

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISION DE INGENIERIA

PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE INGENIERO EN
BIOTECNOLOGÍA



Estrategias Microbiológicas Para La Liberación De Fosforo En Suelos Agrícolas

Por:

MONSERRAT CARRANZA MORALES

MONOGRAFIA

Presenta como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGIA

Saltillo, Coahuila, Mexico

Junio,2026

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISION DE INGENIERÍA

PROGRAMA DOCENTE DE INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Estrategias Microbiológicas Para La Liberación De Fosforo En Suelos Agrícolas

Por:

MONSERRAT CARRANZA MORALES

MONOGRAFIA

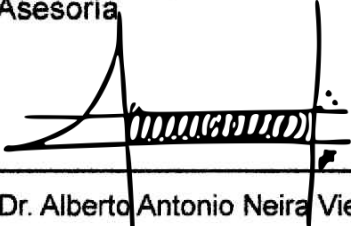
Presenta como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGIA

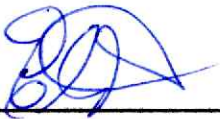
Aprobada por el Comité de Asesoría



Dra. Sonia Noemí Ramírez Barrón
Asesor principal



Dr. Alberto Antonio Neira Vielma
Asesor Principal Externo

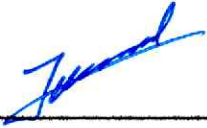


Dra. Elda Barbarita Companioni González
Co-asesor



Dra. Laura María Solís Salas
Co-asesor





M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, Mexico

Junio, 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

PROGRAMA DOCENTE DE INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Estrategias Microbiológicas Para La Liberación De Fosforo En Suelos Agrícolas

Por:

MONSERRAT CARRANZA MORALES

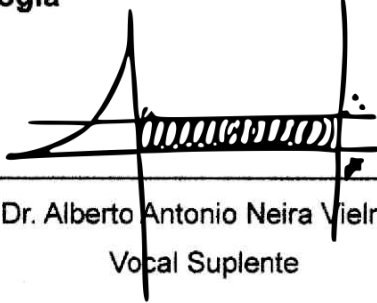
Y que somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito parcial
para obtener el título profesional de:

Ingeniero en Biotecnología

APROBADA



Dra. Sonia Noemí Ramírez Barrón
Presidente



Dr. Alberto Antonio Neira Vielma
Vocal Suplente

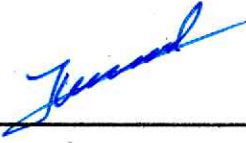


Dra. Laura María Solís Salas
Vocal



Dra. Elda Barbarita Companioni
González
Vocal





M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2026

DEDICATORIAS

Este documento es el resultado final de una trayectoria académica, pero, sobre todo, es un testimonio de un esfuerzo compartido. Dedico este logro, con profundo amor y gratitud, a mis padres, al señor **Jorge Carranza Tecuapetla** y a la señora **Lorena Morales Pérez**. Ustedes han sido la base de mi formación, su respaldo incondicional y su compañía constante en cada paso de este trayecto han sido fundamentales. Este éxito me pertenece tanto a mí como a ustedes, pues sus sacrificios y sus palabras de ánimo fueron el motor que me permitió alcanzar este objetivo.

A mi familia, mi refugio incondicional y motor constante. Extiendo mi gratitud a mis tíos, **Joaquín Carranza T.** y **Fausto Carranza T.**, así como a mis tías, **Patricia Esteban**, **Edilberta Laureano** y **Sonia Carranza T.**; gracias por confiar en mí y por acompañarme siempre con su cariño y sabios consejos. De igual manera, agradezco a mi hermana, **Zoe F. Carranza**, y a mis primos **Joaquín Carranza L.**, **Daniela Carranza L.**, **Zitlaly Carranza E.**, **Itzel Carranza E.**, **Fausto de Jesús Carranza E.**, **Noé F. Carranza** y **Rafael F. Carranza**. Ustedes han sido mis compañeros de camino, quienes han compartido mis ilusiones y se han convertido en la fuente de motivación diaria que me impulsa a ser mejor cada día.

Dedico este trabajo también al **Ing. Nefthalí Hernández** por su apoyo, comprensión, por su compañía y por el cariño sincero que me ha brindado. A todas las personas que estuvieron a mi lado, brindándome su paciencia y respaldo en los momentos de mayor desafío, gracias por ser parte fundamental de este proceso. Este éxito es un reflejo del amor y el apoyo de todos ustedes, quienes han dado un significado profundo a mi formación profesional

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, **la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, gracias por brindarme la formación técnica y académica que hoy define mi perfil profesional. Especialmente, agradezco al **Dr. Gabriel Gallegos**, sus enseñanzas en microbiología fueron el motor que despertó mi interés y resultaron fundamentales para la realización de esta investigación.

Un agradecimiento muy especial a mi hermano, **el Ing. Rafael Emanuel Carranza**. Gracias a su guía, paciencia y enseñanzas, logré destacar en mis actividades de campo y adquirir competencias que hoy enriquecerán mi perfil profesional. Gracias por ser, además de mi hermano, un mentor invaluable y un ejemplo a seguir.

Mi gratitud especial para mi tía, **María del Carmen Carranza Tecuapetla**, por ser mi confidente a lo largo de estos años. Gracias por escuchar cada una de mis ideas, por motivarme en todo momento y, sobre todo, por esos consejos oportunos que siempre fueron el impulso necesario para seguir adelante. Asimismo, agradezco profundamente a mi abuelita, **Eugenia Tecuapetla**, por todo el cariño, el apoyo incondicional y la ternura con la que siempre me ha arropado.

