



Las rizobacterias y su interacción con el fósforo del suelo

Marco Polo Carballo Sánchez*
Juan José Almaraz Suárez
Sara Monzerrat Ramírez Olvera

Posgrado en Edafología. Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Texcoco, Estado de México.

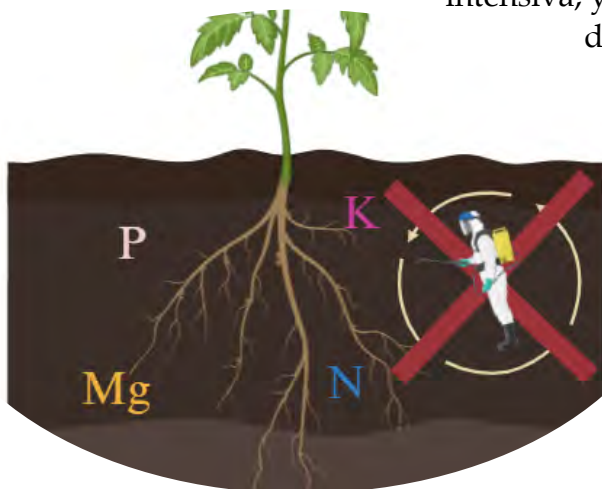
*Autor para correspondencia: carballo.marco@colpos.mx

Las plantas, al igual que todos los seres vivos, requieren nutrirse para tener un desarrollo óptimo. Entre todos los elementos minerales esenciales que necesitan, el fósforo es importante debido a que forma parte de muchas moléculas necesarias para la vida. Cuando la planta tiene dificultades para aprovecharlo del suelo, estas se asocian con rizobacterias que le facilitan esta tarea.



Introducción

El fósforo es un elemento necesario para el desarrollo de las plantas, ya que forma parte de diversas macromoléculas esenciales. Por esta razón, en las actividades agrícolas es prioridad incorporarlo a los cultivos mediante la aplicación de fertilizantes químicos u otras fuentes utilizadas en la agricultura orgánica, como es la roca fosfórica. A pesar de que el fósforo es abundante en el suelo, ¿por qué es necesario suplementar los cultivos con él? Una de las razones es la agricultura intensiva, ya que la demanda es elevada y agota las reservas disponibles rápidamente. Otro aspecto importante es la perturbación de los ciclos naturales, ya que un ecosistema el fósforo regresa al suelo mediante la descomposición de la materia orgánica; en el manejo agronómico no sostenible las plantas producidas y los productos cosechados no son reincorporados de nuevo al sistema y de esta manera se interrumpe el ciclo.





Finalmente, una razón fundamental es porque las plantas solo pueden absorber el fósforo en forma de fosfato (H_2PO_4^- o HPO_4^{2-}) y se estima que sólo el 0.1% del fósforo está disponible para ser aprovechado por ellas. El resto se encuentra inmovilizado en la materia orgánica en una proporción del 20 al 80% del fósforo total o en formas inorgánicas insolubles, por lo que la fracción soluble debe renovarse a través de ciclos biogeoquímicos que ocurren de manera lenta.



La importancia de conocer los factores que contribuyen al aprovechamiento del fósforo para la agricultura implica el estudio de factores bióticos y abióticos del suelo, en este caso hablamos de los microorganismos del suelo. Este es un factor biológico fundamental, ya que forman parte de las interacciones ecológicas entre organismos de diferentes reinos, ya que en el suelo se puede encontrar macrofauna (insectos y pequeños mamíferos), mesofauna (ácaros, colémbolos, tardígrados y nemátodos), microfauna (bacterias, hongos, protozoarios y virus). En la actualidad, muchos estudios que hablan del efecto de rizobacterias y hongos micorrízicos en promover el crecimiento vegetal y favorecer la disponibilidad del fósforo para las plantas, esto es debido a que ambos organismos tienen la capacidad para solubilizarlo para el aprovechamiento propio y de la planta. Algunas bacterias contribuyen a la colonización micorrízica, los hongos micorrízicos son simbioses obligados a la planta y no pueden sobrevivir si no están asociados a ella. En este trabajo, nos enfocaremos en los mecanismos de las bacterias.

