elementos
Recibido: 05/10/2026
Aceptado: 12/11/2026

¿Por qué mi manzana no está rica?

María del Pueblito Guevara-Santana[1] y Adrián Esteban Ortega-Torres[1]*

[1] Centro de Investigación Aplicada en Biosistemas (CARB-CIAB),
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro campus Amazcala

* Dirección para correspondencia: adrianesotorres@gmail.com

Manuscrito aceptado

Usualmente, los fines de semana visitamos el supermercado para comprar la despensa, que incluye frutas y verduras. Quizás te ha sucedido que encuentras manzanas o fresas que lucen muy apetecibles y decides comprar una buena cantidad, imaginando lo mucho que disfrutarás comerlas en casa. Sin embargo, al darles la primera mordida, descubres que son menos dulces o sabrosas de lo que esperabas. Entonces, te preguntas: ¿a qué se debe esto?

En términos generales, el sabor, el color, la textura y la jugosidad de las frutas son características que dependen de la interacción de diversos factores, los cuales pueden agruparse en tres categorías: genéticos, ambientales y nutricionales. Entre ellos se encuentran la variedad de la planta, el grado de maduración, las condiciones de cosecha, la disponibilidad de agua, la temperatura, la luz solar y la nutrición vegetal. Esta última es particularmente importante, ya que las plantas requieren distintos nutrientes para llevar a cabo adecuadamente sus funciones metabólicas y fisiológicas.

Entre estos nutrientes se encuentran el nitrógeno, el potasio y el fósforo. Este último desempeña un papel fundamental en el metabolismo energético y en la

elementos
Recibido: 05/10/2026
Aceptado: 12/11/2026

formación de estructuras celulares, procesos indispensables para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Aunque no determina por sí solo el sabor, el color o la textura de los frutos, su disponibilidad contribuye a que las plantas completen adecuadamente sus etapas de crecimiento y producción.

Por lo general, el fósforo se suministra mediante fertilizantes fosfatados. Sin embargo, existen alternativas que pueden contribuir a reducir el impacto ambiental de la fertilización, como el uso de microorganismos capaces de solubilizar los compuestos de fósforo presentes en el suelo y favorecer su disponibilidad para que las raíces puedan absorberlo.

Importancia del fósforo en las plantas

El fósforo es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, que lo requieren en cantidades relativamente grandes. Forma parte de moléculas fundamentales para la vida, como el ADN y el ATP. En el ADN, integra los grupos fosfato que forman parte de su estructura y contribuyen a mantener unidos los nucleótidos que contienen la información genética. Por su parte, el ATP funciona como una especie de batería celular, ya que almacena y transfiere energía para que las células puedan realizar distintas funciones, como crecer, formar nuevos tejidos y sintetizar diversas sustancias.

El fósforo interviene indirectamente en procesos fisiológicos relacionados con características como el sabor y la textura de las manzanas. Para comprender cómo

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 05/10/2026
Aceptado: 12/11/2026

se desarrollan estas características, es necesario partir de la fotosíntesis, proceso que comienza en las hojas, donde la planta capta la luz solar y utiliza agua y dióxido de carbono para producir azúcares. Estos compuestos contribuyen al dulzor de los frutos, además de proporcionar los materiales necesarios para la formación de nuevos tejidos y la energía que requiere el desarrollo de la planta (Ren *et al*., 2023). Posteriormente, los azúcares y otros compuestos orgánicos son transportados a través del floema, un tejido vascular que cumple una función semejante a la de los vasos sanguíneos en los animales, pues permite distribuir estas sustancias hacia los distintos órganos de la planta, incluidos los frutos (Braun, 2022).

Pero ¿cómo se desarrolla esa textura crujiente que tanto nos gusta? Aquí entran en escena las paredes celulares, estructuras formadas principalmente por celulosa, hemicelulosa y pectina, que contribuyen a mantener la firmeza y la integridad de los tejidos de la manzana (Su et al., 2022).

¿Y qué papel desempeña el fósforo en todo esto? En pocas palabras, este elemento contribuye a que el árbol disponga de la energía y los recursos necesarios para crecer y desarrollar sus frutos. Participa en procesos fundamentales, como el metabolismo energético, la formación de membranas celulares y el crecimiento de la planta (Figura 1). Por ello, una deficiencia de fósforo puede afectar el desarrollo del árbol y la producción de manzanas, así como algunas de las características de los frutos que tanto disfrutamos al darles una mordida (Pan y Cai, 2023; Zhu *et al*., 2024).

