ya que, a largo plazo, representan mayores costos de producción. Además, contribuye a la reducción de la materia orgánica del suelo, lo que conlleva a la pérdida de la fertilidad del suelo agrícola, al incremento de la acidez del suelo y a la contaminación del ambiente; por ejemplo, con metales pesados [18,55–57].

La aplicación indiscriminada de insumos agrícolas, ha alterado significativamente los constituyentes orgánicos y vivos del suelo, modificando; principalmente, las actividades metabólicas de las diferentes poblaciones microbianas del agroecosistema [58]. El uso de suelo asociado a la producción agrícola y ganadera, es uno de los factores clave que afecta la biodiversidad edáfica, con impactos negativos en las propiedades físicas, químicas y biológicas; provocando disminución o pérdida del suelo [11]. Así también, la pérdida de microorganismos, afecta el desarrollo de la vida en el suelo; debido a que estos son los responsables de la dinámica, transformación y desarrollo del mismo.

El 98% de los suelos, tiene poca cantidad de P disponible para la nutrición de los cultivos, lo que afecta negativamente los rendimientos y niveles de productividad. Por lo tanto, se utiliza como alternativa, el fertilizante fosfórico de síntesis química, aunque es un procedimiento muy poco eficiente debido a que: *i) incrementa costos energéticos y económicos; ii) tiene muy baja eficiencia (5-30%); iii) provoca una acumulación excesiva de fosfatos no disponibles para las plantas y iv) induce una escasez a nivel global de la roca fosfórica* [54].

El P es uno de los principales macronutrientes esencial para la vida, con una dinámica compleja. Participa directamente en la formación de moléculas orgánicas como: ácidos nucleicos, ATP, fosfolípidos y en reacciones donde ocurre transferencia de energía. Es un nutriente limitante, a diferencia de otros, por lo que el manejo agrícola, determina los flujos y subciclos que permiten el movimiento del P entre los sistemas suelo-agua-organismos vivos, ya sean plantas o microorganismos [51]. En este sentido, cada vez más aumenta el interés de estudiar los microorganismos con le objeto de aplicarlos en sistemas productivos como biofertilizantes o biopesticidas; debido a los beneficios que implica la interacción planta-suelo-microorganismo y su vinculación en estrategias de resiliencia frente a los efectos del cambio climático [49].

Potencial agrícola de los inóculos microbianos

El continuo crecimiento poblacional mundial requiere la transición hacia sistemas agropecuarios productivos, eficientes y sostenibles. Debido a que la fertilidad de los suelos está fuertemente relacionada con la producción de alimentos, existe un aumento en las investigaciones con particular interés en restaurar la microbiota de los suelos mediante estrategias que permitan mejorar su calidad en relación con la productividad agrícola y de una manera no contaminante [58]. Estas estrategias, son fundamentales para contrarrestar los daños ambientales, conservar los ecosistemas, mitigar el cambio climático y contribuir a la seguridad alimentaria [59].

Por ello, el uso de la diversidad microbiana nativa asociada a los cultivos agrícolas representa una alternativa que contribuye a la conservación tanto del suelo, como del recurso microbiano y, finalmente, al establecimiento de

agroecosistemas sostenibles. Aquellos microorganismos que habitan la rizósfera e intervienen en el buen desarrollo de las plantas se pueden conocer como microorganismos benéficos, eficientes o promotores del crecimiento vegetal. Estos son hongos y bacterias que contribuyen al óptimo desarrollo de las plantas en condiciones de estrés. En los últimos años, estas condiciones de estrés se han incrementado y fortalecido con el cambio climático. Factores como la sequía, altas temperaturas, el aumento del CO₂ atmosférico, entre otros, son cada vez más recurrentes [28].

Dentro del sector agrícola, se ha popularizado el uso de biofertilizantes como alternativa al uso de fertilizantes químicos para reducir los efectos negativos que estos últimos tienen en el ambiente. Los biofertilizantes, son preparados con inóculos que contienen microorganismos benéficos que pueden aplicarse al suelo, a la semilla o a la superficie de la planta [60] y establecerse en la rizósfera o en el interior de la planta para facilitar la toma de nutrientes.

Cabe resaltar que estos inóculos, pueden contener cepas aisladas de microorganismos específicos o consorcios microbianos. Es decir, aprovechan los mecanismos que promueven el crecimiento vegetal en forma aislada, secuencial o conjunta y facilitan la disponibilidad de recursos para las plantas a partir de los productos metabólicos microbianos. La fijación biológica del nitrógeno, la solubilización del fósforo y el aumento de la disponibilidad de hierro, son algunos ejemplos de estos mecanismos [61]; algunos anteriormente descritos.

En algunos casos, los microorganismos son aislados de diversos ambientes, como el agua, el suelo, el aire o la rizósfera; y después, son procesados para su uso en el campo de forma concentrada. Entre los géneros más utilizados se encuentran: *i) Bacillus*; *ii) Pseudomonas*; *iii) Azospirillum*; *iv) Azotobacter*; *v) Rhizobium*; *vi) Bradyrhizobium*; *vii) Sinorhizobium*; *viii) Mesorhizobium* y *ix) Streptomyces* [62,63]. Asimismo, a través de la producción de sustancias reguladoras del crecimiento vegetal, estos microorganismos a menudo, producen un incremento en el desarrollo del sistema radicular; con el consecuente aumento en la absorción de nutrientes y agua, debido a una mejor y mayor exploración del suelo [64].