Desarrollo

Aspectos acerca de la química del fósforo

El fósforo es un elemento químico que se puede encontrar clasificado en la tabla periódica como no metal, en el grupo VA ó 15, el mismo que el nitrógeno, otros metaloides como el arsénico y el antimonio, así como con metales como el bismuto y el moscovio.



El fósforo se encuentra en la naturaleza en formas sólidas formando óxidos (como el fosfato) y complejos moleculares, esto debido a que el fósforo elemental reacciona con el oxígeno del ambiente. Algunas características de su átomo es que, aunque tiene estados de oxidación de -3 y +3, su electronegatividad no le permite formar un triple enlace entre dos átomos (como el nitrógeno), al menos a condiciones atmosféricas y temperatura ambiente. Sin embargo, el orbital *d* le permite expandirse y tener el estado de oxidación de +5, esta es la forma más común en la que se encuentra y que le permite formar complejos con otras moléculas. Existe un rango óptimo de pH en el que el fósforo está disponible y este es de 6 a 7, fuera de dicho rango se favorece la formación de complejos insolubles. Dentro de las formas inorgánicas insolubles del fósforo, se pueden encontrar formando complejos con hierro y aluminio en suelos ácidos, así como complejos con calcio en suelos alcalinos. En la Figura 1 se enlistan algunas formas inorgánicas del fósforo que son insolubles, su origen y su fórmula química.



Figura 1. Fosfato inorgánico insoluble en sus diversas formas y con las fórmulas químicas que los representan.

La gran diferencia entre el fósforo y otros elementos de los ciclos biogeoquímicos como el nitrógeno y el azufre es que no ocurre una transición al estado gaseoso, por lo que su movilidad en los ecosistemas es más reducida y es propenso a formar compuestos que no permiten ser aprovechados por los seres vivos.



Relevancia del fósforo en las plantas

El fósforo es parte de diversas moléculas relevantes para el desarrollo vital no sólo de las plantas, sino de todos los seres vivos. Para las plantas, el fósforo es crucial en etapas de desarrollo como la germinación, el desarrollo de las raíces y la floración. En la Figura 2 se pueden observar dichas moléculas y en las siguientes líneas una explicación breve respecto a su importancia biológica.

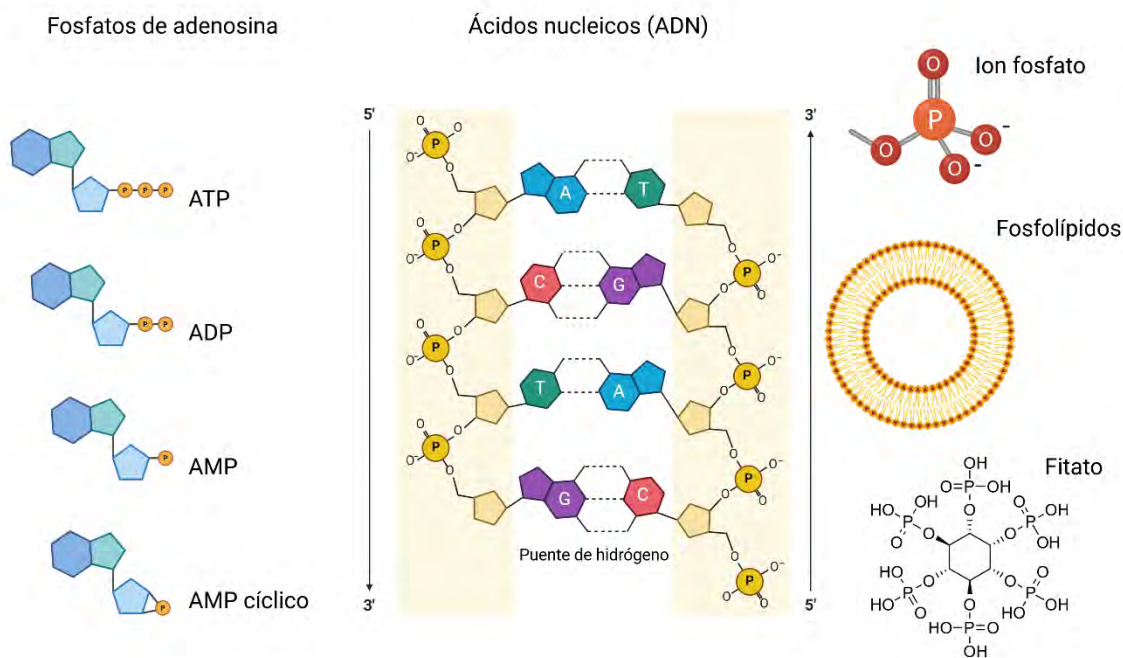


Figura 2. Presencia del fósforo en moléculas esenciales para las plantas.