Un agradecimiento especial hasta el cielo para el **Sr. Rafael Carranza Muñoz**. A lo largo de mi vida, usted ha sido y seguirá siendo mi mayor ejemplo de trabajo y fortaleza. Gracias por todo lo que me brindó en vida; aunque hoy su presencia física no me acompaña, su legado vive en mí, y sé que me sigue cuidando y guiando en cada paso que doy

Expreso mi profundo agradecimiento al **Ing. Emanuel Moreno Bautista** por sus valiosas enseñanzas y, especialmente, por sus sabios consejos. Gracias por motivarme siempre a perseverar y por impulsarme a enfrentar y superar cualquier adversidad en mi camino.

Finalmente, agradezco a mi entrenadora de softbol en la UAAAN, **Claudia Gaytán**, por su apoyo constante. A mis compañeras **Ivón e Ivett Soria, Alejandra y Hanna**

Garza, Fernanda Tovar, Adriana Rocha, Berenice, ya todo el equipo **Grizzlies**, gracias por su amistad y por hacer de este tiempo una experiencia inolvidable.

EPIGRAFE

"A veces, el mayor triunfo no es haber ganado todas las batallas, sino haber tenido la valentía de no retirarse nunca. Cada día es un pulso entre lo que somos y lo que estamos destinados a ser, y en esa lucha, nunca se pierde: simplemente se adquiere la sabiduría de la experiencia."

...Viktor Frankl

PROLOGO

La agricultura moderna se enfrenta a una paradoja fundamental, aunque el fósforo es un elemento esencial para la vida y el metabolismo energético de los cultivos, su disponibilidad efectiva en el suelo sigue siendo una de las mayores limitaciones para la productividad agrícola. A pesar de la aplicación masiva de fertilizantes, gran parte de este nutriente queda "bloqueado" o inmovilizado por la compleja química del suelo, resultando en pérdidas económicas significativas y graves impactos ambientales por la contaminación de ecosistemas hídricos.

Este documento explora una clave biotecnológica alternativa, los microorganismos solubilizadores de fosfato (MSF). A través de un análisis técnico, se examina cómo bacterias, hongos y actinomicetos actúan como mediadores biológicos, empleando mecanismos de acidificación y actividad enzimática para liberar el fósforo retenido. Más que una simple sustitución de fertilizantes sintéticos, esta investigación propone un cambio de paradigma hacia un manejo integrado, donde la sinergia entre el conocimiento edafoclimático, la biotecnología microbiana y las prácticas de precisión promete transformar la gestión de la fertilidad del suelo, garantizando así la seguridad alimentaria en un contexto de recursos finitos.

INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIAS	III
AGRADECIMIENTOS	IV
EPIGRAFE	VI
PROLOGO	VII
INDICE DE CONTENIDO	VIII
INDICE DE TABLAS	X
INDICE DE FIGURAS	XI
RESUMEN.....	XII
INTRODUCCION.....	1
El fósforo en la agricultura.	1
Problemática Global de la disponibilidad de fósforo.	1
JUSTIFICACIÓN	2
DESARROLLO	2
Solubilización microbiana.	2
Diversidad de microorganismos.....	2
Bacterias solubilizadoras	3
Mecanismos de Acción Biotecnológica.....	3
• Producción de Ácidos Orgánicos.....	3
• Actividad Enzimática (Fosfatasas/Fitasas):	3
• Quelación de Cationes.....	3
Análisis Técnico y Consideraciones	5
Hongos	5
Mecanismos de Solubilización en Hongos y Actinomicetos.....	5
1. Exudación de ácidos orgánicos:.....	5
2. Extensión de hifas (Micorrizas):.....	5
3. Actividad enzimática compleja:	6
Microorganismos de Alta Relevancia Comercial.....	6
• Agentes de Solubilización	6

• Agentes de Simbiosis	6
• Agentes de Protección	7
Factores que determinan la eficiencia de los MSF	7
Impacto del pH y potencial redox en la solubilización biológica.	7
Interacción entre el microbiota del suelo y la rizosfera.....	8
Factores ambientales (humedad y temperatura) en el éxito de la inoculación.	8
Técnicas de formulación y aplicación de bioinoculantes.	9
• Soportes (Carriers):	9
• Métodos de aplicación	9
○ Inoculación de semillas	10
○ Fertirriego	10
○ Aplicación al surco	10
Sinergias microbianas: uso de consorcios frente a cepas únicas.....	11
• Complementariedad:	11
• Resiliencia:	12
Evaluación de la respuesta vegetal y recuperación de la fertilidad.	12
• Respuesta vegetal	12
• Recuperación de la fertilidad.....	13
DISCUSIÓN	13
El papel de los Microorganismos Solubilizadores de Fosfato (MSF) en la agricultura sustentable.	13
Limitaciones de la adopción de bioinoculantes a gran escala.....	13
Análisis crítico sobre la eficiencia técnica frente a la fertilización mineral convencional.	14
CONCLUSIONES	15
PRESPECTIVAS	15
REFERENCIAS.....	17

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Bacterias solubilizadoras de fosforo y sus mecanismos principales.....	3
Tabla 2 Generos/ Especies Principales de Hongos,Actiomicetos y Micorrizas, solubilizadores de fosforo y su mecanismo de acción	6

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Siembra de Jícama con sembradora manual, en el municipio de Atlixco, Puebla.	10
Figura 2 semilla de jícama inoculada con un consorcio de microorganismos, solubilizadores de fosforo, previamente a su siembra en el municipio de Cholula, Puebla, 2026.....	10
Figura 3 semilla de jícama inoculada antes de siembra en Atlixco, Puebla 2026.	10
Figura 4 Aplicacion de consorcio de microorganismos solubilizadores de fosforo, fijadores de nitrogeno, anglicos directo al suelo, para bajar pH, prevenir plagas y enfermedades antes de siembra de jicama en Cholula, Puebla.	11
Figura 5 Aplicacion foliar de consorcio de microorganismos solubilizadores de fosforo y con microelementos para cubrir deficiencias en cultivo de jicama, en Cholula, Puebla.....	11
Figura 6 Raiz de Jicama, antes de su primera aplicación foliar de nutrición, con microorganismos beneficos	12
Figura 7 Raiz de cultivo de jicama 8 despues de aplicaciones foliares con microorganismos beneficos, entre ellos solubilizadores de fosforo, que muestra aumento de tamaño en la raiz principal y crecimiento de bellos adsorventes	12

RESUMEN

El presente trabajo aborda la problemática global de la baja eficiencia en el uso del fósforo (P) en la agricultura, un recurso esencial pero crítico debido a su rápida inmovilización en el suelo. La fijación del fósforo, al interactuar con cationes como calcio, hierro y aluminio, limita su biodisponibilidad y reduce la eficiencia de los fertilizantes sintéticos.

