

Artículo de divulgación

Actividad dual del nitrógeno: nutriente mineral esencial y molécula señal en plantas

Dual role of nitrogen: essential mineral nutrient and signaling molecule in plants

Federico García-Laynes ¹ , Fabiola Guadalupe León-García ¹ , Manuel Martínez-Estévez ¹ , Oscar Alberto Moreno-Valenzuela ¹ , Ileana Echevarría-Machado ^{1*} 

¹ Unidad de Biología Integrativa, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Calle 43 No. 130 x 32 y 34. Col. Chuburná de Hidalgo, 97205, Mérida, Yucatán, México.

* Autor para correspondencia: ileana@cicy.mx

Recibido:

15/04/2025

Aceptado:

22/11/2025

Publicado:

15/01/2026

RESUMEN

Aspectos como la sostenibilidad, la eficiencia, el cuidado del ambiente y la salud de los seres vivos son de relevancia actual dentro de la nutrición mineral, la cual permite la producción de cultivos que brinda alimentos a la población mundial. Sin embargo, en este estudio se resalta la importancia del nitrógeno debido a que es el elemento mineral que más impacto tiene en los rendimientos de los cultivos. Se aborda su importancia en la nutrición mineral, en las bioestructuras celulares, en los rendimientos y, finalmente, su papel como molécula señal en la interacción planta-patógeno. En este trabajo se hace énfasis en el por qué es importante una nutrición nitrogenada adecuada para las plantas tanto en cantidad como en calidad, ya que ésta es un indicativo de la forma química en la que se suministra el nitrógeno dentro de los esquemas de fertilización agrícola. Este enfoque es un campo reciente de estudio que podría contribuir, en el futuro, al diseño de estrategias de nutrición nitrogenada adecuadas para mejorar los rendimientos agrícolas y la tolerancia de los cultivos a las plagas y enfermedades, con un uso reducido de contaminantes químicos.

Palabras clave: sostenibilidad alimentaria; bioestructuras; planta-patógeno; fertilización nitrogenada; tolerancia a enfermedades; nitrato

ABSTRACT

Aspects such as sustainability, efficiency, environmental protection, and the health of living beings are currently relevant within mineral nutrition, which enables the production of crops that provide food for the world's population. However, in this study, we highlight the importance of nitrogen because it is the mineral element that has the greatest impact on crop yields. We address its importance in mineral nutrition, in cellular biostructures where it plays important roles, in yields, and finally, its role as a signal molecule in plant-pathogen interactions. This paper emphasizes why adequate nitrogen nutrition is important not only in quantity but also in quality for plants, as the latter is an indicator of the chemical form in which nitrogen is supplied within agricultural fertilization schemes. This is a recent field of study that could contribute in the future to the design of better nitrogen nutrition strategies to improve agricultural yields and crop tolerance to pests and diseases, with reduced use of chemical contaminants.



Keywords: food sustainability; biostructures; plant-pathogen; nitrogenous fertilization; disease tolerance; nitrate

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es el elemento mineral esencial que más impacto tiene en la mayoría de los cultivos a nivel mundial y esto radica en el hecho de que una gran cantidad de las moléculas presentes en las células que lo conforman contienen N en su estructura, por lo que cuando una planta se encuentra en condiciones de deficiencia de este nutriente, es devastador para su crecimiento, su rendimiento y la calidad de sus frutos (Dimkpa et al., 2020). Es bien conocido que las plantas necesitan 14 elementos minerales para su crecimiento, desarrollo y generación de descendencia; sin embargo, el N, por mucho, es el elemento mineral que requieren en mayor cantidad. Este macronutriente participa en procesos esenciales para las plantas como la fotosíntesis, la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos, metabolitos secundarios (sustancias químicas “extras” producidas por las plantas, bacterias y hongos, que aunque no son esenciales para su supervivencia le dan ventajas, por ejemplo, para defenderse), entre otros (Rengel et al., 2022). Este trabajo no solo destaca la importancia del N como nutriente esencial para las plantas, sino que también revela su papel clave como una especie de “señal” que les permite a las plantas percibir y responder a factores externos, como la presencia de patógenos o zonas del suelo con más o menos nutrientes. Esta última función del N es tan importante para el desarrollo y la supervivencia de la planta como lo es la de nutrirla. Además, se ha planteado que este elemento podría influir directamente en la forma en que las plantas se enfrentan a las enfermedades causadas por patógenos. A pesar de ser éste un tema de importancia, poca atención se le ha dado y, como resultado, poca información ha sido generada al respecto. Desde la revolución verde, grandes cantidades de N han sido utilizadas en la mayoría de los suelos agrícolas con la finalidad de aumentar los rendimientos, lo cual ha repercutido grandemente en esta interacción (Mur et al., 2016).