Estructurales

El fósforo es parte de los ácidos nucleicos: ácido desoxirribolucleico (ADN) y ácido ribonucleico (ARN), las cuales son macromoléculas que en el caso del ADN permiten el almacenamiento, la transmisión de generación en generación y la implementación de la programación genética, la cual es fundamental para el desarrollo y las funciones de los organismos vivos. Una molécula de ADN almacena información biológica en forma de código genético y consiste en una secuencia de nucleótidos y las conexiones entre dichos nucleótidos están formadas por enlaces fosfodiéster. El ADN principalmente contiene la información para la síntesis de proteínas y varios tipos de ARN.



Las membranas celulares están compuestas por fosfolípidos, los cuales son moléculas compuestas de un fosfato y dos cadenas largas de lípidos. Esta propiedad le permite ser anfipática, es decir, que puede interactuar en entornos hidrofílicos e hidrofóbicos.

Metabólicas

El fósforo es parte de los fosfágenos, los cuales son las moléculas del fósforo que se encuentran en los seres vivos realizando funciones metabólicas. Algunas de ellas son capaces de almacenar y transferir energía para llevar a cabo reacciones químicas, como es el caso del ATP. También cumplen con la función de señalización química, como es el caso del AMP cíclico. El trifosfato de adenosina (ATP) es una molécula de almacenamiento de energía que es necesaria para la fotosíntesis y otros procesos.

Fitoquímicas

Los fitatos son compuestos orgánicos de fósforo, provenientes del ácido fítico y que son una fuente de almacenamiento de fósforo en tejidos vegetales, especialmente en semillas. Estas moléculas tienen la capacidad de unirse fuertemente a iones de calcio, hierro y zinc, por lo que es considerado un antinutriente cuando los humanos y los animales se alimentan de vegetales ricos en fitatos. Para eliminar este compuesto en los vegetales donde abunda, éstos se deben cocinar antes de su consumo.



El fósforo y su deficiencia

Las plantas poseen mecanismos para poder mejorar sus condiciones cuando presentan deficiencia de fósforo, éstas se pueden observar en la Figura 3. En esencia se privilegia la estructura radical respecto a la parte aérea para poder mejorar su absorción, realizando un gasto energético y de recursos adicional y así lograr su supervivencia