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 05/10/2026
Aceptado: 12/11/2026

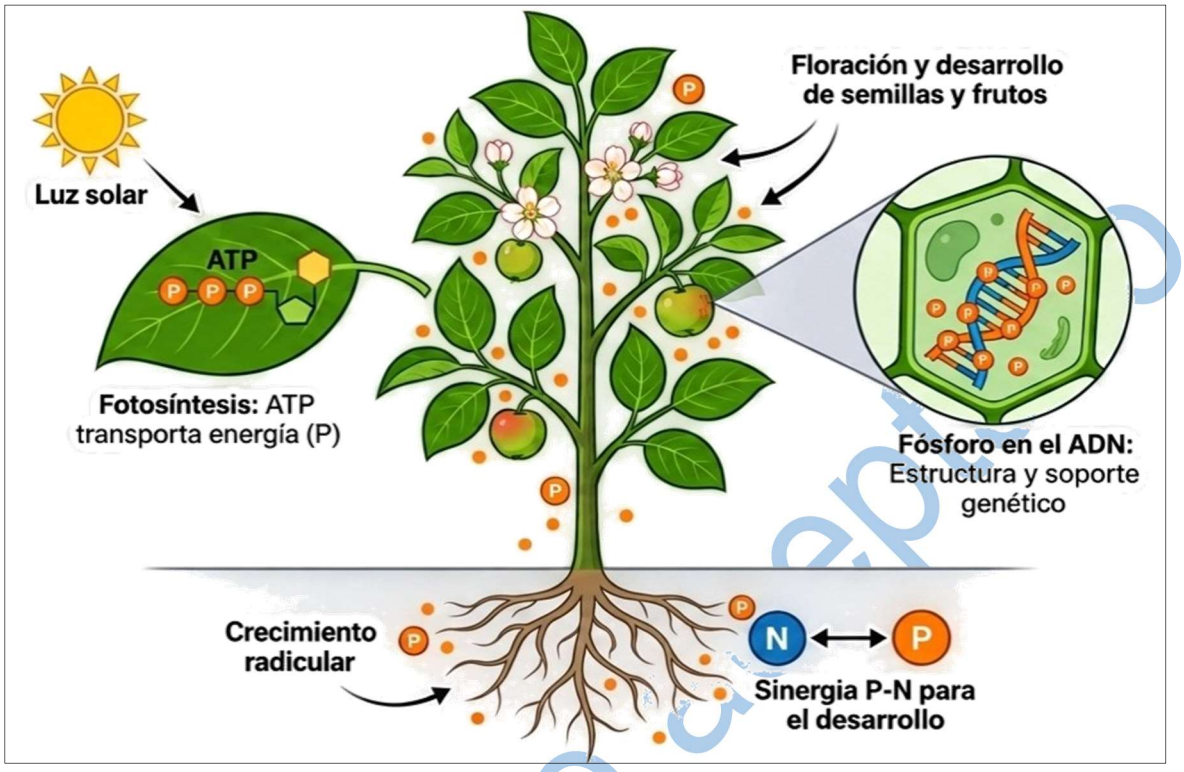


Figura 1. Funciones del fósforo en las plantas

Problemática del fósforo

Tradicionalmente, el fósforo se suministra a los cultivos mediante fertilizantes fosfatados, cuya principal materia prima es la roca fosfórica, un recurso mineral de origen natural que se extrae de yacimientos geológicos. Sin embargo, su distribución no es uniforme en el mundo, pues una proporción importante de las reservas y de la producción se concentra en un número limitado de países. Esta situación hace que la agricultura dependa de un recurso mineral finito, cuya extracción, procesamiento y distribución tienen consecuencias tanto económicas como ambientales.

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 05/10/2026
Aceptado: 12/11/2026

Aunque no se trata de un recurso que vaya a agotarse de manera inmediata, su disponibilidad a largo plazo plantea la necesidad de utilizarlo de forma más eficiente y recuperar el fósforo que ya se encuentra en los sistemas agrícolas (Giannini *et al*., 2022).