En cambio, los biofertilizantes que contienen consorcios microbianos, aprovechan la integración de diferentes grupos de microorganismos que mantienen

la compatibilidad metabólica y ecológica, toda vez que las transformaciones ambientales que se generen, permitan que ellos coexistan cercanamente [65]. Así mismo, la vida en asociación, puede generar mayor resistencia a las fluctuaciones del ambiente y promover la estabilidad de todos los componentes [66]. La acción de los consorcios microbianos, depende de la disponibilidad de humedad, condiciones de pH y factores de crecimiento en el suelo donde se establecen. Estos consorcios son requeridos para la producción de enzimas y metabolitos específicos que pueden ser útiles en los procesos de mineralización [67,68].

Ya sea por el intercambio de sustancias o por señales moleculares, cada población detecta y responde a la presencia de otras dentro del consorcio; ejerciendo sobre ellas, un control positivo o negativo en su crecimiento y/o metabolismo. La producción total de un consorcio, depende de la combinación de tareas desempeñadas por los constituyentes individuales. Es decir, por las poblaciones microbianas involucradas. Otra importante característica, es su habilidad para desempeñar funciones que requieren múltiples pasos. Tales tareas, son posibles cuando los diferentes pasos se completan, mediante especies microbianas especializadas [69]. Además, los consorcios microbianos pueden resistir mejor los periodos de limitación de nutrientes debido a la diversidad metabólica disponible por la diversidad de especies, combinada con la habilidad de compartir metabolitos dentro de la comunidad. Una población minoritaria, puede llegar a ser la más activa en un periodo de limitación de nutrientes si tiene la habilidad metabólica capaz de sostener la supervivencia de todo el consorcio. De hecho, el consorcio contiene unas especies minoritarias las cuales han sido retenidas por selección natural para responder a tal situación [70].

De acuerdo con diversos autores [71–73], los biofertilizantes deben: *i)* estar disponibles en formas de polvo o granulados; *ii)* tienen que aportar microorganismos que puedan establecerse e interactuar funcionalmente con los microorganismos del suelo; *iii)* debe tener la capacidad de absorción de humedad, buena aireación y capacidad amortiguadora del pH; *iv)* no debe ser tóxico para el ambiente; *v)* fácil de esterilizar, manufacturar y manejar en el campo, *vi)* debe tener características adecuadas para su almacenamiento; y *vii)* no debe ser costoso.

Los biofertilizantes pueden crear asociaciones simbióticas con las plantas, pueden establecerse en la rizósfera o en el interior de la planta para facilitar la toma de nutrientes del suelo a la planta, a la vez que mejoran la calidad del suelo [74]. Ciertos microorganismos pueden actuar como agentes de control biológico al suprimir patógenos de las plantas, debido a la síntesis de sideróforos o antibióticos [34,63,75]. Algunos microorganismos, poseen la capacidad de liberar ciertas enzimas para sintetizar sus alimentos, a la vez que, repelen la entrada de agentes patógenos como un mecanismo de defensa para conseguir sus propios alimentos. Por ejemplo, el uso de la rizobacteria *Bacillus licheniformis* en los sistemas agrícolas, es benéfica por sus mecanismos de producción de auxinas, la fijación de nitrógeno y la solubilización de fósforo [76,77]; así también, como agente de biocontrol [78]. La bacteria *Bacillus spp.* ayuda a proteger a las plantas contra hongos patógenos al inducir la resistencia sistémica al huésped [79]. Estudios demostraron que *B. licheniformis*, aportó una mayor cantidad de compuestos fenólicos, mejoró la actividad antioxidante de un cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y reguló el metabolismo secundario de las plantas [66]; dicho metabolismo se asocia al mecanismo de defensa de las plantas [80].

Para mejorar la productividad de los cultivos, es importante movilizar fuentes de P pobremente disponibles en el suelo; a pesar de que puede estar en grandes cantidades en los suelos. En la mayoría de los casos, no se encuentra disponible para ser absorbido [52]. Por lo que, constituye una gran ventaja la inoculación de altas concentraciones de microorganismos que, solubilizan P mediante diferentes mecanismos para su uso, como los biofertilizantes en la agricultura [29].

El éxito en el uso de estos biofertilizantes en diferentes agroecosistemas, se puede potenciar si se estudia la diversidad metabólica y genética microbiana y su interacción con: *i*) plantas; *ii*) estados fenológicos del cultivo; *iii*) composición de exudados de raíces; *iv*) microbiota nativa; *v*) prácticas agrícolas; *vi*) condiciones climáticas y del suelo, entre otros factores [18]. Sin embargo, la comercialización de estos biofertilizantes a nivel local, se puede ver limitado por falta de una tecnología adecuada [81]. Por su parte, Megali et al. [82], reportaron que bajo la aplicación de microorganismos benéficos y fertilizantes químicos a un cultivo de tomate (*S.lycoper-*

sicum) en condiciones de invernadero, se incrementó hasta 61%, la producción de frutos. Por el contrario, las plantas inoculadas con microorganismos benéficos, presentaron mayor supervivencia a la presencia de insectos y larvas, respecto a las fertilizadas con agroquímicos. Con base en esto, se sugiere que las empresas que elaboran los biofertilizantes, incorporen atributos de protección en sus estudios, antes de la comercialización.