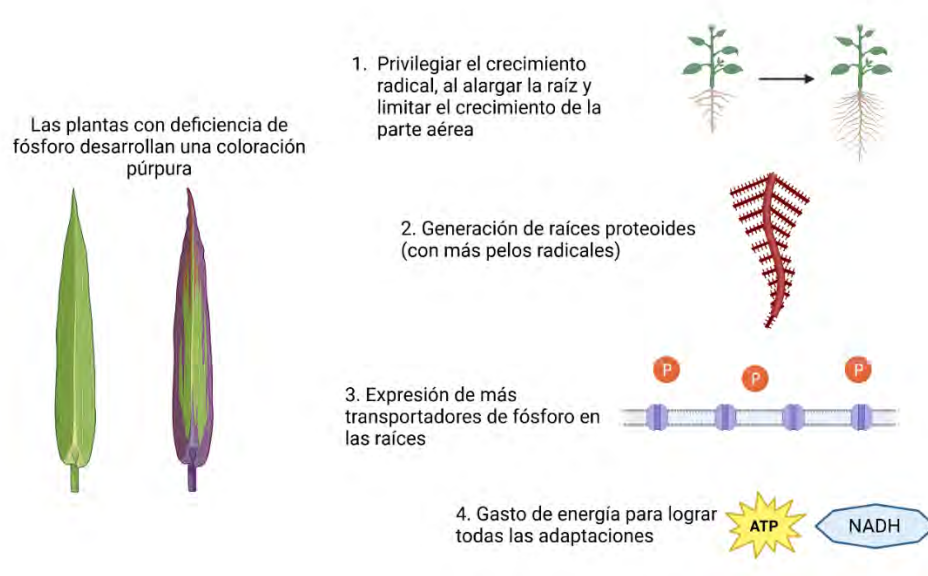
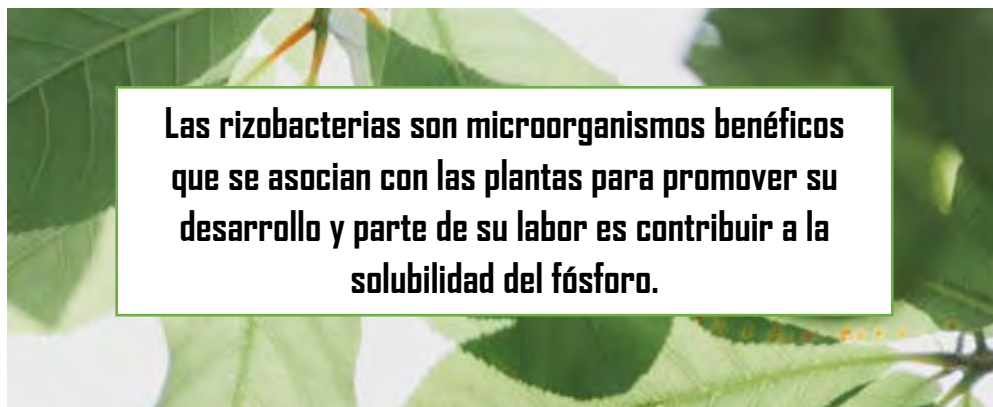


Figura 3. Estrategias de las plantas para la adaptación a la deficiencia del fósforo.

El papel de las bacterias en el aprovechamiento del fósforo: mecanismos para su solubilización.

El fósforo que no se encuentra disponible para su absorción debe ser sometido a diversas transformaciones para poder ser aprovechado. En la Figura 4 se puede observar un esquema respecto a la manera en la que se procesa el fósforo en la rizósfera. En esencia, las formas insolubles deben procesarse para poder ser aprovechadas, tanto las bacterias como algunas plantas tienen mecanismos para llevar a cabo este proceso.





Es importante mencionar que los suelos ricos en materia orgánica contribuyen a la inmovilización del fósforo, ya que dicha materia orgánica es parte del ciclo en el que el fósforo es convertido continuamente a formas solubles por medio de organismos detritívoros para el aprovechamiento de plantas y microorganismos, quienes al final de su ciclo de vida se convierten en detritos que son fuente de fósforo insoluble y que requieren ser procesados de nuevo por otros microorganismos. Para la degradación de compuestos orgánicos de fósforo se requiere de la acción de fosfatasa, las cuales son una familia de enzimas hidrolíticas que son producidas tanto por hongos como por bacterias. Las fosfatasa, junto con las lipasa, celulasas, proteasa, quitinasas, peroxidasa (por mencionar las más relevantes) son parte de las enzimas que degradan la materia orgánica y que permiten reincorporar elementos a los ciclos biogeoquímicos.