Por otro lado, cuando se aplican fertilizantes fosfatados a los cultivos, las plantas no absorben todo el fósforo suministrado. Una parte puede quedar retenida en el suelo mediante reacciones químicas con algunos de sus componentes, particularmente con elementos como el calcio, el hierro y el aluminio. Estas reacciones pueden dar lugar a compuestos de baja solubilidad que reducen la disponibilidad del fósforo para las raíces. La magnitud de este fenómeno depende de diversos factores, entre ellos el tipo de suelo, el cultivo, la fuente de fertilización y las prácticas de manejo (Han *et al*., 2022). Por lo tanto, que el fósforo esté presente en el suelo no significa necesariamente que las plantas puedan absorberlo. Para comprender este problema, es importante conocer qué transformaciones experimenta este elemento cuando entra en contacto con el suelo y qué factores determinan su disponibilidad para los cultivos.

Manuscrito aceptado

El fósforo en la naturaleza

Para comprender qué sucede con este nutriente, es necesario distinguir dos grandes reservorios de fósforo: el geológico y el biológico, ambos relacionados con el ciclo del fósforo.

elementos
Recibido: 05/10/2026
Aceptado: 12/11/2026

En el reservorio biológico, el fósforo se encuentra en los organismos vivos y en sus restos. Forma parte de los tejidos de plantas, animales y microorganismos, y también puede incorporarse a la materia orgánica del suelo, incluido el humus, que es una fracción de materia orgánica relativamente estable que se forma durante la descomposición y transformación de residuos vegetales y animales. Asimismo, el fósforo está presente en los ecosistemas acuáticos, donde forma parte de organismos como el fitoplancton. Estos microorganismos fotosintéticos, que viven suspendidos en el agua, incorporan el fósforo a sus células y lo utilizan en procesos esenciales para su crecimiento y reproducción (Figura 2).

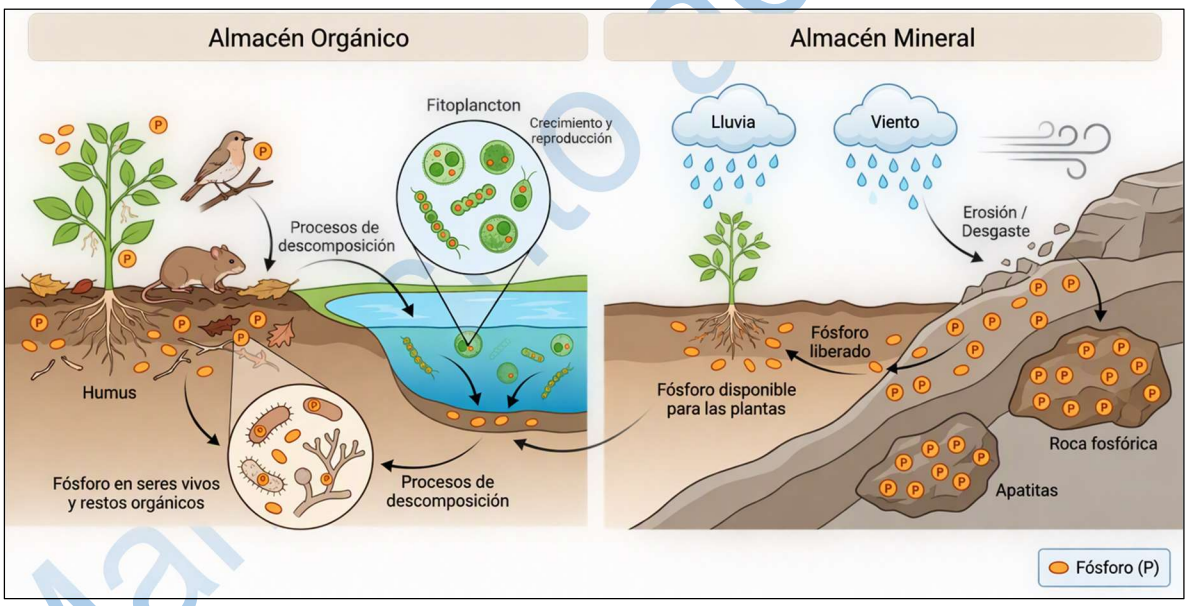


Figura 2. Ciclos y reservorios de fósforo

Por otro lado, en el reservorio geológico, el fósforo se encuentra almacenado principalmente en rocas y minerales, como las apatitas presentes en la roca fosfórica. Mediante procesos naturales de meteorización, que incluyen la acción del