Otro factor a considerar para que el desarrollo de inóculos resulte favorable, es que estén adaptados a las condiciones del ambiente donde serán aplicados. Dicho esto, es importante que los métodos sean ampliamente disponibles y accesibles en el medio donde se aplicarán. Diversas investigaciones, han demostrado que los biofertilizantes preparados con cepas nativas son altamente eficientes para la producción de cultivos; debido a que por los procesos de reproducción y activación, tal y como lo plantea Suchini [83], se obtienen consorcios adaptados a un medio ambiente en específico. No obstante, las condiciones físicoquímicas y biológicas de los suelos, donde se aplican estos fertilizantes, determinará el crecimiento adecuado de las poblaciones de las especies que conforman los consorcios microbianos nativos y, por lo tanto, su efectividad [84].

Importancia de los inóculos microbianos ante el cambio climático

Las propiedades benéficas de los microorganismos, son de amplio interés en la ciencia como estrategia para aumentar la productividad de los cultivos y, para mitigar los efectos inminentes del cambio climático. La Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, publicó recientemente, los avances científicos necesarios para la alimentación y la agricultura para el año 2030 [85]; lo cual incluye una estrategia para la manipulación del microbioma del suelo para incrementar la productividad de los cultivos frente al cambio climático. Por lo tanto, hay que incluir en las investigaciones, la necesidad de entender las rutas biogeoquímicas, apuntando a la descomposición del COS y la producción de GEI para encontrar mejores prácticas que prevengan la pérdida de carbono del suelo [28].

Los microorganismos del suelo poseen mecanismos estratégicos para la mitigación de los GEI. En este sentido, los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), pueden ser

usados para adquirir amonio (NH_4^+) y mitigar la producción de N_2O [86]. La inoculación al suelo de comunidades consumidoras N_2O , puede considerarse una estrategia para contribuir a mantener los servicios ecosistémicos que brindan los microorganismos ante la preocupación de los efectos negativos del calentamiento global.

Se ha descubierto que los microorganismos, pueden oxidar completamente amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-) sin generar N_2O como subproducto; y estos son abundantes en el suelo [28]. Esto da pauta a entender la importancia de estudiar la fisiología y el metabolismo microbiano y, cómo puede beneficiar esta información para mitigar el cambio climático [23]. Por otro lado, el estrés hídrico, es un factor de suma importancia para la agricultura en el contexto del calentamiento global. Para aumentar la tolerancia a la sequía, algunas bacterias del suelo, producen sustancias poliméricas extracelulares, lo cual, crea biopelículas hidrofóbicas que pueden proteger a la planta del estrés hídrico [87]. De igual manera, se puede dar a través de fitohormonas que promueven el crecimiento vegetal, por la acumulación de osmolitos y también por la desintoxicación de especies reactivas de oxígeno [88–90].

Desde el punto de vista tecnológico, los consorcios microbianos, se han utilizado para la remoción de metales pesados y de contaminantes orgánicos [91] presentes en aguas residuales; para la obtención de biodiésel [92], de energía eléctrica [93], para la conversión de carbono y generación de biogás. Además, se ha demostrado que los consorcios microbianos, tienen mayor eficiencia en la síntesis de productos y la conversión de nutrientes, además de un menor costo comparado con el uso de cultivos de microorganismos puros [91,92,94]. Otras ventajas del empleo de consorcios microbianos, es su producción a gran escala, dado que los cultivos puros, no son con frecuencia, económicamente factibles debido a los altos costos de mantenimiento, sustratos, esterilización y recuperación de biomasa, entre otros factores [95].

Conclusiones

Un buen número de investigaciones, ha comprobado la importancia ecológica de las poblaciones microbianas ante los efectos del cambio climático, así como el uso potencial que tienen para contribuir a un manejo sostenible de los agroecosistemas.

Se comprobó que los diferentes grupos funcionales tienen efectos positivos sobre los cultivos al tiempo que cumplen un papel en los procesos biogeoquímicos que mantienen la fertilidad de los suelos. La acción de los consorcios microbianos puede resultar en una mejor adaptación de los microorganismos exógenos en el suelo que la aplicación aislada de una cepa de microorganismos. Sin embargo, el uso de microorganismos nativos tiene mayor probabilidad de establecerse a las condiciones de un suelo específico.

El uso de biofertilizantes presenta beneficios para aumentar la productividad de los cultivos y resulta una alternativa más económica para los productores; promoviendo además, la conservación de la biodiversidad del suelo.

Consentimiento de publicación

Los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés. Este documento solo refleja sus puntos de vista y no los de las instituciones a las que cada autor pertenece.

Perfil de autoría

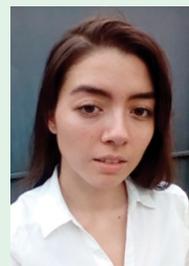
Lissy Rosabal Ayan

Obtuvo su Maestría en Ciencias, énfasis en Recursos Naturales y Desarrollo Rural por El Colegio de la Frontera Sur en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas-México; Licenciada en Bioquímica por la Facultad de Biología de la Universidad de La Habana, Cuba; inició sus estudios de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Sustentabilidad de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), México. Su investigación, se enfoca en el efecto del uso de consorcios microbianos en las propiedades físicoquímicas y biológicas del suelo, además de evaluar los efectos en el agroecosistema maíz.