Los puntos clave tratados son:

- **Mecanismos de solubilización:** Se detalla cómo los microorganismos solubilizadores de fosfato (MSF), entre los que destacan géneros como *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Aspergillus* y *Penicillium*, actúan mediante la secreción de ácidos orgánicos y enzimas (fosfatasas/fitasas) para liberar fósforo inorgánico e insoluble.
- **Factores de Éxito:** La eficacia de estos microorganismos depende de una interacción dinámica con el pH del suelo, la disponibilidad de carbono en la rizosfera (exudados radiculares), la humedad y la temperatura.
- **Tendencias Biotecnológicas:** Se analiza la transición de inóculos de cepa única a consorcios microbianos, los cuales ofrecen mayor resiliencia y complementariedad funcional para adaptarse a condiciones de campo variables.
- **Enfoque Integrado:** Se argumenta que el futuro no reside en la eliminación de la fertilización mineral, sino en un manejo integrado que combina insumos químicos con bioinoculantes, maximizando la eficiencia nutricional, mejorando la arquitectura radicular y reduciendo la degradación ambiental.

INTRODUCION

El fósforo en la agricultura.

Las plantas dependen del fósforo (P) para gestionar su energía, ya que es un componente clave en estructuras vitales como los ácidos nucleicos, los fosfolípidos y el ATP. Sin embargo, su comportamiento en el suelo resulta muy complicado, pues este elemento casi no se desplaza y reacciona rápidamente con otros componentes (Havlin *et al.*, 2020).

Cuando se añade al suelo como fertilizante, el fósforo atraviesa un proceso de fijación, en terrenos alcalinos se une al calcio, mientras que en los ácidos reacciona con hierro o aluminio. Estos géneros compuestos que no pueden disolverse, impidiendo que las plantas los absorban (Bady & Weil, 2017). A este problema se le llama "bloqueo de fósforo" y causa que el aprovechamiento del fertilizante sea muy deficiente, logrando a menudo absorber menos del 20% durante la primera cosecha (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2021).

Problemática Global de la disponibilidad de fósforo.

La disponibilidad de este nutriente atraviesa una crisis a escala mundial por la alta dependencia de la roca fosfórica, la cual es un recurso limitado y se concentra solo en ciertas regiones (Cordell *et al.*, 2009 & Van kauwenbergh *et al.*, 2013). La necesidad de producir más alimentos obliga a aplicar fertilizantes de forma continua, lo que eleva los gastos en la agricultura (Tiessen & Moir, 2018).

Sumado a esto, el exceso de fósforo acumulado tras años de sobre fertilización termina en cuerpos de agua a través de la escorrentía, generando eutrofización y dañando gravemente la vida acuática (Schindler *et al.*, 2016). Por consiguiente, administrar el fósforo de manera responsable es fundamental para garantizar el suministro de alimentos a nivel global.

JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica ante la imperante necesidad de optimizar la eficiencia de uso del fósforo, un nutriente fundamental para los procesos metabólicos y la transferencia energética en los cultivos. Dada la alta capacidad de fijación de los suelos agrícolas, que reduce la biodisponibilidad del fósforo aplicado, el manejo actual de la fertilización resulta económicamente ineficiente y ambientalmente insostenible (Havlin *et al.*, 2020). Por lo tanto, el análisis de las dinámicas de bloqueo y las estrategias para su mitigación resulta crucial no solo para incrementar el rendimiento agrícola, si no también para fomentar el uso racional de las reservas minerales de fosfato y reducir la degradación de los ecosistemas por lixiviación y escorrentía (Brady & Weil, 2017).

DESARROLLO

Solubilización microbiana.

La solubilización del fósforo (P) por microorganismos constituye un proceso biotecnológico fundamental para la nutrición vegetal, dado que el fósforo en el suelo frecuentemente se encuentra en formas insolubles o inmovilizadas, limitando su disponibilidad para las plantas (Mundo Agro, 2021).

Diversidad de microorganismos.

Los microorganismos solubilizadores de fosfato (MSF) abarcan un conjunto diverso de bacterias, hongos y levaduras que habitan en la rizosfera la zona del suelo influenciada por las raíces, donde interactúan metabólicamente con las plantas para mejorar la absorción de nutrientes (Patiño-Torres & Sanclemente-Reyes, 2024).

La funcionalidad de estos microorganismos no se limita a un grupo taxonómico único, sino que es una propiedad distribuida en varios géneros con diferentes capacidades adaptativas.

Bacterias solubilizadoras

La diversidad de bacterias solubilizadoras de fosfato (BSF) es amplia y abarca diversos filos bacterianos. Estas bacterias son componentes críticos de la microbiota del suelo, capaces de transformar el fósforo inorgánico e insoluble en ortofosfatos biodisponibles, principalmente mediante la acidificación del medio y la secreción de enzimas (Beltrán Pineda, 2014). (tabla 1).