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 05/10/2026
Aceptado: 12/11/2026

agua, el viento y los cambios de temperatura a lo largo del tiempo, las rocas se desgastan y liberan gradualmente fósforo al suelo y a los cuerpos de agua. De esta manera, este elemento se incorpora a los ciclos biogeoquímicos y, mediante distintas transformaciones, puede llegar a estar disponible para que las plantas lo absorban (Sasabuchi *et al*., 2023).

Disponibilidad del fósforo para las plantas

Ahora que conocemos los reservorios naturales del fósforo, surge una pregunta fundamental: si este elemento está presente en el suelo, ¿significa que las plantas pueden absorberlo en su totalidad? La respuesta es no. Aunque el suelo contenga cantidades considerables de fósforo, una parte puede encontrarse en formas químicas que las raíces no pueden absorber fácilmente. Por lo tanto, su presencia en el suelo no garantiza que esté disponible para las plantas.

Para que las plantas puedan aprovechar el fósforo, es necesario comprender qué sucede en el suelo. Este no es únicamente el medio donde crecen las plantas, sino también un sistema dinámico en el que interactúan los nutrientes, la materia orgánica y una gran diversidad de microorganismos. Estas interacciones pueden favorecer la liberación del fósforo que se encuentra retenido en el suelo mediante su asociación con elementos como el hierro, el aluminio y el calcio, transformándolo en formas más disponibles para que las raíces puedan absorberlo.

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 05/10/2026
Aceptado: 12/11/2026

Aquí es donde entran en acción los microorganismos. En el suelo habita una gran diversidad de bacterias y hongos que descomponen los residuos orgánicos, transforman distintos compuestos y participan activamente en el reciclaje de nutrientes. Algunos de estos microorganismos tienen la capacidad de liberar fósforo mediante dos procesos principales: la mineralización, que permite transformar el fósforo orgánico en formas inorgánicas que las plantas pueden absorber, y la solubilización, mediante la cual se favorece la disolución de compuestos minerales de fósforo que se encuentran poco disponibles en el suelo (Figura 3) (Li *et al*., 2021; Sasabuchi *et al*., 2023).

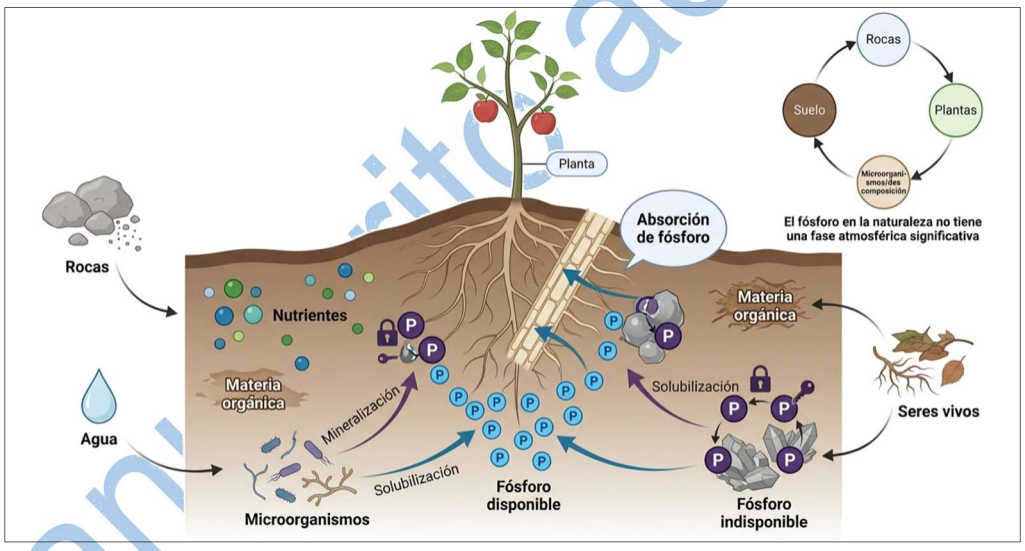


Figura 3. Dinámica del fósforo en el sistema suelo-planta

Mecanismos de transformación del fósforo

Estos procesos son realizados por diversos microorganismos del suelo que participan en la transformación del fósforo. Entre ellos se encuentran los

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 05/10/2026
Aceptado: 12/11/2026

denominados microorganismos solubilizadores de fósforo, capaces de favorecer la liberación de este nutriente a partir de compuestos minerales poco solubles y, con ello, incrementar su disponibilidad para las plantas (Figura 4).