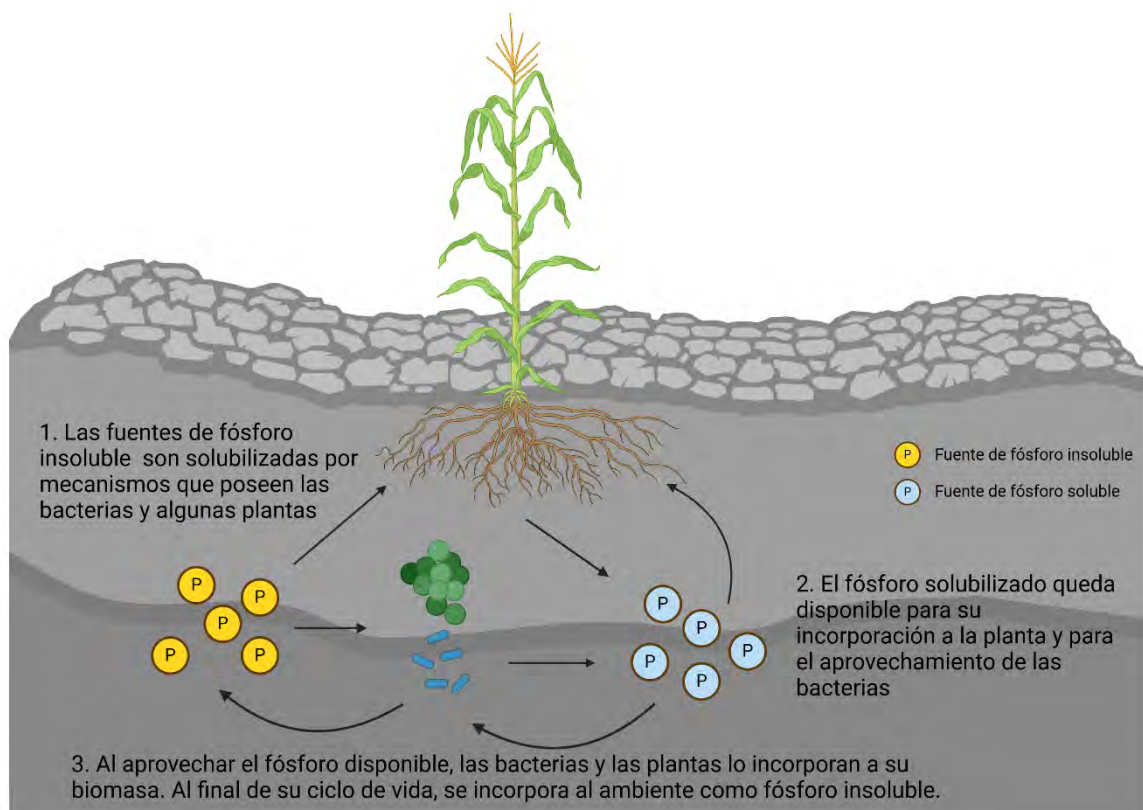


Figura 4. Aprovechamiento de formas solubles e insolubles del fósforo por parte de las plantas y rizobacterias.

Se puede apreciar en la figura 5 un esquema de los mecanismos de degradación de formas insolubles de fósforo. Uno de los mecanismos solubilizadores se basa en la presencia de ácidos orgánicos.



Dichos ácidos son producidos por las bacterias de manera extracelular, tanto para beneficio de la planta como de la bacteria misma, la planta promueve las actividades benéficas de las bacterias a cambio de productos de la fotosíntesis que les sirven de alimento.

Ambas se benefician con los ácidos debido a que permiten inhibir a otros microorganismos (a los patógenos, por ejemplo), sirven como sustrato a otras bacterias, son agentes quelantes de iones metálicos y forman parte de las interacciones químicas de las bacterias en la zona de influencia de la raíz tanto con las plantas como con otros microorganismos. Algunos de esos ácidos son el cítrico, fórmico, acético, oxálico, isovalérico, butírico, glucónico, succínico, entre otros; si recordamos nuestras lecciones de bioquímica general, algunos de estos ácidos forman parte del ciclo de Krebs. ¿Cómo es que las bacterias obtuvieron la capacidad de poder solubilizar fosfatos? Esto es mediante la transferencia horizontal de genes: una comunidad microbiana va a compartir, con quienes tienen más afinidad, las características favorables que les permiten subsistir, como la versatilidad de su metabolismo para la nutrición, para la producción de antibióticos, sideróforos, enzimas extracelulares, entre otras.

Un porcentaje elevado del fósforo se encuentra en formas insolubles, por lo que se requieren mecanismos para favorecer su solubilidad.