EL NITRÓGENO COMO NUTRIENTE ESENCIAL

El N cumple los tres criterios de esencialidad de los nutrientes minerales: sin su presencia la planta no puede completar su ciclo de vida, está involucrado en funciones metabólicas y estructurales donde otro elemento no lo puede sustituir y su deficiencia provoca síntomas específicos en la planta. Después del carbono, el hidrógeno y el oxígeno, que son obtenidos del dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O), el nutriente con mayor demanda dentro de los 14 minerales esenciales es el N. Es el elemento más requerido por los cultivos y, al mismo tiempo, el más deficiente en la mayoría de los suelos agrícolas. Basta con decir que el N representa aproximadamente el 1.5% del peso seco de las plantas, esto es hasta 10000 veces mayor que otros como el níquel (Ni) y el molibdeno (Mo) (Figura 1-A).

El N es fundamental desde el punto de vista fisiológico, ya que forma parte de compuestos como los ácidos nucleicos, las proteínas, los pigmentos fotosintéticos, las hormonas vegetales, los metabolitos secundarios y algunos fosfolípidos de membrana, entre otros (Figura 1-B). Sin la presencia de N, la formación de estructuras esenciales, como las membranas biológicas, los cloroplastos y otros organelos, no sería posible.

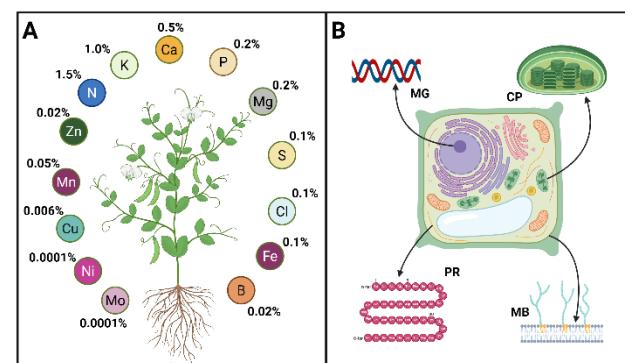


Figura 1. A) Porcentaje de los nutrientes minerales esenciales presentes en el peso seco de las plantas. Dentro de ellos el N se destaca por ser el nutriente presente en mayor concentración en los tejidos (1.5%). B) Componentes celulares, donde el N forma parte central.



MG: material genético; CP: Cloroplastos; PR: proteínas; MB: membranas. Imagen diseñada con BioRender.com

Las plantas pueden adquirir del suelo diferentes fuentes de N, de las cuales, dos fuentes inorgánicas son las principales: el amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-), aunque también las moléculas orgánicas como aminoácidos y pequeños péptidos son fuentes de N disponibles para ellas. También pueden obtenerlo a través de la simbiosis con microorganismos que fijan el N atmosférico, como *Rhizobium* y *Frankia* (Rengel et al., 2022). Resulta muy interesante la preferencia de un cultivo por una u otra fuente de este elemento, y en esto influyen las características de los suelos donde estas plantas han sido cultivadas durante muchos años de evolución.

IMPORTANCIA DEL NITRÓGENO EN LOS RENDIMIENTOS

El N es el elemento mineral más deficiente en la mayoría de los suelos agrícolas del mundo y, por lo tanto, debe ser suministrado a los cultivos para garantizar buenas cosechas. Se ha demostrado que el N mejora tanto los rendimientos agrícolas como la respuesta de las plantas a condiciones ambientales estresantes, como la salinidad y el ataque de patógenos (Liao et al., 2023).