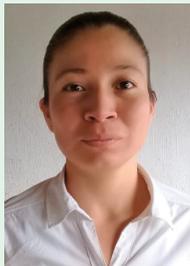
Paulina Macías Coutiño

Ingeniera industrial por el Instituto Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez; cursa Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical en la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), México y desarrolla una investigación sobre consorcios microbianos aplicados al agroecosistema maíz de la región Frailesca-Chiapas, México. Tiene interés en la agroecología como ciencia, práctica y movimiento.



Magnolia Maza González

Ingeniera Agrónoma, de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), México. Cursa Maestría en Ciencias, énfasis en Producción Agropecuaria Tropical en la UNACH. Enfatiza actualmente su investigación, en el efecto de la aplicación de consorcios microbianos sobre las variables de crecimiento y desarrollo del maíz bajo tres sistemas de manejo.

**Rogelio López Vázquez**

Ingeniero en Desarrollo Agroambiental de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), México. Su investigación se enfoca en los efectos de los microorganismos de montaña sobre el crecimiento inicial de plantas de café en condiciones de vivero.

**Francisco Guevara Hernández**

Profesor titular de tiempo completo, en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) e integrante del Cuerpo Académico Consolidado en Agroforestería Pecuaria (CAAP). Es especialista en Agroecología, Recursos naturales y Extensionismo. Desarrolla las líneas de investigación-acción: Capacitación en áreas naturales protegidas, Agroecosistemas tradicionales y Monitoreo y evaluación de procesos. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores-CONACYT desde 2010, actualmente Nivel II. Ha publicado más de 125 artículos científicos en revistas nacionales e internacionales. Actualmente, es miembro de varias redes y sociedades científicas, líder de 2 grupos de investigación interdisciplinarios y árbitro de 12 revistas nacionales e internacionales. Ha coordinado varios proyectos de investigación con financiamiento nacional e internacional, con un componente fuerte de extensión mediante el trabajo colaborativo y la investigación-acción. Es integrante de los Núcleos Académicos del Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Sustentabilidad (DOCAS) y la Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical (MCPAT) y docente de las licenciaturas en Desarrollo Agroambiental y Ganadería Ambiental. Ha recibido varios galardones académicos tanto en México como en el extranjero. Es asesor y consultor para varias agencias de desarrollo nacionales e internacionales.



Referencias

- [1] Abakumov EV, Cajthaml T, Brus J, Frouz J. Humus accumulation, humification, and humic acid composition in soils of two post-mining chronosequences after coal mining. *Journal of Soils and Sediments* 2013;13:39–59. <https://doi.org/10.1007/s11368-012-0579-9>.
- [2] Abril A. ¿Son los microorganismos edáficos buenos indicadores de impacto productivo en los ecosistemas? *Ecología Austral* 2003;13:195–204. http://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/1532/866
- [3] Julca-Otiniano A, Meneses-Florián L, Blas-Sevillano R, Bello-Amez S. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)* 2006;24:49–61. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>.
- [4] Montatixe Sánchez CI, Eche Enriquez MD. Degradación del suelo y desarrollo económico en la agricultura familiar de la parroquia Emilio María Terán, Pillaro. *Siembra* 2021;8:e1735. <https://doi.org/10.29166/siembra.v8i1.1735>.
- [5] Chaparro JM, Sheffin AM, Manter DK, Vivanco JM. Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility. *Biology and Fertility of Soils* 2012;48:597–604. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0691-4>.
- [6] Herrera A, Castellanos F. Análisis metagenómico de la microbiota edáfica de la reserva de la biósfera de Calakmul. *Revista Electrónica Ide@s Del Consejo de Ciencia y Tecnología Del Estado de Guanajuato* 2007;29:802–23.
- [7] Campo Martínez A, Acosta Sanchez R, Morales Velasco S, Prado F. Evaluación de microorganismos de montaña (mm) en la producción de acelga en la meseta de Popayán. *Biotechnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial* 2014;12:79–87. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotechnologia/article/view/322>
- [8] Gamboa-Angulo JJ, Ruíz-Sánchez E, Alvarado-López CJ, Gutiérrez-Miceli F, Ruíz-Valdiviezo VM, Medina-Dzul KB. Efecto de biofertilizantes microbianos en las características agronómicas de la planta y calidad del fruto del chile xcat'ik (*Capsicum annuum* L.). *Revista Terra Latinoamericana* 2020;38:817–26. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.716>.
- [9] Gutiérrez-Sarmiento W, Sáyo-Ayerdi SG, Goñi I, Gutiérrez-Miceli FA, Abud-Archila M, Rejón-Orantes J del C, et al. Changes in Intestinal Microbiota and Predicted Metabolic Pathways During Colonic Fermentation of Mango (*Mangifera indica* L.)—Based Bar Indigestible Fraction. *Nutrients* 2020;12:1–18. <https://doi.org/10.3390/nu12030683>.
- [10] Tanya Morocho M, Leiva Mora M. Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. *Centro Agrícola* 2019;46:93–103. <http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v46n2/0253-5785-cag-46-02-93.pdf>