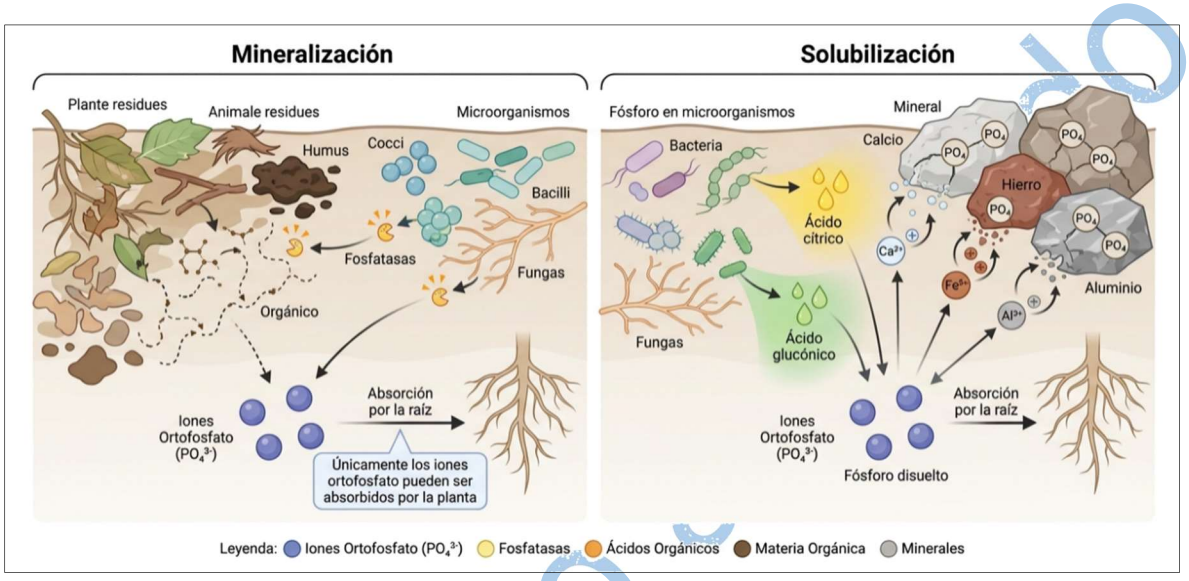


Figura 4. Proceso de mineralización y solubilización del fósforo

La mineralización es el proceso mediante el cual el fósforo contenido en la materia orgánica se transforma en formas inorgánicas que pueden ser aprovechadas por las plantas. Cuando las hojas caen, las raíces mueren o los organismos generan residuos, parte del fósforo queda incorporado en moléculas orgánicas. Para que este nutriente pueda reincorporarse al ciclo y ser aprovechado por otros organismos, es necesario que dichos compuestos se descompongan.

En este proceso intervienen microorganismos descomponedores del suelo, principalmente bacterias y hongos, que producen y liberan enzimas especializadas, como las fosfatasas. Estas enzimas actúan sobre los compuestos orgánicos que

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 05/10/2026
Aceptado: 12/11/2026

contienen fósforo y favorecen su liberación en forma de iones ortofosfato, una de las principales formas inorgánicas que las raíces pueden absorber (Pan y Cai, 2023). La intensidad de este proceso depende de diversos factores, entre ellos la actividad microbiana, la temperatura, la humedad, el pH y la composición de los residuos orgánicos.

Por otro lado, la solubilización ocurre cuando determinados microorganismos favorecen la disolución de compuestos minerales que contienen fósforo. En el suelo, este elemento puede encontrarse asociado químicamente con elementos como el calcio, el hierro y el aluminio, formando compuestos de baja solubilidad que dificultan su absorción por las raíces. Para favorecer su disolución, algunos microorganismos solubilizadores de fósforo producen y liberan ácidos orgánicos, como los ácidos cítrico, oxálico y glucónico. Estos compuestos pueden reaccionar con los minerales que contienen fósforo y favorecer su disolución mediante procesos de acidificación y formación de complejos con los metales. Como resultado, parte del fósforo que se encontraba en formas poco solubles puede pasar a la solución del suelo y quedar más accesible para las raíces (Pan y Cai, 2023).

