



El hierro, un aliado en la remediación del suelo

Marisela Calderón-Jurado¹
María Laura Díaz-Vaca²
Ofelia Adriana Hernández Rodríguez¹
Oscar Cruz-Álvarez¹
Dámaris Leopoldina Ojeda-Barrios^{1*}

¹Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, 3100, México.

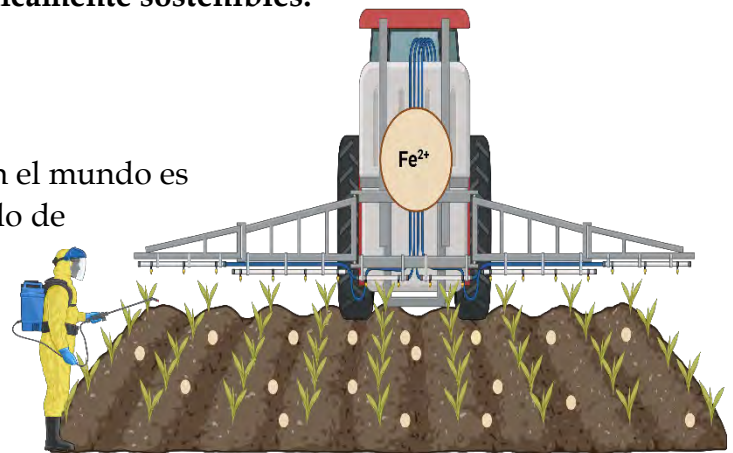
²Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la Universidad Autónoma de Chihuahua, 33000 Delicias, Chih., México.

*Autor de correspondencia: dojeda@uach.mx.

El hierro (Fe^{2+}) es un micronutriente esencial para el desarrollo de las plantas, el cual participa en diversos procesos metabólicos y enzimáticos a lo largo de su ciclo vital. En las últimas décadas, la preocupación por la contaminación y degradación del suelo ha crecido considerablemente, considerándose un problema de escala global. Estudios recientes indican que la agricultura es la segunda área de mayor aplicación de la nanotecnología, después del sector energético. En ese contexto, la nanotecnología puede combinarse con técnicas convencionales para ofrecer soluciones viables para remediar suelos contaminados con metales pesados, mediante la eliminación o estabilización de estos elementos. Un ejemplo de esto es la remoción de cromo (Cr) con nanopartículas de Fe^{2+} . No obstante, un desafío importante radica en garantizar que estas tecnologías sean también económicamente sostenibles.

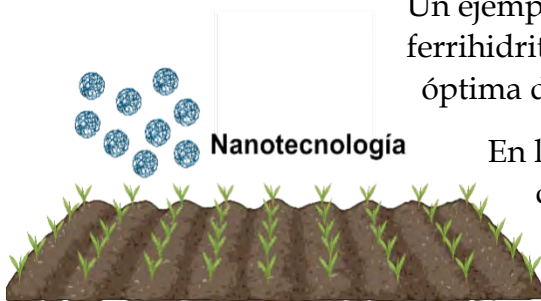
Introducción

La contaminación y degradación del suelo en el mundo es causado principalmente por el uso desmedido de pesticidas, fertilizantes y mecanización en la agricultura. Afortunadamente, la nanotecnología promete ser una solución de dimensiones microscópicas con efectos significativos en la agricultura.





Un ejemplo son las nanopartículas de óxido de hierro (como ferrihidrita, hematita y magnetita), que promueven una absorción óptima de Fe^{2+} por las plantas, conocidas como nanofertilizantes.



En la actualidad existen investigaciones que han demostrado que las nanopartículas de óxido de hierro pueden mejorar el rendimiento de diversos cultivos, como el arroz, trigo, tomate, cacahuate, soja y espinacas (Fig. 1). El uso de estas nanopartículas estimula diversos procesos

metabólicos como la fotosíntesis, la respiración y la producción de proteínas; también mejora la germinación y el crecimiento de las plantas. Las nanopartículas magnéticas mejoran el crecimiento de hongos micorrízicos simbióticos, la formación de nódulos fijadores de nitrógeno, y la actividad fijadora de nitrógeno de las bacterias. Hoy en día los desechos producidos por la industrialización son una preocupación para la salud pública en todo el mundo. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación estima que el crecimiento demográfico aumentará la producción agrícola en casi un 70% para 2050. Para lograr este objetivo es necesaria una cantidad elevada de fertilizantes sintéticos, principalmente por la baja efectividad actual de estos. Una estrategia para mejorar la eficiencia de los fertilizantes, es desarrollar estrategias sostenibles para reducir su pérdida. Para la mayoría de los cultivos que se establecen en suelos calcáreos, el contenido de hierro es bajo, reduciendo su rendimiento y calidad.