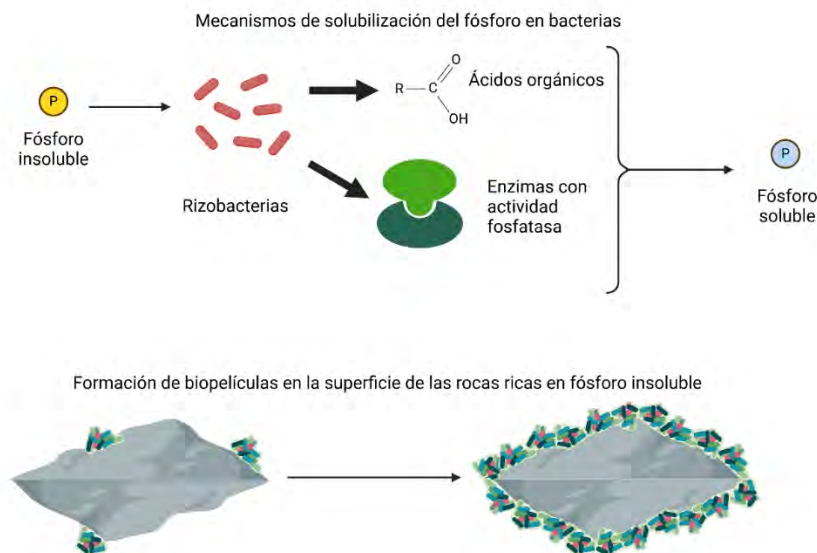
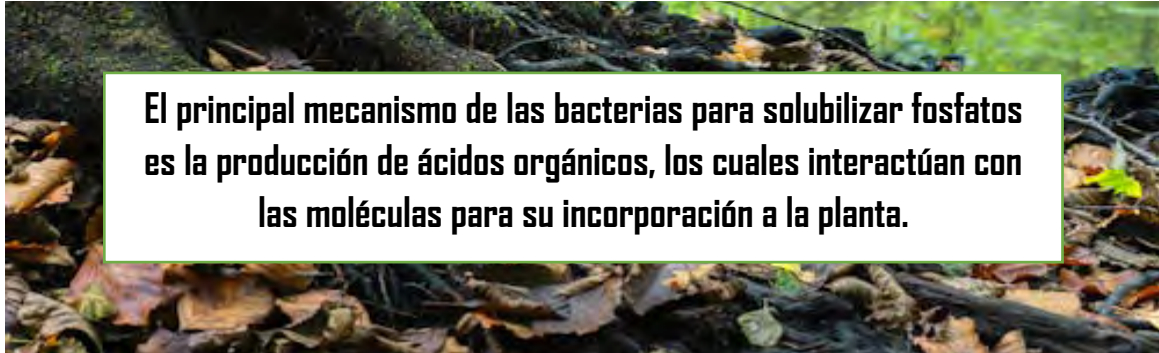


Figura 5: Mecanismos para la degradación de formas insolubles de fósforo.

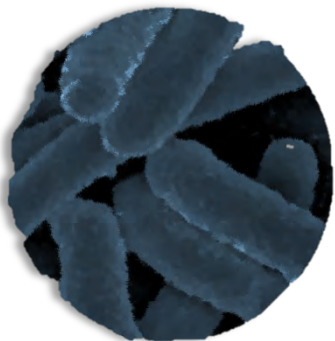


En la microbiología de suelos una de las pruebas que se les realiza a las bacterias aisladas es la de la solubilización de fósforo, pero es sorprendente el hecho de que muchas bacterias solubilizan fósforo, fijan nitrógeno, producen auxinas, sideróforos, antibióticos y otras características favorables para las plantas, pero son patógenas para los humanos y animales (justo hasta ese punto llegó la transferencia horizontal).



Con las tendencias de la agricultura orgánica, esas bacterias patógenas no son bienvenidas en la producción de bioinsumos para el mejoramiento de los cultivos. Hay casos en los que ocurre la solubilización del fósforo sin la intervención de bacterias u hongos, como las plantas del género *Lupinus*, que son leguminosas que no realizan simbiosis micorrízica pero que producen ácidos orgánicos, los cuales exudan de la raíz y que les facilita la solubilización del fósforo inorgánico. Una característica de muchas rizobacterias es la formación de biopelículas, la cual es una estructura de polisacáridos extracelulares producidos por las bacterias que les permite adherirse a superficies y favorecer su supervivencia. En una biopelícula puede crearse un ecosistema de bacterias que interactúan de manera benéfica, estas estructuras se pueden formar en la raíz, en las hifas de hongos y en la superficie de rocas. Este es un ejemplo de cómo una biopelícula favorece las condiciones de un sistema, pero muchas investigaciones respecto a biopelículas se llevan a cabo en aspectos de salud humana y animal porque es un mecanismo que utilizan algunas bacterias patógenas que provocan infecciones en mucosas o en implantes biomédicos.