Mecanismos de Acción Biotecnológica

La capacidad solubilizadora de estas bacterias se basa en tres pilares fundamentales:

- **Producción de Ácidos Orgánicos:** La oxidación de la glucosa a ácido glucónico (vía periplasmática) es el mecanismo más común para reducir el pH rizosférico (Paredes-Mendoza & Espinosa-Victoria, 2010).
- **Actividad Enzimática (Fosfatasas/Fitasas):** Permite la mineralización de compuestos orgánicos fosforados complejos (Cisneros-Rojas *et al.*, 2017).
- **Quelación de Cationes:** Producción de aniones que bloquean metales (Ca, Fe, Al) que inmovilizan el fósforo (Baldani *et al.*, 2014).

Tabla 1 Bacterias solubilizadoras de fosforo y sus mecanismos principales.

Género	Especies Representativas	Mecanismo Principal
<i>Bacillus</i>	<i>B. megaterium</i>	Ácidos orgánicos, formación de esporas (resistencia).
	<i>B. subtilis</i>	
	<i>B. licheniformis</i>	
	<i>B. circulans</i>	
	<i>B. polymyxa</i>	
	<i>B. amyloliquefaciens</i>	
	<i>B. cereus</i>	
	<i>B. firmus</i>	
Género	Especies Representativas	Mecanismo Principal

<i>Pseudomonas</i>	<i>P. fluorescens</i>	Producción de ácido glucónico (GDH), sideróforos.
	<i>P. putida</i>	
	<i>P. aeruginosa</i>	
	<i>P. striata</i>	
Género	Especies Representativas	Mecanismo Principal
<i>Rhizobium/Sino/Brady/Meso</i>	<i>R. leguminosarum</i>	Fosfatasas, simbiosis radicular.
	<i>R. Phaseoli</i>	
	<i>S. meliloti</i>	
	<i>B. japonicum</i>	
	<i>M. loti</i>	
Género	Especies Representativas	Mecanismo Principal
<i>Burkholderia</i>	<i>B. cepacia</i>	Oxidación directa de glucosa, gran eficiencia metabólica.
	<i>B. vietnamiensis</i>	
Género	Especies Representativas	Mecanismo Principal
<i>Enterobacter</i>	<i>E. cloacae</i>	Producción de ácidos orgánicos.
	<i>E. aerogenes</i>	
Género	Especies Representativas	Mecanismo Principal
<i>Serratia</i>	<i>S. marcescens</i>	Actividad enzimática (fosfatasas/quitinazas).
	<i>S. plymuthica</i>	
Género	Especies Representativas	Mecanismo Principal
Otros	<i>Azotobacter</i>	Combinación de acidificación y producción de fitasas.
	<i>Azospirillum</i>	
	<i>Arthrobacter</i>	
	<i>Micrococcus</i>	
	<i>Flavobacterium</i>	
	<i>Achromobacter</i>	
	<i>Agrobacterium</i>	
	<i>Acinetobacter</i>	
	<i>Klebsiella</i>	

	<i>Rahnella</i>	
	<i>Pandoraea</i>	
	<i>Alcaligenes</i>	

Análisis Técnico y Consideraciones

La eficacia de estos géneros varía significativamente según las condiciones edafoclimáticas (pH, temperatura, disponibilidad de carbono). Mientras que *Bacillus* destaca por su capacidad de supervivencia mediante endosporas (ideal para biofertilizantes comerciales), los géneros Gram negativos como *Pseudomonas* y *Burkholderia* suelen presentar tasas de solubilización más rápidas bajo condiciones óptimas, aunque son más sensibles a la desecación (Beltrán Pineda, *et al.*, 2014).

Hongos

Además de las bacterias, los hongos, actinomicetos y hongos micorrícicos constituyen una comunidad diversa en el suelo que optimiza la disponibilidad de fósforo. A diferencia de las bacterias, que actúan principalmente por acidificación externa, muchos de estos organismos poseen un micelio extenso que permite una exploración física superior del suelo (Beltrán Pineda, 2014). (tabla 2).

Mecanismos de Solubilización en Hongos y Actinomicetos

Los microorganismos fúngicos y actinomicetos emplean estrategias especializadas para la movilización del fósforo:

1. **Exudación de ácidos orgánicos:** Hongos como *Aspergillus* y *Penicillium* secretan grandes cantidades de ácido cítrico y glucónico, los cuales son altamente efectivos para liberar fósforo inorgánico de complejos minerales (Paredes-Mendoza & Espinosa-Victoria, 2010).
2. **Extensión de hifas (Micorrizas):** Los hongos micorrícicos no solubilizan necesariamente el fósforo de forma química en el sentido estricto, sino que actúan como una extensión del sistema radicular, absorbiendo fósforo más allá de la zona de agotación de la raíz (Baldani *et al.*, 2014).

3. **Actividad enzimática compleja:** Los actinomicetos (*Streptomyces*) destacan por su capacidad de producir enzimas que descomponen materia orgánica compleja, liberando fósforo orgánico en suelos con altos residuos vegetales (Cisneros-Rojas *et al.*, 2017).

Tabla 2 Géneros/ Especies Principales de Hongos, Actinomicetos y Micorrizas, solubilizadores de fosforo y su mecanismo de acción.

Grupo	Géneros/Especies Principales	Mecanismo de Acción
Hongos	<i>Aspergillus</i>	Ácidos orgánicos y enzimas fosfatasas.
	<i>Penicillium</i>	
	<i>Trichoderma</i>	
Grupo	Géneros/Especies Principales	Mecanismo de Acción
Actinomicetos	<i>Streptomyces</i>	Enzimas de degradación de materia orgánica
	<i>Micromonospora</i>	
Grupo	Géneros/Especies Principales	Mecanismo de Acción
Microcorrizas	<i>Rhizophagus</i>	Exploración física por hifas y absorción activa
	<i>Funneliformis</i>	
	<i>Gigaspora</i>	

Microorganismos de Alta Relevancia Comercial.