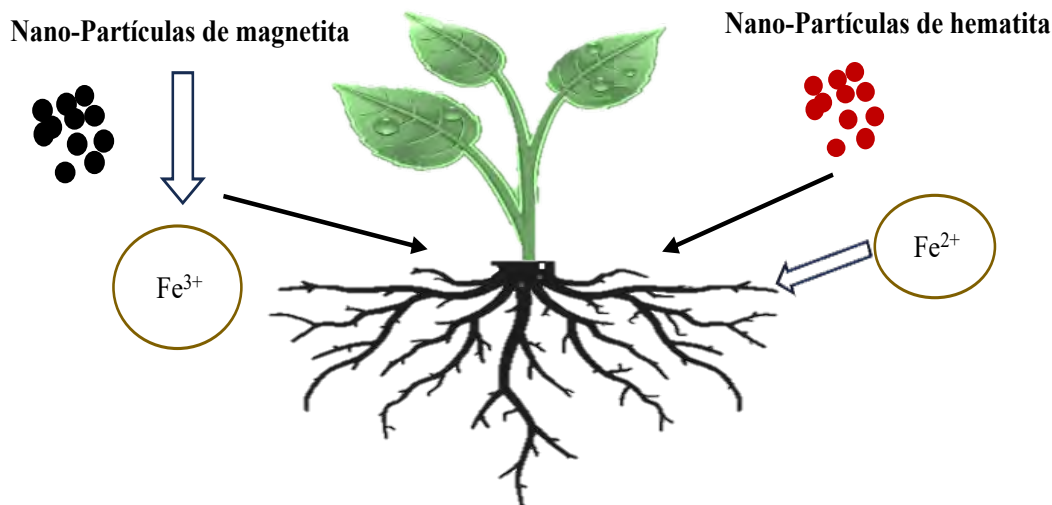


Figura 1. El crecimiento de las plantas depende en gran medida de la disponibilidad de hierro (Fe) y nanopartículas de óxido de hierro, como la magnetita y la hematita en el suelo.



Esto resulta en una deficiencia del elemento en las plantas, lo que reduce la producción y la calidad de las cosechas. Una de las formas más efectivas de corregir esta deficiencia es adicionando hierro quelado al suelo, sin embargo, esta técnica es costosa. La nanotecnología se puede combinar con métodos tradicionales y es una alternativa prometedora para enmendar suelos contaminados con metales pesados (eliminandolos o estabilizándolos).



Desarrollo

El uso de hierro en el suelo

El símbolo químico Fe^{2+} se utiliza para representar hierro o fierro, el cual es un metal de transición, de color grisáceo, al que se le han encontrado múltiples aplicaciones para la humanidad. Las principales fuentes de este material son el mineral kamacita, la hematita, la magnetita, la limonita y la siderita que se encuentran en rocas basálticas, sedimentos carboníferos y meteoritos, con frecuencia en aleación con níquel. El Fe^{2+} es un oligoelemento esencial para cultivos y plantas debido a su función básica en diversos procesos bioquímicos (Fig. 2).

Funciones del hierro en la planta

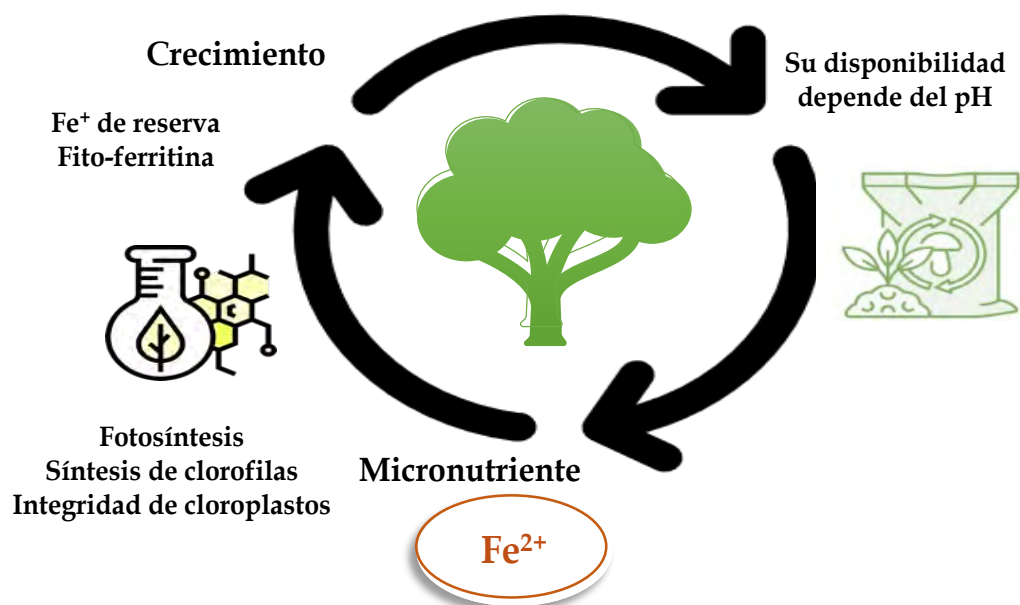


Figura 2. Comportamiento del hierro en la planta a nivel celular y en el suelo.



Función del hierro en las plantas

La clorosis férrica es la pérdida del color verde de las hojas, este síntoma se ha relacionado con una deficiencia de Fe^{2+} en la planta. Sin embargo, el problema no siempre radica en la falta de Fe^{2+} en el suelo, sino en su disponibilidad para la planta. El adecuado abastecimiento de Fe^{2+} depende principalmente de la disponibilidad del nutriente en el suelo, de forma que pueda ser absorbido por las raíces, más que de la cantidad no de la riqueza del suelo en el que se establece el cultivo. En ocasiones, la disponibilidad natural de Fe^{2+} es insuficiente, por lo que es necesario complementarlo con aplicaciones foliares (aspersiones). Diversas condiciones pueden ser causar esta deficiencia, como un pH



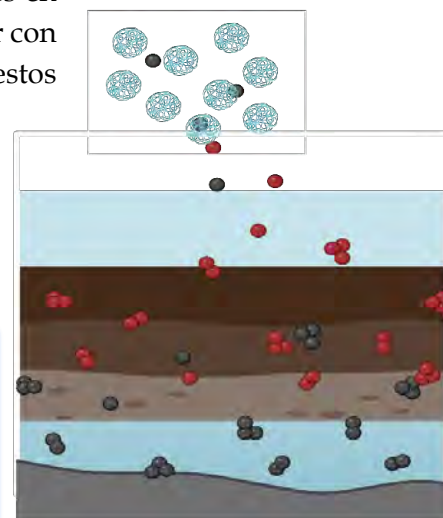
El hierro participa en la producción de energía, la reducción de nitratos y sulfatos, así como en varias enzimas y pigmentos a nivel celular.

elevado del suelo, un exceso de calcio o un exceso de fósforo. El Fe^{2+} desempeña un papel crucial como componente estructural y cofactor enzimático en la ferredoxina, peroxidasa, catalasa, citocromo oxidasa y citocromo oxidasa, interviniendo en sistemas fotosintetizadores y respiratorios.

Uso de las nanopartículas de hierro

Debido a su tamaño extremadamente pequeño, estos materiales tienen propiedades químicas, catalíticas, electrónicas, magnéticas y ópticas únicas. A medida que disminuye el tamaño de una partícula, la proporción de átomos en la superficie aumenta, lo que incrementa su área superficial y su reactividad. La escasez de electrones en estas partículas las hace altamente susceptibles a interactuar y reaccionar con otros átomos y moléculas para obtener una carga estable. Compuestos tradicionalmente inertes, como el hierro o la plata, al ser preparados a escala nanométrica, pueden utilizarse para catalizar reacciones, eliminar contaminantes, desinfectar mediante acción antibacteriana, adsorber y separar dioxinas, colorantes y otros contaminantes orgánicos o metales pesados.