- [11] Ney L, Franklin D, Mahmud K, Cabrera M, Hancock D, Habteselassie M, et al. Impact of inoculation with local effective microorganisms on soil nitrogen cycling and legume productivity using composted broiler litter. *Applied Soil Ecology* 2020;154:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103567>.
- [12] Rosatto Moda L, de Mello Prado R, Castellanos Gonzáles L, Reyes Hernández A, Caione G, Silva Campos C. Solubilización de fuentes de fósforo asociadas a un compuesto orgánico enriquecido con biofertilizantes. *Agrociencia* 2014;48:489–500. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v48n5/v48n5a3.pdf>
- [13] Montejo-Martínez M, Torres-López A, Martínez-Toledo J, Tenorio-López M, Cruz-Colín F, Ramos-Morales R, et al. Técnicas para el análisis de actividad enzimática en suelos. In: Cuevas-Díaz M, Espinosa-Reyes G, Ilizaliturri-Hernández C, Mendoza-Cantú A, editors. *Métodos ecotoxicológicos para la evaluación de suelos contaminados con hidrocarburos*. 1st ed., México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat); 2012, p. 16–46.
- [14] Bailón-Rojas MR, Florida-Rofner N. Caracterización y calidad de los compost producidos y comercializados en Rupa Rupa-Huánuco. *Enfoque UTE* 2021;12:1–11. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.644>.
- [15] Paolini Gomez JE. Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Revista Terra Latinoamericana* 2018;36:13–22. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>.
- [16] Pascual-Córdova G, Obrador-Olán J, Carrillo-Ávila E, García-López E, Sánchez-Soto S, Guerrero-Peña A, et al. Indicadores de calidad del suelo en el agroecosistema caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *Revista De La Facultad De Agronomía De La Universidad Del Zulia* 2017;35:1–25. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/27258>
- [17] Reyes I, Valery A. Efecto de la fertilidad del suelo sobre la microbiota y la promoción del crecimiento Del maíz (zea mays l.) Con azotobacter spp. *BioAgro* 2007;19:117–26.
- [18] de los Santos Villalobos S, Parra Cota FI, Herrera Sepúlveda A, Valenzuela Aragón B, Estrada Mora JC. Colmena: colección de microorganismos edáficos y endófitos nativos, para contribuir a la seguridad alimentaria nacional. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2018;9:191–202. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.858>.
- [19] Nogales B. La microbiología del suelo en la era de la biología molecular: descubriendo la punta del iceberg. *Ecosistemas* 2005;14:41–50. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/153>
- [20] Lyautey E, Lacoste B, Ten-Hage L, Rols J-L, Garabetian F. Analysis of bacterial diversity in river biofilms using 16S rDNA PCR-DGGE: methodological settings and fingerprints interpretation. *Water Research* 2005;39:380–8. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.09.025>.
- [21] Guerrero R, Berlanga M. Microbios en la niebla: descubriendo el papel de los microbios en la biosfera. *Ecosistemas* 2005;14:3–10. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/149>
- [22] Abril A. ¿Son los microorganismos edáficos buenos indicadores de impacto productivo en los ecosistemas? *Ecología Austral* 2003;13:195–204. http://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/1532/866
- [23] Wang K, Peng C, Zhu Q, Zhou X, Wang M, Zhang K, et al. Modeling global soil carbon and soil microbial carbon by integrating microbial processes into the ecosystem process model TRIPLEX-GHG. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 2017;9:2368–84. <https://doi.org/10.1002/2017MS000920>.
- [24] Syakila A, Kroeze C. The global nitrous oxide budget revisited. *Greenhouse Gas Measurement and Management* 2011;1:17–26. <https://doi.org/10.3763/ghgmm.2010.0007>.
- [25] Hayden HL, Mele PM, Bougoure DS, Allan CY, Norng S, Piceno YM, et al. Changes in the microbial community structure of bacteria, archaea and fungi in response to elevated CO₂ and warming in an Australian native grassland soil. *Environmental Microbiology* 2012;14:3081–96. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2012.02855.x>.
- [26] Dunbar J, Eichorst SA, Gallegos-Graves LV, Silva S, Xie G, Hengartner NW, et al. Common bacterial responses in six ecosystems exposed to 10 years of elevated atmospheric carbon dioxide. *Environmental Microbiology* 2012;14:1145–58. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2011.02695.x>.
- [27] Schimel J, Balsler TC, Wallenstein M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. *Ecology* 2007;88:1386–94. <https://doi.org/10.1890/06-0219>.
- [28] Jansson JK, Hofmockel KS. Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology* 2020;18:35–46. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>.
- [29] Pedraza R, Teixeira K-RS, Scavino AF, de Salamone IG, Baca B, Azcón R, et al. Microorganismos que mejoran el crecimiento de las plantas y la calidad de los suelos. *Revisión. Ciencia & Tecnología Agropecuaria* 2010;11:155–64. https://doi.org/10.21930/rcta.vol11_num2_art:206.
- [30] Julca-Otiniano A, Meneses-Florián L, Blas-Sevillano R, Bello-Amez S. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)* 2006;24:49–61. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>.
- [31] Olalde V, Aguilera L. Microorganismos y biodiversidad. *Terra Latinoamericana* 1998;16:289–92. https://www.redalyc.org/pdf/573/Resumenes/Resumen_57316312_1.pdf

- [32] Calvo Vélez P, Reymundo Meneses L, Zúñiga Dávila D. Estudio de las poblaciones microbianas de la rizósfera del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en zonas altoandinas. *Ecología Aplicada* 2008;7:141–8. <https://doi.org/10.21704/rea.v7i1-2.369>.
- [33] Aly SM, Abdel-Galil Ahmed Y, Abdel-Aziz Ghareeb A, Mohamed MF. Studies on *Bacillus subtilis* and *Lactobacillus acidophilus*, as potential probiotics, on the immune response and resistance of *Tilapia nilotica* (*Oreochromis niloticus*) to challenge infections. *Fish & Shellfish Immunology* 2008;25:128–36. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2008.03.013>.
- [34] Beltrán Pineda ME. La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria* 2015;15:101–13. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:401.
- [35] Bashan Y, Puente E, Salazar B, De-Bashan L, Bacilio M, Hernández J, et al. Reforestación de tierras erosionadas en el desierto: el papel de las bacterias promotoras de crecimiento en plantas y la materia orgánica. *Suelos Ecuatorianos* 2015;35:70–7. <http://bashanfoundation.org/gmaweb/pdfs/suelosecuatoriales.pdf>
- [36] Rodríguez Z, Boucort R, Rodríguez J, Albelo N, Nuñez O, Herrera F. Aislamiento y selección de microorganismos con capacidad de degradar el almidón. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 2006;40:349–54. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193017723014.pdf>
- [37] Matsumoto LS, Martines AM, Avanzi MA, Albino UB, Brasil CB, Saridakis DP, et al. Interactions among functional groups in the cycling of, carbon, nitrogen and phosphorus in the rhizosphere of three successional species of tropical woody trees. *Applied Soil Ecology* 2005;28:57–65. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2004.06.008>.
- [38] Cao C, Jiang D, Teng X, Jiang Y, Liang W, Cui Z. Soil chemical and microbiological properties along a chronosequence of *Caragana microphylla* Lam. plantations in the Horqin sandy land of Northeast China. *Applied Soil Ecology* 2008;40:78–85. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2008.03.008>.
- [39] Bertola M, Ferrarini A, Visioli G. Improvement of soil microbial diversity through sustainable agricultural practices and its evaluation by Omics approaches: A perspective for the environment, food quality and human safety. *Microorganisms* 2021;9:1–22. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071400>.
- [40] Helgason BL, Gregorich EG, Janzen HH, Ellert BH, Lorenz N, Dick RP. Long-term microbial retention of residue C is site-specific and depends on residue placement. *Soil Biology and Biochemistry* 2014;68:231–40. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2013.10.002>.
- [41] López-Mondéjar R, Zühlke D, Becher D, Riedel K, Baldrian P. Cellulose and hemicellulose decomposition by forest soil bacteria proceeds by the action of structurally variable enzymatic systems. *Scientific Reports* 2016;6:6:25279. <https://doi.org/10.1038/srep25279>.
- [42] Beltrán Pineda ME, Rocha Gil ZE, Bernal Figueroa AA, Pita Morales LA. Microorganismos funcionales en suelos con y sin revegetalización en el municipio de Villa de Leyva, Boyacá. *Colombia Forestal* 2017;20:159–70. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.2.a05>.
- [43] Beltrán Pineda M, Lizarazo Forero L. Grupos funcionales de microorganismos en suelos de páramo afectados por incendios forestales. *Revista de Ciencias* 2013;17:121–36. <https://core.ac.uk/download/pdf/267165574.pdf>
- [44] Tamariz-Angeles C. Isolation and identification of cellulolytic and xylanolytic bacteria from Huancaruaz Hot Spring, Peru. *Annual Research & Review in Biology* 2014;4:2920–30. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2014/10699>.
- [45] Montor-Antonio J, Olvera-Carranza C, Reyes-Duarte D, Sachman-Ruiz B, Ramírez-Coutiño L, del Moral S. Caracterización bioquímica de AmiJ33, una amilasa de *Bacillus amyloliquefaciens* aislada de suelos cultivados con caña de azúcar en la región del Papaloapan. *Nova Scientia* 2014;6. <http://www.scielo.org.mx/pdf/ns/v6n12/v6n12a3.pdf>
- [46] Zimmermann M, Leifeld J, Fuhrer J. Quantifying soil organic carbon fractions by infrared-spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry* 2007;39:224–31. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.010>.
- [47] Álvarez-López C, Osorio-Vega W, Díez-Gómez MC, Marín-Montoya M. Caracterización bioquímica de microorganismos rizosféricos de plantas de vainilla con potencial como biofertilizantes. *Agronomía Mesoamericana* 2014. <https://doi.org/10.15517/am.v25i2.15426>.
- [48] Pyke DA, Archer S. Plant-Plant Interactions Affecting Plant Establishment and Persistence on Revegetated Rangeland. *Journal of Range Management* 1991;44. <https://doi.org/10.2307/4003035>.
- [49] Compant S, van der Heijden MGA, Sessitsch A. Climate change effects on beneficial plant-microorganism interactions. *FEMS Microbiology Ecology* 2010;73:197–214. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00900.x>.
- [50] Hu A, Chen X, Luo S, Zou Q, Xie J, He D, et al. Rhizobium leguminosarum glutathione peroxidase is essential for oxidative stress resistance and efficient nodulation. *Frontiers in Microbiology* 2021;12:627562. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.627562>.
- [51] Alori ET, Glick BR, Babalola OO. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology* 2017;8:971. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>.