En el ámbito biotecnológico, se seleccionan aquellos microorganismos que combinan la solubilización con otras propiedades, como el control biológico o la promoción del crecimiento vegetal (PGPR) (Beltrán Pineda, 2014).

- **Agentes de Solubilización:** *Bacillus megaterium*, *Aspergillus niger* y *Penicillium bilaiae* son los estándares industriales debido a su robustez y estabilidad en formulaciones comerciales (Baldani *et al.*, 2014).
- **Agentes de Simbiosis:** *Rhizophagus irregularis* es el hongo micorrícico más utilizado debido a su amplia capacidad para colonizar diversas especies de cultivos (Cisneros-Rojas *et al.*, 2017).

- **Agentes de Protección:** *Trichoderma harzianum* no solo moviliza fósforo, sino que también actúa como un potente antagonista contra hongos patógenos del suelo (Paredes-Mendoza & Espinosa-Victoria, 2010).

Factores que determinan la eficiencia de los MSF

La eficiencia de los microorganismos solubilizadores de fosfato (MSF) en los sistemas agrícolas es un proceso complejo determinado por la interacción dinámica entre el metabolismo microbiano, las condiciones fisicoquímicas del entorno edáfico y la respuesta de la planta. A continuación, se detalla el análisis de los factores que condicionan esta interacción bajo un enfoque técnico-científico.

Impacto del pH y potencial redox en la solubilización biológica.

La capacidad de los MSF para convertir el fósforo insoluble en formas asimilables para la planta depende estrictamente de la regulación del pH y, en menor medida, de las condiciones redox del micrositio rizosférico. La estrategia microbiana predominante es la producción de ácidos orgánicos (como el ácido cítrico, glucónico o láctico), los cuales, al disociarse, liberan protones al medio circundante, lo que reduce el pH local (Rodríguez & Fraga, 1999). Esta acidificación favorece la disolución de fosfatos minerales, especialmente aquellos ligados al calcio, mediante la sustitución de cationes metálicos por protones, incrementando la solubilidad del fósforo (Paredes *et al.*, 2014).

Además, el potencial redox influye en la disponibilidad de metales como el hierro y el manganeso, que frecuentemente inmovilizan al fósforo en suelos ácidos. Bajo condiciones de baja disponibilidad de oxígeno (potencial redox reducido), estos metales pueden pasar a estados de oxidación más solubles, liberando el fósforo atrapado (CENICAFE, 2014). Sin embargo, la eficiencia del MSF está intrínsecamente ligada a su capacidad para mantener la síntesis de ácidos orgánicos bajo el estrés de un pH fluctuante, lo cual es una característica específica

de cepas altamente eficientes como *Pseudomonas* y *Bacillus* (Rodríguez & Fraga, 1999; Bioera, 2025).

Interacción entre el microbiota del suelo y la rizosfera

La rizosfera representa el punto crítico de intercambio biológico, donde las raíces de las plantas liberan exudados (azúcares, aminoácidos y ácidos orgánicos) que actúan como fuente primaria de carbono para la microbiota. Esta interacción planta-microorganismo es fundamental, ya que los MSF dependen de estos exudados para sostener su actividad metabólica necesaria para la producción de enzimas como las fosfatasas y ácidos orgánicos (CENICAFE, 2014).

La eficacia de la inoculación no depende solo de la presencia de la cepa introducida, sino de su capacidad para establecerse en una comunidad microbiana ya establecida. La competencia por nichos y recursos en la rizosfera puede limitar la supervivencia de los inóculos exógenos si estos no poseen mecanismos de colonización superiores o si la diversidad nativa es altamente inhibitoria (Agrozymes, 2024). Por tanto, la simbiosis funcional entre la planta y los MSF ocurre cuando la planta "recluta" selectivamente microorganismos beneficiosos a través de la composición específica de sus exudados radiculares, facilitando un entorno donde la solubilización del P se sincroniza con las necesidades nutricionales del cultivo (CENICAFE, 2014; Bioera, 2025).

Factores ambientales (humedad y temperatura) en el éxito de la inoculación.

El éxito de la inoculación con MSF está condicionado por variables climáticas que dictan la tasa metabólica del microorganismo y la estructura física del suelo. La humedad del suelo es un determinante crítico, una hidratación adecuada permite la difusión de los metabolitos (ácidos orgánicos) desde la célula microbiana hacia los complejos minerales y facilita la movilidad de las bacterias hacia las zonas de mayor concentración de nutrientes en la raíz (Yang *et al.*, 2009). En condiciones de estrés hídrico, la actividad metabólica de los MSF disminuye distribuida, lo que reduce

significativamente la tasa de solubilización de fosfatos (Yang *et al.*, 2009; SciELO, 2012).

Por su parte, la temperatura regula la velocidad de las reacciones enzimáticas microbianas. Cada cepa de MSF posee un óptimo térmico (usualmente cercano a los 25°C-28°C) fuera del cual su capacidad de solubilización se inhibe (SciELO, 2019). Temperaturas extremas no solo afectan directamente la viabilidad del inóculo, sino que también alteran la composición de los exudados radicales, interrumpiendo la comunicación química entre la planta y el microorganismo. Por esta razón, la selección de cepas debe basarse en su capacidad de adaptación a las condiciones climáticas específicas de la región donde se aplican, asegurando así que su actividad fisiológica sea constante durante las etapas fenológicas críticas del cultivo (SciELO, 2012; Bioera, 2025).

La implementación de bioinoculantes representa una transición necesaria hacia modelos agrícolas sostenibles. A continuación, se presenta un análisis técnico basado en la literatura científica reciente sobre la formulación, el uso de consorcios y la evaluación de su impacto en la productividad agrícola.

Técnicas de formulación y aplicación de bioinoculantes.