La nanotecnología se puede combinar con métodos tradicionales y es una alternativa prometedora para remediar suelos contaminados con metales pesados (eliminándolos o estabilizándolos)





En los últimos años, la gama de aplicaciones potenciales de las nanopartículas se ha expandido considerablemente, especialmente en el cuidado de suelos, agua y aire.

Existen evidencias previas de algunos investigadores que mencionan que las nanopartículas de Fe^{2+} en una reducción química en suelo contaminado podrán remover cromo (Cr IV).

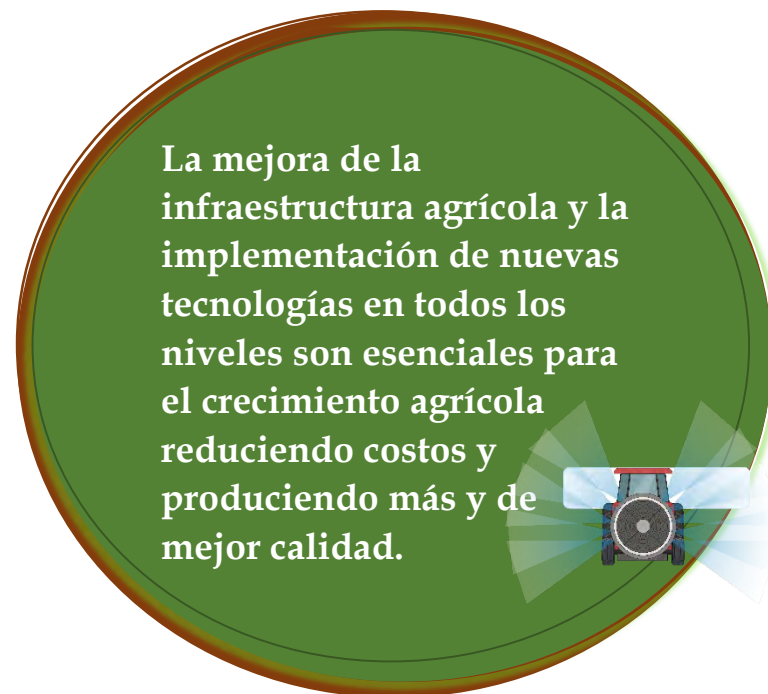


Retos medioambientales para la aplicación de hierro

En los últimos años, se ha hecho evidente la necesidad de proteger y restaurar los suelos agrícolas para garantizar el suministro de alimentos para las generaciones presentes y futuras, respondiendo así a la demanda alimentaria mediante sistemas de producción sustentables y sostenibles. La implementación de buenas prácticas agrícolas resulta en la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, como una mayor disponibilidad de nutrientes, amortizando los cambios de pH, y contribuyendo a la composición del microbiota del rizoma, etc., lo cual influye directamente en la productividad de las hortalizas, flores y frutos. Además, estas prácticas contribuyen al aumento en la cantidad de Fe^{2+} disponible en el suelo. Cabe destacar que la acidez del suelo puede afectar la disponibilidad de algunos elementos minerales, lo que, a su vez limita la productividad de los cultivos al disminuir directamente el crecimiento o la supervivencia de las plantas, o indirectamente, al aumentar la presencia de patógenos (microorganismos dañinos) en la rizosfera.



Figura 3. Retos de la agricultura del futuro.



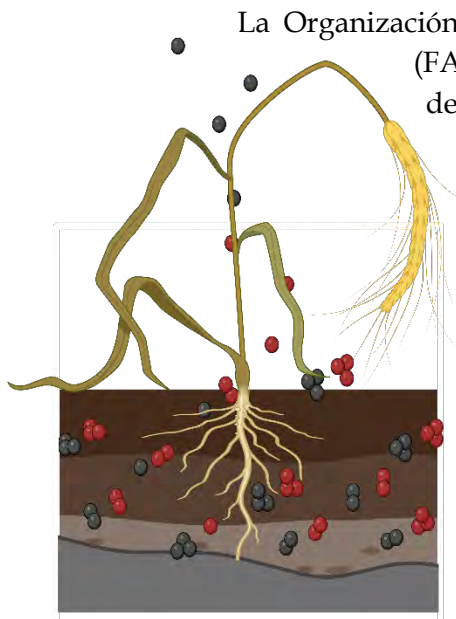


El cambio climático ha alterado las condiciones ambientales para el desarrollo de los cultivos, creando situaciones extremas y difíciles para las plantas que crecen bajo estrés. Esto resalta aún más la importancia de la búsqueda o síntesis de productos bioestimulantes. En los próximos años, será crucial continuar trabajando en esta línea para contrarrestar las consecuencias negativas del cambio climático. Este desafío nos obliga a adoptar un enfoque hacia una agricultura más sostenible y respetuosa con el medio ambiente, haciendo un uso responsable y eficiente de los recursos naturales como el suelo, el agua de riego y los fertilizantes, para maximizar la productividad agrícola sin degradar el entorno (Fig. 3).

La agricultura requiere mejorar su infraestructura y adoptar nuevas tecnologías, esenciales para impulsar el crecimiento del sector. Estas mejoras permitirán reducir los costos de producción, aumentar los rendimientos y mejorar la calidad de los productos agrícolas. En los últimos años, la preocupación por la degradación del medio ambiente y el cambio climático ha ido en aumento, convirtiéndose en un tema central en la agenda política global.



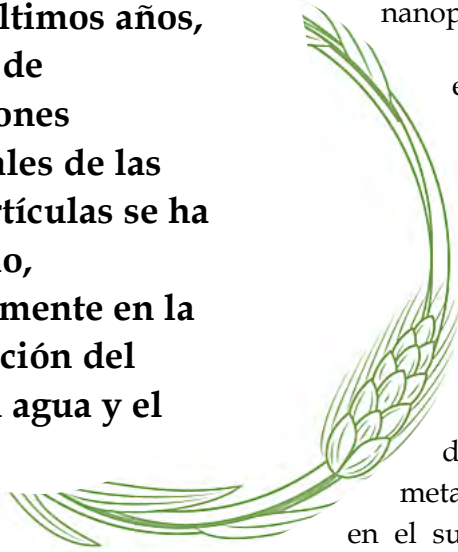
La contaminación del suelo no es un secreto



La Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), señala que las principales fuentes antropogénicas de deterioro del suelo son los químicos usados o producidos como derivados de actividades industriales como el aluminio (Al), berilo (Be), cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{2+}), manganeso (Mn^{2+}), Cadmio (Cd^{2+}), mercurio (Hg), plomo (Pb), entre otros. La seguridad alimentaria se ve comprometida por la contaminación del suelo, que dificulta la absorción de nutrientes de las plantas, reduce su metabolismo y disminuye los rendimientos agrícolas, amenazando así el suministro de alimentos. Además, los contaminantes dañan directamente a los organismos vivos en el suelo, como bacterias microscópicas hongos benéficos, nematodos, colémbolos, ácaros, miriápodos, lombrices, topes y gusanos, entre otros.



En los últimos años, la gama de aplicaciones potenciales de las nanopartículas se ha ampliado, especialmente en la remediación del suelo, el agua y el aire.



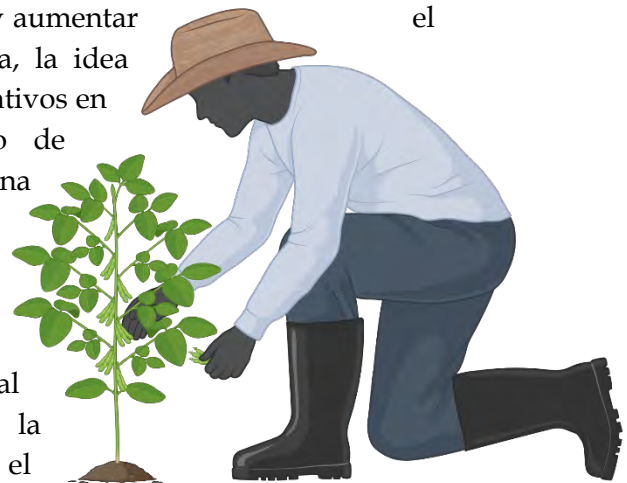
Las nanopartículas de hierro han demostrado ser efectivas en la mediación de suelos contaminados con metales pesados como el Cr (IV), hidrocarburos y otros contaminantes. Estas nanopartículas pueden purificar y

estabilizar metales pesados, disolver compuestos como el cloro, cianuro y pesticidas, también puede integrarse fácilmente en procesos existentes, como la aplicación en riego mediante soluciones acuosas o su captura en filtros de carbón activado. La tecnología novedosa al cuidado del medio ambiente se orienta a satisfacer necesidades que incluyan: aminorar la presencia de contaminantes, detección de moléculas orgánicas y detección de

metales pesados, métodos para ahorrar fertilizantes en el suelo, reducir las pérdidas por descomposición física y química de estos, reducir el impacto de los contaminantes ambientales en el agua y el suelo, e incluso ofrecer opciones para aumentar la captura de carbono en el suelo.