- [52] Vargas Barrantes P, Castro Barquero L. Aislamiento y evaluación de microorganismos solubilizadores de fósforo de Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 2018;43:47–68. <https://doi.org/10.15517/rac.v43i1.35649>.
- [53] Tapia-Torres Y, García-Oliva F. La disponibilidad del fósforo es producto de la actividad bacteriana en el suelo en ecosistemas oligotróficos: Una revisión crítica. *Terra Latinoamericana* 2013;31:231–42. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v31n3/2395-8030-tl-31-03-00231.pdf>
- [54] Patiño-Torres C, Sanclemente-Reyes O. Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF): una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible. *Entramado* 2014;10:288–97. <http://www.scielo.org.co/pdf/entra/v10n2/v10n2a18.pdf>
- [55] Chuan O, Muhammad I, Chuen Y, Kamaruzzaman Y, Bidai J. Metals contamination using *Polymesoda expansa* (Marsh Clam) as bio-indicator in Kelatan river, Malaysia. *Malaysian Journal of Analytical Science* 2017;21:597–604. <https://doi.org/10.17576/mjas-2017-2103-09>.
- [56] Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, Shen JL, Han WX, Zhang WF, et al. Significant acidification in major chinese croplands. *Science* 2010;327:1008–10. <https://doi.org/10.1126/science.1182570>.
- [57] Plante AF. *Soil biogeochemical cycling of inorganic nutrients and metals*. Academic Press; 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047514-1.50019-6>.
- [58] Hernández-Flores L, Munive-Hernández J, Sandoval-Castro E, Martínez-Carrera D, Villegas-Hernández M. Efecto de las prácticas agrícolas sobre las poblaciones bacterianas del suelo en sistemas de cultivo en Chihuahua, México. *Rev Mex Cienc Agríc* 2013;4:353–65. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v4n3/v4n3a2.pdf>
- [59] Kumar A, Verma JP. Does plant—microbe interaction confer stress tolerance in plants: A review? *Microbiological Research* 2018;207:41–52. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.11.004>.
- [60] Grageda-Cabrera O, Díaz-Franco A, Peña-Cabriaes J, Vera-Núñez J. Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Rev Mex Cienc Agríc* 2012;3:1261–74. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v3n6/v3n6a15.pdf>
- [61] Restrepo Correa SP. Mecanismos de acción de hongos y bacterias empleados como biofertilizantes en suelos agrícolas: una revisión sistemática. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 2017;18:335–51. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num2_art:635.
- [62] Vitorino LC, Bessa LA. Technological microbiology: Development and applications. *Frontiers in Microbiology* 2017;8:827. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00827>.
- [63] Creus C. Inoculantes microbianos: piezas de un rompecabezas que aún requiere ser ensamblado. *Revista Argentina de Microbiología* 2017;49:207–9. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.07.001>
- [64] Salar RK, Purewal SS, Sandhu KS. Bioactive profile, free-radical scavenging potential, DNA damage protection activity, and mycochemicals in *Aspergillus awamori* (MTCC 548) extracts: a novel report on filamentous fungi. *3 Biotech* 2017;7:164. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0834-2>.
- [65] Díaz Borrego L, Marín Leal J, Alburgue Díaz D, Carrasquero Ferrer S, Morales Avendaño E. Consorcio microbiano autóctono para el tratamiento de aguas contaminadas con gasoil del puerto de Isla de Toas (Venezuela). *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* 2018;28:5–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.18359/rcin.2792>.
- [66] Ochoa Carreño DC, Montoya Restrepo A. Consorcios microbianos: una metáfora biológica aplicada a la asociatividad empresarial en cadenas productivas agropecuarias. *Revista Facultad de Ciencias Económicas* 2010;18:55–74. <https://doi.org/10.18359/rfce.2272>.
- [67] Gadd GM. Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology* 2010;156:609–43. <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>.
- [68] Northup E, Kathleen H, Lavoie D. Geomicrobiology of Caves: A Review. *Geomicrobiology Journal* 2001;18:199–222. <https://doi.org/10.1080/01490450152467750>.
- [69] Brenner K, You L, Arnold FH. Engineering microbial consortia: a new frontier in synthetic biology. *Trends in Biotechnology* 2008;26:483–9. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2008.05.004>.
- [70] Maier R, Pepper I, Gerba C. *Environmental Microbiology*. 2nd ed. Elsevier; 2009. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370519-8.X0001-6>.
- [71] Rivera Cruz M, Trujillo Narcia A, Cordova Ballona G, Kohler J, Caravaca F, Roldan A. Poultry manure and banana waste are effective biofertilizer carriers for promoting plant growth and soil sustainability in banana crops. *Soil Biology and Biochemistry* 2008;40:3092–5. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.003>.
- [72] ben Rebah F. Wastewater sludge as a substrate for growth and carrier for rhizobia: the effect of storage conditions on survival of *Sinorhizobium meliloti*. *Bioresource Technology* 2002;83:45–51. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00202-4).
- [73] Stephens JHG, Rask HM. Inoculant production and formulation. *Field Crops Research* 2000;65:249–58. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00090-8).
- [74] Basu S, Rabara R, Negi S. Towards a better greener future - an alternative strategy using biofertilizers. I: Plant growth promoting bacteria. *Plant Gene* 2017;12:43–9. <https://doi.org/10.1016/J.PLGENE.2017.07.004>.