Sin embargo, la solubilización no garantiza que todo el fósforo liberado permanezca disponible para las plantas. Debido a su comportamiento químico, el fosfato puede volver a precipitar o quedar retenido por otros componentes del suelo. Esto depende de propiedades como el pH, la composición mineralógica y las concentraciones de calcio, hierro y aluminio, así como de las interacciones entre los distintos componentes del suelo.

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 05/10/2026
Aceptado: 12/11/2026

Conclusión

La próxima vez que muerdas una manzana jugosa, recuerda que detrás de su sabor y textura no solo está el trabajo de la planta, sino también la interacción de diversos factores, como la genética, la luz solar, el agua y la vida que habita en el suelo. En este último, una gran diversidad de microorganismos, aunque invisibles a nuestros ojos, participa en el reciclaje de nutrientes y contribuye a que el fósforo esté disponible para que las raíces puedan absorberlo. De esta manera, favorecen la nutrición de la planta y su desarrollo, desde el crecimiento y la floración hasta la formación de frutos con los azúcares y el agua que les dan sus características.

Es importante señalar que el uso de microorganismos solubilizadores de fósforo no significa que los fertilizantes fosfatados puedan sustituirse por completo, sino que representa una alternativa para favorecer un aprovechamiento más eficiente de este nutriente. Porque cuidar el suelo también significa contribuir a la calidad de los alimentos que llegan a nuestra mesa.

Referencias

Braun DM (2022). Phloem Loading and Unloading of Sucrose: What a Long, Strange Trip from Source to Sink. *Annual Review of Plant Biology*, 73(1), 553–584. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-070721-083240.

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 05/10/2026
Aceptado: 12/11/2026

Giannini AP, Andriulo AE y Wyngaard N (2022). Fin de las reservas de fertilizantes fosfatados: ¿realidad o restricciones geopolíticas? *FAVE Sección Ciencias Agrarias* 21(2):37–42. DOI: https://doi.org/10.14409/fa.v21i2.12003.

Han Y, White PJ and Cheng L (2022). Mechanisms for improving phosphorus utilization efficiency in plants. *Annals of Botany* 129(3):247–258. DOI: https://doi.org/10.1093/aob/mcab145.

Martínez Fernández I y Saracho R (2009). El fósforo y sus implicaciones clínicas. *Nefrología* 29(5):41–50. DOI: https://doi.org/10.3265/nefrologia.2009.29.s.e.noid.35.free.

Li J-T, Lu J-L, Wang H-Y *et al.* (2021). A comprehensive synthesis unveils the mysteries of phosphate-solubilizing microbes. *Biological Reviews* 96(6):2771–2793. DOI: https://doi.org/10.1111/brv.12779.

Pan L and Cai B (2023). Phosphate-Solubilizing Bacteria: Advances in Their Physiology, Molecular Mechanisms and Microbial Community Effects. *Microorganisms* 11(12):2904. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms11122904.

Ren Y, Liao S and Xu Y (2023). An update on sugar allocation and accumulation in fruits. *Plant Physiology* 193(2):888–899. DOI: https://doi.org/10.1093/plphys/kiad294.

Sasabuchi I, Krieger K, Nunes R *et al*. (2023). Sustentabilidade no uso de fósforo: Uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do Estado de São Paulo, Brasil. *Química Nova* 46(2):185-198. DOI: https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170967.

Su Q, Li X, Wang L *et al.* (2022). Variation in Cell Wall Metabolism and Flesh Firmness of Four Apple Cultivars during Fruit Development. *Foods* 11(21):3518. DOI: https://doi.org/10.3390/foods11213518.

Zhu Y, Xing Y, Li Y *et al.* (2024). The Role of Phosphate-Solubilizing Microbial Interactions in Phosphorus Activation and Utilization in Plant–Soil Systems: A Review, *Plants* 13(19):2686. DOI: https://doi.org/10.3390/plants13192686.

Manuscrito aceptado