También las biopelículas tienen relevancia en sistemas de biorremediación y tratamiento de aguas residuales, ya que un consorcio de microorganismos puede realizar mejor diversas tareas de degradación de compuestos. Un mecanismo que puede ser benéfico en un contexto también resulta perjudicial en otro, eso es con lo que se lidia en la microbiología.





Conclusión

El fósforo es fundamental en el metabolismo vegetal, al ser componente estructural y funcional de biomoléculas y procesos fisiológicos. Por esto, su ausencia genera alteraciones en el desarrollo vegetal, e impide que las plantas completen de manera óptima su ciclo de vida. El principal suministro de fósforo a las plantas en la agricultura intensiva es mediante la adición de fuentes inorgánicas, obtenidas de fuentes no renovables, como la roca fosfórica, la cual enfrenta retos como sobreexplotación de yacimientos, factores geopolíticos y fluctuaciones en los precios. Por esta razón, una contribución relevante desde el punto de vista ecológico es el de las rizobacterias, que con los productos de su metabolismo mejoran la disponibilidad del fósforo para las plantas.



Como reflexión final, aprendimos que el fósforo es un elemento con características químicas tan peculiares, con una movilidad que no se parece a la de otros macronutrientes esenciales y que resulta fundamental para el metabolismo de todo ser vivo. ¿Qué podemos hacer para que llegue a donde se necesita? A las plantas, a los animales, a las bacterias como integrantes de los ecosistemas.

Literatura recomendada

Bashan Y., Kamnev A.A., de-Bashan L.E. (2012). Tricalcium phosphate is inappropriate as a universal selection factor for isolating and testing phosphate-solubilizing bacteria that enhance plant growth: a proposal for an alternative procedure. *Biol Fertil Soils*, 49(4), 465-479.



Ferrera-Cerrato R., Delgadillo-Martínez J., Alarcón A., Alvarado-López J., Pérez-Moreno J., Almaraz-Suárez J.J. (editores) (2021) *Microbiología aplicada a la agricultura y ecosistemas. Principios y técnicas para su investigación*. (1ª ed.) Biblioteca básica agrícola, Colegio de Postgraduados

Mullins, G. (2009) *Phosphorous, Agriculture & the Environment*. (1ª ed.) College of Agriculture and Life Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University.



Semblanzas de autores

Dr. Marco Polo Carballo Sánchez, es académico adscrito al laboratorio de Microbiología de Suelos del posgrado en Edafología del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Es titular del curso regular: "Biotecnología y Bioprocesos de Microorganismos Benéficos de Relevancia Agrícola" y su interés en la investigación está relacionado con biotecnología de rizobacterias y producción de metabolitos microbianos. Pertenecer al Sistema Nacional de Investigadores nivel 1.

Dr. Juan José Almaraz Suárez, es académico adscrito al laboratorio de Microbiología de Suelos del posgrado en Edafología del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Es titular del curso regular: "Fijación Simbiótica de Nitrógeno en Leguminosas", con una trayectoria amplia en la microbiología del suelo, particularmente en el aislamiento, caracterización y aplicación de rizobacterias en diversos campos como la agronomía, la forestería y biotecnología. Pertenecer al Sistema Nacional de Investigadores nivel 1.

Dra. Sara Monzerrat Ramírez Olvera, es académica adscrita al laboratorio de Física de Suelos del posgrado en Edafología del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Su interés de investigación es la interacción de nutrimentos con fisiología vegetal, tolerancia de plantas a estrés abiótico y bioestimulantes. Pertenecer al Sistema Nacional de Investigadores nivel 1.

Envía tus contribuciones científicas a la revista **Terra Latinoamericana**, órgano de difusión de la SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO, A. C.

Terra Latinoamericana es de publicación continua y publica artículos científicos originales de interés para la comunidad de la ciencia del suelo y agua.

TERRA
Latinoamericana



ISSN Electrónico 2395 - 8030

<https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra>