

FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS Y NO CIENTÍFICOS EN EL POSICIONAMIENTO AGRONÓMICO DE FERTILIZANTES DE EFICIENCIA MEJORADA

Martín Torres Duggan

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Escuela para Graduados (EPG) "Alberto Soriano"

Tecnoagro, Argentina

E-mail: mjjtorresduggan@gmail.com

RESUMEN

Dentro de las herramientas agronómicas disponibles para aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes en los agroecosistemas se encuentran los fertilizantes de eficiencia mejorada. Estos fertilizantes presentan características intrínsecas que aumentan la absorción de los nutrientes o reducen la pérdida de estos bajo determinadas condiciones de suelo y/o ambiente. Dentro del espectro de fuentes de nutrientes de eficiencia mejorada, los inhibidores de la ureasa y la nitrificación son las que han demostrado resultados más consistentes. Por el contrario, los resultados de investigaciones sobre la capacidad de los fertilizantes fosfatados de aumentar la eficiencia agronómica de fósforo (P) (*i.e.* EUP), la absorción de P (*i.e.* eficiencia de recuperación de P) o reducir la fijación de P en el suelo han sido, en general, poco consistentes. Sin embargo, existen empresas en la Argentina que posicionan formulaciones fosfatadas (*e.g.* fuentes microgranuladas o líquidas) utilizando argumentos técnicos o propuestas de valor sin fundamentación científica. Los fundamentos utilizados (*i.e.* falacias, o argumentos confusos o ambiguos) no solo son cuestionables desde la ética profesional sino también por su impacto en el agroecosistema. Así, las empresas habitualmente recomiendan dosis de producto (y de P) considerablemente más bajas que las utilizadas con fertilizantes tradicionales argumentando una mayor eficiencia agronómica relativa. La adopción de estas recomendaciones reduce drásticamente el aporte de P a los cultivos y magnifica los balances negativos de P. En consecuencia, la deficiencia de este nutriente en los suelos de la región pampeana afectaría a largo plazo la productividad y rentabilidad de los cultivos.

Palabras clave: fósforo, fertilizantes microgranulados, eficiencia agronómica, región pampeana, impacto ambiental.

SCIENTIFIC AND NON-SCIENTIFIC BASIS FOR THE AGRONOMIC POSITIONING OF ENHANCED EFFICIENCY FERTILIZERS

ABSTRACT

Among the agronomic tools available to increase nutrient use efficiency in agroecosystems are enhanced-efficiency fertilizers. These fertilizers possess intrinsic characteristics that increase nutrient uptake or reduce nutrient loss under specific soil and/or environmental conditions. Within the spectrum of enhanced-efficiency nutrient sources, urease and nitrification inhibitors have demonstrated the most consistent results. Conversely, research results on the ability of phosphate fertilizers to increase agronomic P efficiency (*i.e.* PUE), P uptake (*i.e.* P recovery efficiency), or reduce P fixation in the soil have generally been inconsistent. Nevertheless, some companies in Argentina are positioning phosphate formulations (*e.g.*, micro granulated or liquid sources) using technical arguments or value propositions lacking scientific basis. The underlying principles used (fallacies, or confusing or ambiguous arguments) are questionable not only from a professional ethics standpoint but also due to their impact on the agroecosystem. Thus, companies routinely recommend lower fertilizer and applied P rates compared to traditional fertilizers, arguing for greater relative agronomic efficiency. Adopting these recommendations drastically reduces phosphorus input to crops and magnifies negative phosphorus balances. Consequently, phosphorus deficiencies in the soils of the Pampas region would affect crop productivity and profitability in the long term.

Key words: phosphorus, microgranulated fertilizers, agronomic efficiency, Pampas region, environmental impact.

FERTILIZANTES DE EFICIENCIA MEJORADA

Desde que se desarrollaron los primeros fertilizantes, tanto en Estados Unidos como en Europa, ha sido de interés académico y de la industria el desarrollo de fertilizantes que permitan aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes y reducir el impacto ambiental de la fertilización. Así, en las últimas décadas se han utilizado términos tomados del idioma anglosajón que pueden traducirse al castellano como "fertilizantes de liberación lenta o controlada", mientras que, en tiempos recientes, se han propuesto expresiones o términos como "fertilizantes de eficiencia mejorada", "estabilizadores de nitrógeno", "fertilizantes inteligentes", entre otros. Más allá del nombre, todos estos fertilizantes tienen un denominador común: propiedades y/o atributos específicos que pueden mejorar la respuesta a la fertilización o algún indicador de eficiencia, como la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados, la recuperación en biomasa o reducir las pérdidas de los nutrientes fuera del sistema suelo-cultivo.

Diversos trabajos han analizado las características y funcionamiento agronómico de diferentes tipos de fertilizantes de eficiencia mejorada, principalmente, en lo que se refiere a fuentes nitrogenadas y fosfatadas. Revisiones y metaanálisis publicados en las últimas décadas mostraron avances considerables y consistentes del uso de inhibidores de la ureasa y de la nitrificación (*i.e.* estabilizadores de nitrógeno), los cuales permiten mejorar el rendimiento de los cultivos y/o mitigar las pérdidas de nitrógeno (N) bajo condiciones que normalmente favorecen la volatilización de amoníaco o la lixiviación de nitratos (Chien *et al.*, 2009; Thapa *et al.*, 2016; McClellan *et al.*, 2025). Por el contrario, los fertilizantes fosfatados de eficiencia mejorada no tuvieron un desarrollo homólogo y consistente como el mencionado para los estabilizadores de N. Así, a pesar de que se progresó considerablemente en la comprensión de la dinámica del fósforo (P) en el sistema suelo-cultivo, la evaluación experimental demostró que, en general, las innovaciones en fertilizantes fosfatados no han permitido aumentar la biodisponibilidad (*i.e.* eficiencia de recuperación) del P aplicado (Chien *et al.*, 2014; Weeks y Hettiarachchi, 2019; García, 2025). Las excepciones que se pueden citar en cuanto a innovaciones en formulaciones de fuentes fosfatadas de eficiencia mejorada son pocas. Por un lado, en el metaanálisis realizado por Hopkins *et al.* (2018), se evaluó el uso del ácido maleico itacónico como aditivo de fertilizantes fosfatados. En

este trabajo se indicaron aumentos medios del 2,1% ($n= 503$) en el rendimiento, porcentaje que ascendió al 5,8% cuando se consideraron solo los resultados de ensayos realizados en suelos con bajo contenido de P extractable y una condición de pH extremo (ácido o alcalino) donde prevalece mayor fijación de P. Estas condiciones de elevada fijación de P no son frecuentes en la mayor parte de los suelos de la región pampeana. Sin embargo, las empresas que comercializan estos aditivos no suelen resaltar en qué condiciones predisponentes se esperan ventajas y/o beneficios del uso. Por otro lado, se demostró que el uso de fuentes de P líquidas en suelos calcáreos genera menor formación de precipitados de P y calcio y, consiguientemente, una mayor recuperación aparente del P aplicado cuando se compara con fuentes fosfatadas granuladas (Holloway *et al.*, 2001).

FUNDAMENTOS NO CIENTÍFICOS UTILIZADOS EN AGRONOMÍA: IMPLICANCIA TÉCNICAS Y ÉTICAS

Las propuestas de valor utilizadas por las empresas proveedoras de fertilizantes deben sustentarse en fundamentos científicos; la ciencia en general, y la experimental en particular, deberían ser la base para fundamentar las recomendaciones de fertilización. Sin embargo, actualmente, la ciencia se ve amenazada por sistemas de pensamiento dogmático y por el uso de falacias en la fundamentación técnica. El pensamiento dogmático es especialmente riesgoso cuando se mimetiza o se presenta de un modo aparentemente científico y se utiliza como base para tomar decisiones sobre el uso de tecnologías agrícolas. Un ejemplo extremo es el caso Sri Lanka, donde la prohibición de importar "fertilizantes químicos" trajo aparejada una abrupta caída en la producción de alimentos y un impacto negativo en la economía del país (Drechsel *et al.*, 2025). Asimismo, las falacias utilizadas para argumentar la venta de fertilizantes representan verdaderas "quimeras". Algunos de los casos de argumentos falaces que se pueden encontrar en folletos y/o presentaciones de empresas en la Argentina los considero especialmente graves y en determinadas ocasiones no respetan los principios de ética profesional. A continuación, se abordan algunos ejemplos para (i) fertilizantes fosfatados microgranulados y (ii) fuentes fosfatadas líquidas.

Fertilizantes fosfatados microgranulados

En general, los fertilizantes fosfatados microgranu-

lados se formulan con fuentes de P solubles en agua (e.g. fosfatos de amonio o superfosfatos) en polvo, produciendo gránulos pequeños, usualmente en el rango de 1-2 mm. A pesar de que la evidencia experimental demostró hace mucho tiempo que la eficiencia de recuperación aparente de P varía entre 10% y 35%, dependiendo del tipo de suelo, cultivo y método de aplicación de P (Dobermann, 2007) y que la absorción de P no se relaciona con la granulometría de fuentes fosfatadas solubles en agua (Fertilizer Manual, 1998; Rodella, 2018), algunas empresas basan sus propuestas de valor recomendando dosis muy bajas de producto y de P basándose, falazmente, en una supuesta mayor eficiencia de estas fuentes fosfatadas. Así, es muy habitual que se recomienden dosis de 20 o 30 kg ha⁻¹ (i.e. 3-5 kg P ha⁻¹, según formulación) reemplazando 80-100 kg ha⁻¹ de fuentes como fosfato monoamónico ("MAP"; i.e. 18-22 kg P ha⁻¹). El argumento utilizado para posicionar estos productos se fundamenta en la menor granulometría y/o aplicación "ultralocalizada". Sin embargo, más allá de que estas partículas presentan una granulometría inferior al rango utilizado en todo el mundo para la comercialización de fertilizantes granulados (i.e. 2-4 mm), la aplicación no deja de ser localizada o en bandas.

Cabe aclarar que, a diferencia de lo mencionado anteriormente para los fertilizantes fosfatados solubles en agua, la granulometría incide en la reactividad y la liberación de P de fuentes insolubles en agua como la roca fosfórica. En este tipo de fertilizantes, a menor tamaño

de partícula, mayor es la reactividad del producto (Zapata y Roy, 2004; Torres Duggan, 2022). Esto mismo ocurre con otros materiales, como las rocas carbonatadas (e.g. caliza, dolomía) o el azufre elemental (Torres Duggan *et al.*, 2008; Hermmann y Torres Duggan, 2016).

Comparación de fuentes de eficiencia mejorada en experimentos agronómicos

En la Figura 1 se muestra un ejemplo hipotético de un experimento de comparación de fuentes fosfatadas solubles en agua: (i) microgranulada y (ii) granulada convencional, en un cultivo de soja en un suelo con condiciones de fertilidad edáfica habituales en la región pampeana, caracterizadas por una baja retención y fijación de fosfatos. En este ejemplo, las dos fuentes presentan el P como fosfato de amonio. Los resultados que se muestran de rendimiento con los distintos tratamientos no provienen de un ensayo real, sino pretende recrear la forma habitual en la que se los presenta en folletos comerciales. Asimismo, la información sobre características de fertilidad de los suelos también tiene un fin didáctico de aportar un contexto sobre el cual poder discutir conceptos. El producto postulado como de "eficiencia mejorada" tiene 10% N; 17% P, 4% S como sulfato y 2% Zn como sulfato de zinc, y una granulometría de 1-2 mm. El tratamiento testigo no recibió aplicación de fertilizantes (i.e. solo se inoculó para garantizar una adecuada fijación biológica de N).

Basándonos en la Figura 1 no es posible afirmar nada

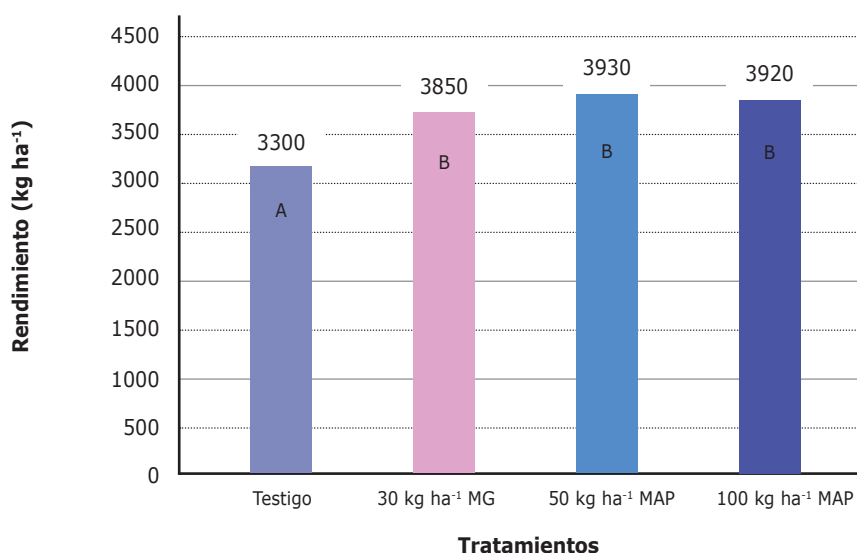


Figura 1. Rendimiento de soja de primera (kg ha⁻¹) en un suelo Hapludol típico de General Villegas, provincia de Buenos Aires, en respuesta a la aplicación de dos tipos de fertilizantes fosfatados solubles en agua (microgranulado (MG) y granulada convencional) a diferentes dosis. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas (LSD, $\alpha = 0,05$). Características de fertilidad en la capa superficial (0-20 cm): MO= 2%; pH= 5,8; P Bray= 13 ppm; Zn extraíble= 0,9 ppm; S-sulfato= 4 ppm.

Nota: los datos del suelo y su localización geográfica corresponden a suelos con muy baja retención hídrica y fijación de fosfatos. MAP: fosfato monoamónico.

sobre la EUP (*i.e.* eficiencia agronómica o de uso del P, aumento de rendimiento por cada kg de P aplicado), la eficiencia de recuperación aparente del P (*i.e.* P absorbido en biomasa aérea o grano en relación al P aplicado) de las fuentes comparadas. Para poder hacerlo adecuadamente, es necesario evaluar las dos fuentes en un rango de dosis de P (*i.e.* las mismas dosis de P para ambas fuentes) aplicadas en el mismo momento y forma de colocación. Con dicho diseño experimental es posible determinar la eficiencia agronómica relativa de las fuentes fosfatadas, en términos de la respuesta al agregado de P (kg^{-1} de P aplicado; *i.e.* EUP), o directamente medir o estimar la eficiencia de recuperación aparente de P (ERP). Sin hacer esto, no es posible afirmar o postular que la fuente microgranulada tiene mayor EUP o ERP. En todo caso, lo que se estaría comparando en la Figura 1 son diferentes dosis de P de fuentes solubles en agua, para las cuales no se esperarían diferencias en EUP si se eliminan los efectos de los nutrientes acompañantes (García, 2025). Por lo tanto, en realidad se trataría más bien de un ensayo de comparación de dosis de P de fuentes solubles en agua. Además, como la EUP media se reduce cuando aumenta la dosis del nutriente agregado (en este caso el P), en una comparación de dos fuentes agregadas con dosis distintas, es muy probable que tenga mayor eficiencia agronómica la fuente aplicada con la dosis más baja. Así, si en el ejemplo de la Figura 1 se hubiera aplicado la fuente granulada (MAP) en la dosis más baja y la fuente microgranulada en la dosis más alta, el resultado hubiera sido el inverso: se habría concluido falazmente que el MAP es más eficiente que el microgranulado cuando en realidad las diferencias se originan por las distintas dosis de P de las fuentes comparadas. Asimismo, en el ejemplo planteado se incluyó el análisis estadístico de comparación de medias de tratamientos. Sin embargo, es frecuente que los resultados de los ensayos se presenten sin análisis estadístico, lo que dificulta su interpretación.

Fuentes fosfatadas líquidas

La investigación científica internacional demostró que existe una mejora moderada en el rendimiento y en la EUP de los fertilizantes fosfatados líquidos en suelos calcáreos (Melgar y Torres Duggan, 2014). Para ello, se llevaron a cabo experimentos en los que se evaluó la misma fuente, en dosis crecientes, aplicadas en un mismo momento y ubicación, modificando solamente la forma física: (i) líquido o (ii) granulada. En estos estudios también se pudo demostrar que el mecanismo que

explicó la mayor recuperación de P en los tratamientos con fertilizantes fosfatados líquidos fue la menor formación de compuestos de baja solubilidad P-Ca (*i.e.* mayor labilidad) (Lombi *et al.*, 2004). En contraste, en suelos ácidos afectados por la presencia de aluminio (Al) soluble, la fertilización con fuentes fosfatadas líquidas aumentó la fijación de P y, por consiguiente, redujo la EUP. A pesar de contar con estos antecedentes científicos, algunas empresas en la Argentina que comercializan fosfatos de amonio líquido plantean equivalencias fijas (*i.e.* para todo tipo de suelo) entre el "MAP líquido" y el "MAP tradicional". La propuesta técnico-comercial se sustenta en recomendar dosis muy bajas de MAP formulado en forma líquida (*e.g.* 30-50 l ha^{-1} , *i.e.* 3-4 kg P ha^{-1}) que, según estas empresas, equivaldrían a dosis de 80 o 100 kg ha^{-1} de MAP (*i.e.* 18-23 kg P ha^{-1}). En los folletos comerciales y/o presentaciones se resalta que el P aplicado en forma líquida es 100% aprovechable a diferencia del granulada. Sin embargo, este argumento es falaz, ya que, de ser verdadero, implicaría que todo el P aportado por el fertilizante líquido sería absorbido por la planta, lo cual omite el conocimiento vigente sobre los rangos que se han estudiado en cuanto a la recuperación aparente de P citado previamente.

Argumentos atractivos pero alejados del conocimiento científico

Los argumentos mencionados en los ejemplos anteriores resultan atractivos desde la propuesta de valor ya que prometen el mismo (o mayor) rendimiento con una dosis considerablemente más baja de producto o de P, lo que resultaría en una reducción de los gastos de fertilización y/o logística. En un espectro de productores agropecuarios, cuyas decisiones de manejo están basadas en minimizar costos y riesgos, principalmente en el manejo de cultivos sembrados en campos alquilados, estos productos que se postulan como de aplicación a baja dosis ha^{-1} podrían constituirse como un insumo con alta adopción. Sin embargo, la fundamentación subyacente o utilizada explícitamente en las propuestas de valor empleadas por las empresas es falaz y las consecuencias agronómicas son graves: se soslayan los efectos que produce la aplicación de dosis tan bajas de P. Los principales impactos negativos se presentarían en agravar la situación de balances de P que actualmente ya son negativos a escala regional (*i.e.* remoción de P en granos mayor a la aplicada) sobre todo en el cultivo de soja y en campo alquilado que es el modelo prevalente.

Si bien los ejemplos mencionados se basan en casos del ámbito argentino, se observan a escala global iniciativas y publicaciones de científicos reconocidos que alertan sobre la relevancia de garantizar la evidencia científica y el uso de metodologías experimentales consistentes y adecuadas para evaluar fertilizantes de eficiencia mejorada (Lyons *et al.*, 2025). Así, una adecuada planificación e indagación científica y la consideración de pautas y lineamientos fundamentales del diseño experimental utilizado en las ciencias biológicas, agronómicas y del suelo permitirán demostrar la efectividad y eficiencia de los fertilizantes de eficiencia mejorada, y sobre todo

conocer cuáles son sus modos y mecanismos de acción que explican los beneficios o mejoras en la eficiencia postulados por las empresas que comercializan estos fertilizantes.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a los editores de la revista *Agronomía & Ambiente* y al Ing. Agr. Dr. Flavio Gutiérrez Boem (FAUBA, CONICET) por las sugerencias y correcciones que mejoraron considerablemente la claridad del manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Chien, S. H., Prochnow, L. I. y Cantarella, H. (2009). Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*, 102, 267-322. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(09\)01008-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(09)01008-6)
- Fertilizer Manual (1998). Physical properties of fertilizer. *United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and International Fertilizer Development Center (IFDC)* (Cap. 18, pp. 471-505).
- Dobermann, A. (2007). *Nutrient use efficiency – measurement and management*. IFA Fertilizer best management practices workshop.
- Drechsel, P., Madhuwanthi, P., Nisansala, D., Ramamoorthi, D. y Bandera, T. (2025). *On the feasibility of an agricultural revolution: Sri Lanka's ban of chemical fertilizers in 2021*. *Food Security*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s12571-025-01528-6>
- García, F. O. (2025). *Fertilizer best management practices for sustainable phosphorus management in cereal-based cropping systems*. Global Phosphorus Institute. <https://www.preprints.org/manuscript/202503.0557>
- Herrmann, C. y Torres Duggan, M. (2016). Fertilizantes y enmiendas de origen mineral: caracterización y uso en la Argentina. En: F. X. Pereyra y M. Torres Duggan (Eds.). *Suelos y Geología Argentina. Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACCS)* (pp. 329-355). Asociación Geológica Argentina (AGA). Universidad Nacional de Avellaneda (UNDAV).
- Holloway, R., Bertrand, I., Frischke, A., Brace, D., McLaughlin, M. y Shepperd, W. (2001). Improving fertilizer efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn. *Plant and Soil*, 236, 209-219.
- Hopkins, B., Fernelius, K. J., Hansen, N. C. y Eggett, D. L. (2018). Avail phosphorus fertilizer enhancer: meta-analysis of 503 field evaluations. *Agron. J.*, 110, 389-398. doi:10.2134/agronj2017.07.0385
- Lombi, E., McLaughlin, M. J., Johnston, C., Armstrong, R. D. y Holloway, R. E. (2004) Mobility and Lability of Phosphorus from Granular and Fluid Monoammonium Phosphate Differs in a Calcareous Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 682-689.
- Lyons, S. E., Arnall, D. B., Ashford-Kornburger, D., Brouder, S. M., Christian, E., Dobermann, A., Haefele, S. M., Haegele, J., Helmers, M. J., Jin, V. L., Margenot, A. J., McGrath, J. M., Morgan, K. T., Murrell, T. S., Osmond, D. L., Pelster, D. E., Slaton, N. A., Vadas, P. A., Venterea, R. T., Volenec, J. J. y Wagner-Riddle, C. (2025). Field trial guidelines for evaluating enhanced efficiency fertilizers. *Soil Science Society of America Journal*, 89, e20787
- McClellan, T., Dobermann, C., Lyons, S. E. y Thomson, A. M. (2025). Review of research and innovation on novel fertilizers for crop nutrition. *Sustainable Agriculture*, 3(25). <https://doi.org/10.1038/s44264-025-00066-0>
- Melgar, R. y Torres Duggan, M. (2014). *Manual de Fertilizantes Fluidos*. Fluid Fertilizer Foundation. Horizonte A Ediciones.
- Rodella, A. A. (2018). Requisitos de naturaleza física. *Requisitos de qualidade dos fertilizantes minerais* (Cap. 2, pp. 23-108). International Plant Nutrition Institute (IPNI).
- Thapa, R., Chatterjee, A., Awale, R., McGranahan, D. y Daigh, A. (2016). Effect of enhanced efficiency fertilizers on nitrous oxide emissions and crop yields: A meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 80, 1121-1134.
- Torres Duggan, M., Melgar, R., Rodríguez, M. B., Lavado, R. S. y Ciampitti, I. A. (2012). Sulfur fertilization in the Argentine Pampas region: a review. *Agronomía & Ambiente*, 32(1-2), 61-73.
- Torres Duggan, M. (2022). Caracterización y manejo de fosforitas en agroecosistemas: ¿Qué sabemos y que nos falta saber? [conferencia]. XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, Argentina [resumen disponible en actas digitales].
- Weeks, Jr. y Hettiarachchi, G. M. (2019). A review of the latest in phosphorus fertilizer technology: possibilities and pragmatism. *J. Environ. Qual.*, 48, 1300-1313. doi:10.2134/jeq2019.02.0067
- Zapata, F. y Roy, R. N. (2004). *Use of phosphate rocks for sustainable agriculture*. FAO.