Los cultivos más importantes a nivel mundial son el arroz, maíz y trigo, debido a su gran demanda y a su producción; sin embargo, para un buen crecimiento, desarrollo y sobre todo rendimiento, se necesita agregar a los suelos grandes cantidades de N (Govindasamy et al., 2023). De acuerdo con datos de la FAO (<https://www.fao.org/faostat/es/#compare>) el rendimiento del arroz ha aumentado de 1.8 toneladas a 4.7 toneladas del año 1961 a 2022. Esto representa un aumento del 154.0%, mientras que en el caso del maíz y del trigo ha sido del 209.0% y 232.9%, respectivamente, en el mismo período (Figura 2). El consumo de N mundial total aumentó de 11.4 millones a 113.0 millones de toneladas en el mismo periodo de tiempo, lo que representa un incremento del 891.2%. Estos datos presentan la importancia de la nutrición con N en el contexto de los rendimientos agrícolas.

Una gran parte de la función del N sobre el crecimiento y el rendimiento de los cultivos se debe a su papel como nutriente y, para ello, el N en forma inorgánica tiene que ser transformado dentro de la planta a una forma

orgánica, después de haber sido absorbido por las raíces de ésta. En resumen, el N debe ser asimilado (pasar de una forma inorgánica, como NO_3^- , a una orgánica como los aminoácidos) y metabolizado (convertirse en proteínas, por ejemplo). Pero, también este elemento puede contribuir a estos procesos sin necesidad de ser asimilado y metabolizado, y es así que estaría actuando como una molécula señal.

Evolución de la producción agrícola vs. uso de nitrógeno (1961-2022)

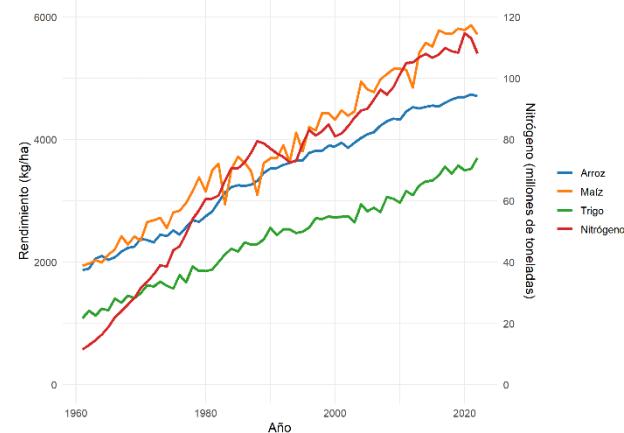


Figura 2. Relación entre el rendimiento promedio mundial de arroz, maíz y trigo y el uso de nitrógeno. Los datos fueron obtenidos de la FAO (<https://www.fao.org/faostat/es/#compare>)

EL NITRÓGENO COMO MOLÉCULA SEÑAL

El N, en forma de NO_3^- y de algunos aminoácidos como el glutamato, pueden actuar “avisando” a las células de la planta de alguna condición externa, favorable o desfavorable para ella, para que puedan modificar su crecimiento y responder a esta condición; por ejemplo, si hay presencia de nutrientes en el suelo, se necesita estimular el crecimiento de la raíz para que los nutrientes puedan ser absorbidos. Para ello, estas formas de N no necesitan entrar a la célula ni convertirse a otra molécula, ya que simplemente actúan como una señal que es percibida en las membranas e interpretada al interior de las células, lo que activa la síntesis de una variedad de moléculas diferentes que ayudan a la planta ante tal condición externa.

Aunque ha sido poco explorado, el N también actúa de esta forma cuando la planta interacciona con un patógeno. Se ha observado que la fuente de N puede influir positiva o negativamente en la defensa de la



planta ante los organismos que la atacan, dependiendo del genotipo y la concentración de este nutriente (Tripathi et al., 2022). Aún no se comprende completamente cómo el N participa en la defensa de las plantas, pero los estudios indican que desempeña un papel clave en la defensa constitutiva e inducible. Dentro de la defensa constitutiva tenemos a la defensa física; ésta incluye la pared celular, cuyo grosor, significación y permeabilidad determinan su eficacia frente a los patógenos. Esta defensa es como un muro que protege a una ciudad de un ejército invasor y, dependiendo su fortaleza, mayor resistencia podrá presentar. En la defensa inducible se encuentra la defensa química, que consiste en metabolitos secundarios y primarios que inhiben el crecimiento de los patógenos y previenen futuras invasiones. Esto se asemeja a los antibióticos tomados por los humanos para hacer frente a las infecciones. Otra defensa inducible en plantas es el sistema inmunológico vegetal, que reconoce y ataca a los patógenos de manera especializada (Sun et al., 2020). El papel del N como molécula señal ha sido estudiado en el contexto de la fertilización con NH_4^+ o NO_3^- . Las evidencias muestran que las plantas presentan respuestas contratantes a los patógenos dependiendo de la fuente de N con la que ha sido fertilizada. Se ha demostrado que la fertilización con NH_4^+ puede aumentar la susceptibilidad de las plantas a los patógenos, debido a la disminución de los niveles de óxido nítrico (NO, por sus siglas en inglés), una molécula clave en la defensa vegetal. El NO se compara con la sirena de una alarma que avisa a toda la planta sobre la presencia de un ataque por patógeno, por lo que se necesita actuar en respuesta. Sumado a esto, la fertilización con NH_4^+ modifica otros componentes en la planta que dan lugar a una mayor susceptibilidad, como el aumento de azúcares y aminoácidos en el sistema vascular, lo que atrae a los patógenos debido a que tienen disponibilidad de alimento “atractivos” para ellos, así como una reducción en las concentraciones de ácido salicílico y poliaminas, que son moléculas importantes para la defensa vegetal. Asimismo, se ha reportado un aumento del ácido gamma-aminobutírico (GABA), que sirve como fuente de energía para los patógenos. Por otro lado, la nutrición con NO_3^- muestra resultados contrastantes. Las concentraciones de NO aumentan, la cantidad de azúcares y aminoácidos disponibles para los patógenos disminuyen, los contenidos de ácido salicílico y poliaminas aumentan y, finalmente, los contenidos de

GABA disminuyen. Esto propicia un ambiente adecuado para que las plantas puedan defenderse (Mur et al., 2016). Entonces, dependiendo de con cuál fuente de N se “alimenten”, las plantas pueden ser más o menos susceptible a las plagas.

El NO es una molécula señal producida a partir del NO_3^- y juega un papel clave en la defensa de las plantas frente a patógenos como bacterias, hongos y virus. Diversos estudios han demostrado que esta señal activa un mecanismo denominado respuesta sistémica adquirida (SAR, por sus siglas en inglés), mediante el cual la planta adquiere una especie de “memoria defensiva”. Este proceso puede compararse con lo que ocurre en una escuela tras un accidente ocasionado por un descuido: una vez ocurrido el accidente, se establecen reglas de seguridad que no solo aplican en esa escuela, sino que se extienden a todas las demás con el fin de prevenir que la situación vuelva a repetirse. Tras la activación de SAR, la planta puede desencadenar la respuesta hipersensible (HR, por sus siglas en inglés) en el sitio de la infección. Este proceso corresponde a una forma de muerte celular programada, también descrita como un “suicidio celular”, mediante el cual las células infectadas se autodestruyen para impedir la propagación del patógeno. Este proceso protege a la planta del avance de la infección y, en última instancia, de la supervivencia (Sun et al., 2020). La HR en plantas puede compararse con un incendio forestal: cuando el fuego amenaza con propagarse, los brigadistas cortan una franja de árboles aún sanos para crear un cortafuegos. De esta manera, el incendio se detiene y se logra proteger la mayor parte del bosque.

Estos hallazgos pueden ser útiles para diseñar estrategias de fertilización orientadas a mejorar la resistencia de los cultivos a patógenos específicos, y así disminuir o evitar la aplicación de químicos dañinos para la salud. Por ejemplo, un estudio demostró que la fertilización con NO_3^- aumenta la tolerancia del trigo al hongo fitopatógeno *Blumeria graminis*, que causa la enfermedad del “oídio” de los cereales (Maywald et al., 2022) (Figura 3-A). Asimismo, se ha observado que el NO_3^- induce la HR frente a la bacteria fitopatógena *Pseudomonas syringae* que causa manchas necróticas, mientras que el NH_4^+ no lo hace (Gupta et al., 2013) (Figura 3-B). Sin embargo, aún es necesario realizar más investigaciones, ya que algunos estudios han reportado efectos contrarios, como el caso del hongo fitopatógeno



Magnaporthe oryzae que causa la devastadora enfermedad conocida como piricularia en plantas de arroz, donde el NH_4^+ aumenta la tolerancia (Wang et al., 2024).

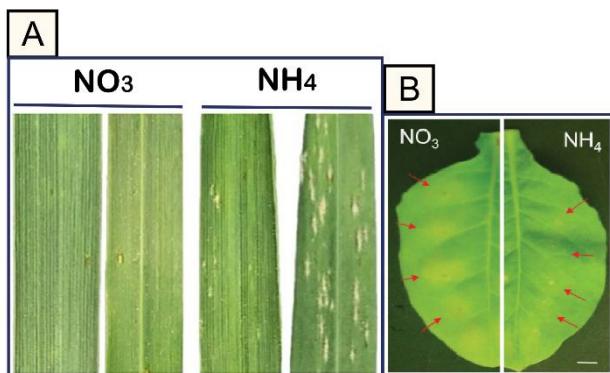


Figura 3. A) Hojas de trigo que fueron fertilizadas con NO_3^- o NH_4^+ y posteriormente infectadas con *Blumeria graminis*. Luego de 14 días de la inoculación se observaron las lesiones provocadas en las hojas. B) En la imagen se observa la mitad de una hoja de plantas de tabaco nutrita con NO_3^- y la otra mitad de plantas nutritas con NH_4^+ . Las hojas fueron inoculadas con *Pseudomonas syringae* y luego de 24 h se observó la HR. A) Imagen tomada de Maywald et al., (2022). B) Imagen tomada de Gupta et al., (2013).

Por consiguiente, el NO_3^- además de ser un nutriente mineral para las plantas, se puede considerar como una molécula señal importante debido a que se ha demostrado que en solo 20 minutos después de tener contacto con las raíces de las plantas, puede inducir la expresión de genes relacionados con la defensa, la respuesta al estrés oxidativo y enzimas relacionadas con la síntesis de metabolitos secundarios que son compuestos de defensa (Islam et al., 2022) (Figura 4). Podemos imaginar a las raíces de las plantas como una central de control que recibe información del ambiente. En este escenario, el NO_3^- no es solo un “alimento” que nutre a la planta, sino que actúa como un mensajero, parecido a un sistema de alertas tempranas en una ciudad. Cuando este mensajero llega a las raíces, es como si en minutos se encendieran sirenas y pantallas de control que activan diferentes departamentos: unos encargados de reforzar las defensas de la ciudad (genes de defensa), otros que preparan maquinaria para manejar situaciones de emergencia como incendios o inundaciones (respuesta al estrés oxidativo) y otros que comienzan a

producir recursos especiales para proteger la ciudad, como medicamentos o barreras defensivas (enzimas para metabolitos secundarios). Esto refuerza el hecho de que definitivamente el NO_3^- tiene una función dual: como nutriente y como molécula señal.

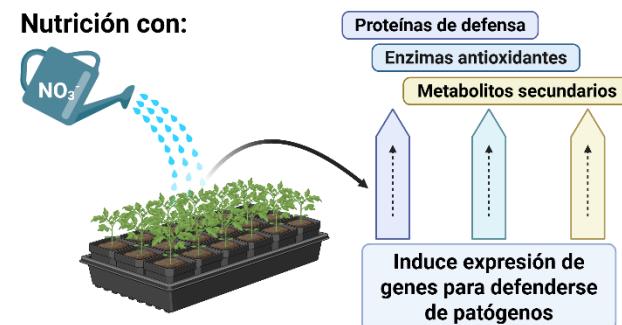


Figura 4. Efecto de la nutrición con NO_3^- en la inducción de genes de defensa. Imagen diseñada con BioRender.com

CONCLUSIÓN

La nutrición mineral de las plantas es un aspecto clave para el rendimiento agrícola. Si bien los 14 nutrientes minerales esenciales son necesarios para su óptimo desarrollo, el N es el más crítico debido a su deficiencia en los suelos y su impacto en la fisiología vegetal, por lo cual su papel resulta central en la regulación de muchos procesos en las plantas. No solo basta la cantidad de N a aplicar, sino que es necesaria una atención especial en la fuente de N utilizada en la fertilización, ya que las consecuencias de usar una u otra puede influir fuertemente en la resistencia a enfermedades. Es necesario continuar investigando para comprender mejor estos efectos en diferentes especies vegetales y optimizar las prácticas agrícolas.

Agradecimientos

Agradecemos al SECIHTI por la beca posdoctoral otorgada a Federico García Laynes (710267) y Fabiola Guadalupe León García (809365). También agradecemos al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. por las instalaciones e infraestructura proporcionada.

Literatura citada

Dimkpa, C.O., Fugice, J., Singh, U., Lewis, T.D., 2020. Development of fertilizers for enhanced nitrogen use



Revista de Divulgación y Transferencia Tecnológica

- efficiency – Trends and perspectives. *Sci. Total Environ.* 731, 139113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139113>
- Govindasamy, P., Muthusamy, S.K., Bagavathiannan, M., Mowrer, J., Jagannadham, P.T.K., Maity, A., Halli, H.M., G. K., S., Vadivel, R., T. K., D., Raj, R., Pooniya, V., Babu, S., Rathore, S.S., L., M., Tiwari, G., 2023. Nitrogen use efficiency—a key to enhance crop productivity under a changing climate. *Front. Plant Sci.* 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1121073>
- Gupta, K.J., Brotman, Y., Segu, S., Zeier, T., Zeier, J., Persijn, S.T., Cristescu, S.M., Harren, F.J.M., Bauwe, H., Fernie, A.R., Kaiser, W.M., Mur, L.A.J., 2013. The form of nitrogen nutrition affects resistance against *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* in tobacco. *J. Exp. Bot.* 64, 553–568. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers348>
- Islam, S., Islam, R., Kandwal, P., Khanam, S., Proshad, R., Kormoker, T., Tusher, T.R., 2022. Nitrate transport and assimilation in plants: a potential review. *Arch. Agron. Soil Sci.* 68, 133–150. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1826042>
- Liao, G., Yang, Y., Xiao, W., Mo, Z., 2023. Nitrogen Modulates Grain Yield, Nitrogen Metabolism, and Antioxidant Response in Different Rice Genotypes. *J. Plant Growth Regul.* 42, 2103–2114. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10684-4>
- Maywald, N.J., Mang, M., Pahls, N., Neumann, G., Ludewig, U., Francioli, D., 2022. Ammonium fertilization increases the susceptibility to fungal leaf and root pathogens in winter wheat. *Front. Plant Sci.* 13, 946584. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.946584>
- Mur, L.A.J., Simpson, C., Kumari, A., Gupta, A.K., Gupta, K.J., 2016. Moving nitrogen to the centre of plant defence against pathogens. *Ann. Bot.* mcw179. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw179>
- Rengel, Z., Cakmak, I., White, P.J., 2022. Marschner's Mineral Nutrition of Plants. Academic Press.
- Sun, Y., Wang, M., Mur, L.A.J., Shen, Q., Guo, S., 2020. Unravelling the Roles of Nitrogen Nutrition in Plant Disease Defences. *Int. J. Mol. Sci.* 21, 572. <https://doi.org/10.3390/ijms21020572>
- Tripathi, R., Tewari, R., Singh, K.P., Keswani, C., Minkina, T., Srivastava, A.K., De Corato, U., Sansinenea, E., 2022. Plant mineral nutrition and disease resistance: A significant linkage for sustainable crop protection. *Front. Plant Sci.* 13, 883970. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.883970>
- Wang, S., Zeng, J., Zhang, T., Yang, L., Yang, Y., Lu, Z., Jin, X., Wang, M., Guo, S., 2024. Ammonium enhances rice resistance to *Magnaporthe oryzae* through H₂O₂ accumulation. *Plant Physiol. Biochem.* 215, 109058. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.109058>

Aviso legal/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente de los autores y colaboradores, y no de Agraria ni de sus editores. Agraria y sus editores no se responsabilizan de ningún daño a personas o bienes que resulte de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