- [75] González F. H, Fuentes M. N. Mecanismo de acción de cinco microorganismos promotores de crecimiento vegetal. *Revista de Ciencias Agrícolas* 2017;34:17–31. <https://doi.org/10.22267/rcia.173401.60>.
- [76] Jha CK, Saraf M. Evaluation of multispecies plant-growth-promoting consortia for the growth promotion of *Jatropha curcas* L. *Journal of Plant Growth Regulation* 2012;31:588–98. <https://doi.org/10.1007/s00344-012-9269-5>.
- [77] Domenech J, Reddy MS, Klopper JW, Ramos B, Gutierrez-Mañero J. Combined application of the biological product LS213 with *Bacillus*, *Pseudomonas* or *Chryseobacterium* for growth promotion and biological control of soil-borne diseases in pepper and tomato. *Biocontrol* 2006;51:245–58. <https://doi.org/10.1007/s10526-005-2940-z>.
- [78] Chung S. Powder formulation using heat resistant endospores of two multi-functional plant growth promoting rhizobacteria *Bacillus* strains having Phytophthora blight suppression and growth promoting functions. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry* 2010;53:485–92. <https://doi.org/10.3839/jksabc.2010.074>.
- [79] Adam M, Heuer H, Hallmann J. Bacterial antagonists of fungal pathogens also control root-knot nematodes by induced systemic resistance of tomato plants. *PLoS ONE* 2014;9:1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090402>.
- [80] Ferraz HGM, Resende RS, Moreira PC, Silveira PR, Milagres EA, Oliveira JR, et al. Antagonistic rhizobacteria and jasmonic acid induce resistance against tomato bacterial spot. *Bragantia* 2015;74:417–27. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0074>.
- [81] Khavazi K, Akhyani A, Baybordi A, Darya S, Abdolhamid A. Isolation and characterization of plant growth promoting fluorescent pseudomonads and their influence on yield of potato. Rome, Italy: 2007. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2369-4>
- [82] Megali L, Glauser G, Rasmann S. Fertilization with beneficial microorganisms decreases tomato defenses against insect pests. *Agronomy for Sustainable Development* 2014;34:649–56. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0187-0>.
- [83] Suchini Ramírez J. Innovaciones agroecológicas para una producción agropecuaria sostenible en la región del Trifinio. Cartago, Turrialba-Costa Rica: 2012. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A10933e/A10933e.pdf>
- [84] Alarcon J, Recharte D, Yanqui F, Moreno S, Buendía M. Fertilizing with native efficient microorganisms has a positive effect on the phenology, biomass and production of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Scientia Agropecuaria* 2020;11:67–73. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.08>.
- [85] National Academies of Sciences Engineering and Medicine. Science breakthroughs to advance food and agricultural research by 2030. Washington, D.C.: National Academies Press; 2019. <https://doi.org/10.17226/25059>.
- [86] Itakura M, Uchida Y, Akiyama H, Hoshino YT, Shimomura Y, Morimoto S, et al. Mitigation of nitrous oxide emissions from soils by *Bradyrhizobium japonicum* inoculation. *Nature Climate Change* 2013;3:208–12. <https://doi.org/10.1038/nclimate1734>.
- [87] Naylor D, Coleman-Derr D. Drought stress and root-associated bacterial communities. *Frontiers in Plant Science* 2018;8:2223. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02223>.
- [88] Hu A, Chen X, Luo S, Zou Q, Xie J, He D, et al. Rhizobium leguminosarum glutathione peroxidase is essential for oxidative stress resistance and efficient nodulation. *Frontiers in Microbiology* 2021;12:627562. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.627562>.
- [89] Lakshmanan V, Ray P, Craven KD. Toward a resilient, functional microbiome: Drought tolerance-alleviating microbes for sustainable agriculture. *Methods Mol Biol* 2017;1631:69–84. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7136-7_4.
- [90] Vurukonda SSKP, Vardharajula S, Shrivastava M, SkZ A. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research* 2016;184:13–24. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.12.003>.
- [91] Muñoz R, Alvarez MT, Muñoz A, Terrazas E, Guieysse B, Mattiasson B. Sequential removal of heavy metals ions and organic pollutants using an algal-bacterial consortium. *Chemosphere* 2006;63:903–11. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.09.062>.
- [92] Hena S, Fatimah S, Tabassum S. Cultivation of algae consortium in a dairy farm wastewater for biodiesel production. *Water Resources and Industry* 2015;10:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2015.02.002>.
- [93] Gajda I, Greenman J, Melhuish C, Ieropoulos I. Self-sustainable electricity production from algae grown in a microbial fuel cell system. *Biomass and Bioenergy* 2015;82:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.017>.
- [94] Vasseur C, Bougaran G, Garnier M, Hamelin J, Le Boulanger C, Chevanton M le, et al. Carbon conversion efficiency and population dynamics of a marine algae–bacteria consortium growing on simplified synthetic digestate: First step in a bioprocess coupling algal production and anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 2012;119:79–87. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.128>.
- [95] Höffner K, Barton PI. Design of Microbial Consortia for Industrial Biotechnology. *Computer Aided Chemical Engineering* 2014;34:65–74. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63433-7.50008-0>.