Conclusiones

El hierro (Fe^{2+}) es uno de los micronutrientes más importante para las plantas, ofreciendo una solución prometedora para mejorar su crecimiento y aumentar el rendimiento de los cultivos. En la producción agrícola, la idea fundamental es minimizar las pérdidas y los efectos negativos en el medio ambiente causados por el uso excesivo de agroquímicos. Las nanopartículas de Fe^{2+} representan una innovación reciente en la agricultura, con el potencial de remediar suelos contaminados con metales pesados como el cromo, hidrocarburos y otros contaminantes, sin embargo, los riesgos que pueden representar para el medio ambiente y la salud humana son inciertos. Es crucial destacar que hay pocos estudios sobre el uso de la nanotecnología en el campo y que es necesario evaluar el comportamiento de los nanomateriales con el tiempo.





Literatura recomendada



Boccio, Jose, Salgueiro, Jimena, Lysionek, Alexis, Zubillaga, Marcela, Goldman, Cinthia, Weill, Ricardo, & Caro, Ricardo. (2003). Metabolismo del hierro: conceptos actuales sobre un micronutriente esencial. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, 53(2), 119-132.
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222003000200002&lng=es&tlng=es.

Rivero-Montejo, S. D. J., Vargas-Hernández, M., & Torres-Pacheco, I. (2021). Nanoparticles as novel elicitors to improve bioactive compounds in plants. Agriculture, 11(2), 134.
<https://doi.org/10.3390/agriculture11020134>

Arizmendi-Galicia, N., Rivera-Ortiz, P., Cruz-Salazar, F. D. L., Castro-Meza, B. I., & Garza-Requena, F. D. L. (2011). Lixiviación de hierro quelatado en suelos calcáreos. Terra Latinoamericana, 29(3), 231-237.

Semblanzas de autores

Marisela Calderón-Jurado,

Ingeniera Hortícola con Maestría en Ciencias Hortofrutícolas por la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Colaboradora del Cuerpo Académico CA-UACH-17 Hortofruticultura, participación como ponente en Congresos Nacionales e Internacionales, seminarios académicos, consejera estudiantil, línea de investigación en frutales de zona templada y flores comestibles. Actualmente estudia un Doctorado en Ciencias.

María Laura Díaz-Baca

Ingeniero Agrónomo Fitotecnista con Maestría en Agronegocios por la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la UACH. Actualmente es Doctoranda en el programa de Ciencias Hortofrutícolas en la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas. Docente en la FCAyF UACH de las materias de cultivos básicos, Hortícolas y Hortofrutícolas, postcosecha y botánica general.

Ofelia Adriana Hernández-Rodríguez

Doctora en Philosophia en recursos naturales por la Universidad Autónoma de Chihuahua. Es profesora-investigadora en las disciplinas de suelos agrícolas, nutrición vegetal y agricultura orgánica a nivel licenciatura y posgrado en la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, UACH. Miembro del Cuerpo Académico CA-UACH-17 Hortofruticultura. Cuenta con la distinción de Investigador Nacional Nivel I otorgado por el SNI-CONAHCYT del 2015 a la fecha. Acreedora del Premio Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación de Chihuahua en 2013.





Oscar Cruz-Álvarez

Doctor en Ciencias en Horticultura por la Universidad Autónoma Chapingo. Es profesor de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas en la Universidad Autónoma de Chihuahua. Es investigador nacional nivel 1 en el Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías.

Dámaris Leopoldina Ojeda-Barrios

Doctora en Ciencias Agrícolas (Horticultura) por la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Profesora-investigadora en fisiología y nutrición vegetal a nivel licenciatura y posgrado en Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua. Investigadora Nacional nivel 2 por el SNII-CONAHCYT. Cuenta con reconocimiento por el Consejo Mexicano de la Nuez (COMENUEZ).



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>