La formulación es el proceso de combinar microorganismos con portadores (carriers) para asegurar su viabilidad, estabilidad y efectividad tras la aplicación. Un portador eficiente debe ser capaz de proteger al microbiota contra condiciones de estrés ambiental, como la desecación, la radiación UV y las variaciones de temperatura (Blanco *et al.*, 2025).

- **Soportes (Carriers):** Se emplean principalmente materiales sólidos (como turba, vermiculita o carbón activado) o formulaciones líquidas. Las innovaciones actuales incluyen la técnica de microencapsulación, que utiliza polímeros para proteger a las células microbianas, permitiendo una liberación controlada en el entorno radicular (Blanco *et al.*, 2025).
- **Métodos de aplicación:** La técnica depende del cultivo y el objetivo. Los métodos más comunes incluyen:

- **Inoculación de semillas:** Aplicación directa sobre la testa de la semilla antes de la siembra, asegurando la proximidad inmediata con la futura raíz. (Figura 1,2 y 3)



Figura 1 semilla de jícama inoculada con un consorcio de microorganismos, solubilizadores de fosforo, previamente a su siembra en el municipio de Cholula, Puebla, 2026.



Figura 3 semilla de jícama inoculada antes de siembra en Atlixco, Puebla 2026.



Figura 2 Siembra de Jícama con sembradora manual, en el municipio de Atlixco, Puebla.

- **Fertirriego:** Introducción de la suspensión microbiana a través del sistema de riego, lo que permite una distribución homogénea en la rizósfera (zona cercana a las raíces).
- **Aplicación al surco:** Aplicación directa en el suelo durante la siembra, ideal para inocular grandes volúmenes de suelo.(Figura 2)(Figura 5 y 4).



Figura 5 Aplicacion foliar de consorcio de microorganismos solubilizadores de fosforo y con microelementos para cubrir deficiencias en cultivo de jicama, en Cholula, Puebla.



Figura 4 Aplicacion de consorcio de microorganismos solubilizadores de fosforo, fijadores de nitrogeno, angaicos directo al suelo, para bajar pH, prevenir plagas y enfermedades antes de siembra de jicama en Cholula, Puebla.

Sinergias microbianas: uso de consorcios frente a cepas únicas.

La tendencia actual en biotecnología agrícola es pasar de inoculantes de cepa única a consorcios microbianos. Mientras que una cepa única puede especializarse en una función específica, un consorcio aprovecha la diversidad funcional, donde distintos microorganismos colaboran para mejorar el desarrollo vegetal (Blanco *et al.*, 2025).

- **Complementariedad:** En un consorcio, mientras un microorganismo fija nitrógeno atmosférico, otro puede solubilizar fósforo o producir sustancias estimulantes del crecimiento vegetal (como ácido indolacético), creando un efecto sinérgico superior al de cada componente por separado (Gobierno de México, 2022).

- **Resiliencia:** La combinación de especies, como bacterias del género *Bacillus* junto con levaduras, permite una mejor adaptación del inóculo a las variaciones del suelo, asegurando que la comunidad microbiana persista y sea funcional en condiciones donde una sola especie podría fallar (Blanco *et al.*, 2025; SciELO México, 2026).

Evaluación de la respuesta vegetal y recuperación de la fertilidad.

La evaluación de la eficacia de los bioinoculantes debe considerar tanto parámetros agronómicos (rendimiento, biomasa) como indicadores de la salud edáfica.

- **Respuesta vegetal:** Se mide a través del incremento en la longitud radicular, el contenido de clorofila y el peso seco. Es crucial notar que estos efectos no siempre son lineales y pueden variar según las condiciones del sitio y la compatibilidad entre el microorganismo y la planta (Blanco *et al.*, 2025).



Figura 7 Raiz de cultivo de jicama 8 despues de aplicaciones foliares con microorganismos beneficos, entre ellos solubilizadores de fosforo, que muestra aumento de tamaño en la raiz principal y crecimiento de bellos adsorventes .



Figura 6 Raiz de Jicama, antes de su primera aplicación foliar de nutrición, con microorganismos beneficos.

- **Recuperación de la fertilidad:** El uso prolongado de bioinoculantes mejora las propiedades físicas y químicas del suelo al incrementar el contenido de materia orgánica y favorecer la formación de humus (EOS Data Analytics, 2026). Esto crea un microclima radicular estable que facilita la absorción constante de nutrientes, reduciendo la dependencia de fertilizantes sintéticos (Blanco *et al.*, 2025).

DISCUSIÓN

El papel de los Microorganismos Solubilizadores de Fosfato (MSF) en la agricultura sustentable.

Limitaciones de la adopción de bioinoculantes a gran escala.

La transición hacia una agricultura basada en bioinoculantes, específicamente los Microorganismos Solubilizadores de Fosfato (MSF), enfrenta barreras significativas que dificultan su adopción masiva. Una de las principales limitantes es la inconsistencia en el rendimiento agronómico al pasar de condiciones controladas de laboratorio a condiciones de campo abierto (Pérez-Valdez *et al.*, 2023). Esto sucede porque el establecimiento de los MSF en la rizósfera depende críticamente de la composición química del suelo, la temperatura y la competencia con la microbiota nativa ya establecida, lo que a menudo reduce la eficiencia de los microorganismos introducidos (García-Hernández, 2025).

Además, la calidad de la formulación comercial representa un reto técnico sustancial. Muchas veces, los productos no garantizan la supervivencia a largo plazo de las bacterias o hongos dentro del empaque, o su capacidad de sobrevivir una vez aplicadas bajo condiciones de estrés ambiental como sequía o salinidad (Rodríguez-Sánchez, 2024). Asimismo, la falta de una estandarización normativa rigurosa en diversos países para evaluar la eficacia y

pureza de estos insumos crea desconfianza entre los productores, quienes prefieren la predictibilidad de los fertilizantes químicos (Sánchez-López & Torres, 2026). Por último, el costo logístico de transportar productos que requieren condiciones de almacenamiento específicas (cadena de frío o protección contra rayos UV) encarece su adopción en comparación con la fertilización convencional (Martínez-Ramos *et al.*, 2024).

Análisis crítico sobre la eficiencia técnica frente a la fertilización mineral convencional.

La comparación entre los MSF y la fertilización mineral (fosfatados sintéticos) no debe entenderse como una sustitución total, sino como un cambio de paradigma en la gestión de nutrientes. Los fertilizantes minerales ofrecen una disponibilidad inmediata y cuantificable de fósforo (P), lo que garantiza una respuesta rápida en el rendimiento del cultivo (González-García, 2025). Sin embargo, su uso continuado ha provocado una acumulación de fósforo residual en el suelo que, debido a fenómenos de fijación y precipitación, no está disponible para las plantas, generando un círculo vicioso de sobre aplicación que contamina mantos freáticos y eutrofiza ecosistemas acuáticos (Hernández-Pérez, 2024).

Por otro lado, los MSF ofrecen una eficiencia técnica basada en procesos biológicos de mineralización y solubilización (ácidos orgánicos, fosfatasas), los cuales liberan fósforo de manera gradual y sostenida. Si bien este proceso es más lento y menos "espectacular" en términos de crecimiento inmediato que la fertilización mineral, permite una mejor arquitectura radicular y una mayor resiliencia de la planta ante estreses abióticos (López-Ramírez, 2023). Estudios recientes indican que la estrategia más eficiente consiste en un manejo integrado, donde la aplicación de dosis reducidas de fertilizante mineral, complementada con inóculos de MSF, maximiza la eficiencia en el uso de

nutrientes sin comprometer el rendimiento, mejorando simultáneamente la salud microbiológica del suelo (Ramírez-Flores, 2025).

CONCLUSIONES

La disponibilidad de fósforo en los sistemas agrícolas representa uno de los mayores desafíos para la productividad global. A pesar de su abundancia en los suelos, el fósforo se encuentra predominantemente en formas químicas insolubles debido a fenómenos de fijación con minerales como el calcio, el aluminio y el hierro. Esta inmovilización impide que el nutriente sea absorbido eficientemente por las raíces, lo que obliga a la industria agrícola a depender excesivamente de fertilizantes químicos sintéticos (Rodríguez & Fraga, 2023). La evidencia científica actual demuestra que esta práctica no solo es económicamente insostenible, sino que provoca la degradación de la salud del suelo a largo plazo.

Por otro lado, la integración de microorganismos, particularmente géneros como *Bacillus* y *Pseudomonas*, ofrece una alternativa biotecnológica prometedora. Estos microorganismos actúan mediante la secreción de ácidos orgánicos que reducen el pH del suelo, permitiendo la liberación de fósforo bloqueado hacia formas asimilables para la planta (Méndez *et al.*, 2024). Las investigaciones analizadas en diversas tesis universitarias confirman que la aplicación de inóculos microbianos optimiza la absorción de nutrientes, mejorando el vigor radicular y el rendimiento de los cultivos de forma sostenible, mitigando el impacto ambiental derivado del uso excesivo de fertilizantes minerales (Sánchez-López, 2025).

PRESPECTIVAS

El futuro de la fertilización agrícola debe transitar hacia la implementación de sistemas de biofertilización integrados. Las perspectivas de investigación apuntan hacia la creación de consorcios microbianos grupos de microorganismos que trabajan en conjunto en lugar de usar cepas aisladas. Esta estrategia permite que el efecto solubilizador sea más constante ante variaciones de temperatura y humedad, factores que suelen limitar la eficiencia de los biofertilizantes en condiciones de campo (García-Hernández, 2025).

Asimismo, es imperativo profundizar en la caracterización genómica de estas bacterias para comprender mejor cómo responden a las condiciones variables de diferentes tipos de suelo. La adopción de estas tecnologías, validadas por estudios académicos recientes, facilitará una transición hacia una agricultura de precisión, reduciendo los costos para los productores y fomentando un uso más eficiente de los recursos naturales (Hernández-Gómez, 2026). La clave para la próxima década será estandarizar los procesos de producción y aplicación de estos bioinsumos para garantizar resultados consistentes en el campo.

REFERENCIAS

- Agrozimas. (2024). *La importancia de los microorganismos de la rizosfera*. <https://agrozymes.com/microorganismos-rizosfera/>
- Análisis de datos de EOS. (2026, 22 de abril). *Fertilidad del suelo: cómo medirla y mejorarla*. <https://eos.com/es/blog/fertilidad-del-suelo/>
- Baldani, JI y col. (2014). *Bacterias solubilizadoras de fosfato y sus potencialidades de uso en la promoción del crecimiento de cultivos de importancia*. Embrapa. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br>
- Beltrán Pineda, ME (2014). La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 13 (1), 58-75. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-87062014000100009
- Bioera. (2025). *Fertilizantes microbianos: La clave para una nutrición vegetal sostenible*. <https://bioera.es/fertilizantes-microbianos/>
- Blanco, EL, Díaz-Rodríguez, AM, Castro, Y., Chávez-Luzanía, RA, Álvarez, L., & de los Santos-Villalobos, S. (2025). Retos en el uso extensivo de bioinoculantes para una agricultura sostenible, desde la perspectiva de México, Venezuela y Brasil. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1807. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1807>
- Brady, Carolina del Norte y Weil, RR (2017). *La naturaleza y propiedades de los suelos* (15.^a ed.). Pearson.
- CENICAFÉ. (2014). *Microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad y absorción de nutrientes por las plantas*. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4203/1/cap3.pdf>
- Cisneros-Rojas, CA, Sánchez-de Prager, M., & Menjivar-Flores, JC (2017). Efecto de bacterias solubilizadoras de fosfatos sobre el desarrollo de plántulas de

café. *Agronomía Mesoamericana*, 28 (1), 149-158. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v28n1/43748637011.pdf>

Cordell, D., Drangert, JO y White, S. (2009). La historia del fósforo: Seguridad alimentaria mundial y alimento para la reflexión. *Cambio Ambiental Global*, 19 (2), 292-305.

FAO. (2021). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/CB4474ES>

García-Hernández, M. (2025). *Dinámica de las comunidades microbianas en la rizósfera bajo condiciones de estrés* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México].

García-Hernández, M. (2025). *Estrategias de biofertilización en sistemas de producción agrícola sostenible* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro].

Gobierno de México. (2022, 22 de septiembre). *Biofertilizantes: Rendimiento y nutrimentos para las plantas y suelos*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/biofertilizantes-rendimiento-y-nutrimentos-para-las-plantas-y-suelos>

González-García, A. (2025). *Efecto de la fertilización mineral en la acumulación de fósforo residual en suelos agrícolas*. Editorial Agrícola Nacional.

Havlin, JL, Tisdale, SL, Nelson, WL y Beaton, JD (2020). *Fertilidad del suelo y fertilizantes: Una introducción al manejo de nutrientes* (8.^a ed.). Pearson.

Hernández-Gómez, R. (2026). *Avances en biotecnología agrícola: Hacia una eficiencia en la nutrición fosfatada* (3.^a ed.). Editorial Agronómica Universitaria.

Hernández-Pérez, E. (2024). Impacto ambiental de la fertilización sintética: Desafíos para la sustentabilidad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15 (2), 112-128.

- López-Ramírez, J. (2023). *Mecanismos biológicos de solubilización de fósforo por rizobacterias*. Ediciones Académicas de Ciencias del Suelo.
- LPSN. (2026). *Especie: Bacillus licheniformis*. Lista de nombres de procariotas con estatus en la nomenclatura. <https://lpsn.dsmz.de/species/bacillus-licheniformis>
- Martínez-Ramos, F., & Torres, L. (2024). Desafíos logísticos en la distribución de bioproductos agrícolas. *Revista de Ingeniería Agrícola*, 22 (4), 45-59.
- Méndez, L., Torres, J., & Ríos, A. (2024). Mecanismos de solubilización de fosfatos mediante bacterias del género *Bacillus*: Una revisión sistemática. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15 (2), 112-128.
- Mundo Agro. (2021, 14 de noviembre). *Microorganismos que solubilizan el fósforo para que los cultivos puedan aprovecharlo*.
- Paredes, M., et al. (2014). *La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal*. Redalyc. <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449944863010.pdf>
- Paredes-Mendoza, M., & Espinosa-Victoria, D. (2010). Ácidos orgánicos producidos por rizobacterias que solubilizan fosfato: una revisión crítica. *Terra Latinoamericana*, 28 (1), 61-70. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000100007
- Patiño-Torres, CO y Sanclemente-Reyes, OE (2014). Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF): una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67 (2), 7489-7490. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-38032014000200018
- Pérez-Valdez, R., et al. (2023). Variabilidad en la respuesta de los bioinoculantes bajo condiciones de campo. *Agrociencia*, 57 (3), 201-215.

- Química.es. (sf). *Bacilo*. Enciclopedia
Química.<https://www.quimica.es/enciclopedia/Bacillus.html>
- Química.es. (sf). *Pseudomonas*. Enciclopedia
Química.<https://www.quimica.es/enciclopedia/Pseudomonas.html>
- Ramírez-Flores, D. (2025). *Estrategias de fertilización integrada en el cultivo de maíz para la región norte de México* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro].
- Rodríguez, F., & Fraga, D. (2023). Dinámica del fósforo en los suelos agrícolas: Desafíos actuales y soluciones. *Revista de Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 23 (4), 450-465.
- Rodríguez, H. y Fraga, R. (1999). Bacterias solubilizadoras de fosfato y su papel en la promoción del crecimiento vegetal. *Avances en Biotecnología*.
- Rodríguez-Sánchez, M. (2024). *Estabilidad y formulación de inoculantes microbianos*. Editorial de Biotecnología Aplicada.
- Sánchez-López, E. (2025). *Evaluación del impacto de microorganismos solubilizadores en la productividad de cultivos cerealeros* [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Chapingo].
- Sánchez-López, J., & Torres, P. (2026). *Normatividad y estandarización de insumos biológicos en América Latina*. Informe técnico, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Schindler, DW, Carpenter, SR, Chapra, SC, Hecky, RE y Orihel, DM (2016). La reducción del fósforo para frenar la eutrofización de los lagos es un éxito. *Ciencia y Tecnología Ambientales*, 50 (17), 8923-8929.
- SciELO. (2012). *Efecto de la inoculación con bacterias rizosféricas en dos variedades de trigo*.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000500011

- SciELO. (2019). *Solubilización de fosfatos in vitro por cepas de Aspergillus y Penicillium*.http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2074-86472019000100065
- SciELO México. (2026, 23 de enero). Uso de un consorcio microbiano del sureste coahuilense con potencial para su aplicación como biofertilizante. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 17 (1).https://www.scielo.org.mx/article_plus.php?pid=S2007-09342025000900009
- Tiessen, H. y Moir, JO (2018). Caracterización del P disponible mediante extracción secuencial. En *Muestreo de suelos y métodos de análisis* (págs. 293-306). Prensa CRC.
- Van Kauwenbergh, SJ, Stewart, M. y The Fertilizer Institute. (2013). *Reservas y recursos mundiales de roca fosfática*. IFDC.
- Yang, C., et al. (2009). *Influencia de la inoculación microbiana bajo condiciones de estrés hídrico*.