



Miguel Quemada
Universidad Politécnica de Madrid
José Luis Gabriel
Consejo Superior de
Investigaciones Científicas (CSIC)

Impacto de los fertilizantes y la energía en la producción de alimentos

■ En este artículo, sus autores analizan la importancia de los fertilizantes en la agricultura en tanto vía para restaurar el contenido de nutrientes de los suelos. Asimismo, señalan el alto consumo de energía (sobre todo, de gas) que se necesita para su fabricación, especialmente de los nitrogenados. Los autores plantean como alternativas la aplicación de tecnologías que permitan un menor consumo energético en la producción de fertilizantes; el desarrollo de prácticas agrícolas más eficientes, que reduzcan la cantidad de nutrientes utilizada por los agricultores en el proceso de fertilización; y una mejor interacción agricultura-ganadería en sintonía con la economía circular.

Palabras clave:

Agricultura | Ganadería | Economía circular | Eficiencia energética | Alimentación.

Desde el inicio de la guerra de Ucrania hemos visto cómo el precio de los fertilizantes ha ido aumentando a una velocidad vertiginosa y, según en qué lugares del mundo, nos encontramos que se ha triplicado o incluso cuadruplicado. Es difícil saber si la escalada de precios ha finalizado, ya que incluso se habla en los foros especializados de que podría haber una falta de fertilizantes en los próximos meses. Sin embargo, en lo que sí hay acuerdo es en que ha finalizado la época de los fertilizantes baratos, y que hemos entrado en una nueva situación en la que tendremos que acostumbrarnos a ver precios elevados durante al menos la próxima década.

Es conveniente señalar que el término “fertilizante” es amplio. La legislación europea, y por ende la española, los define como “aquellos productos que proporcionan nutrientes a las plantas para su crecimiento” y los clasifica en varios grupos, siendo algunos de ellos lo suficientemente abiertos como para incluir productos alternativos que puedan aparecer en el mercado.

El término engloba tanto a los “fertilizantes inorgánicos” (o minerales) (que son los sintetizados industrialmente o fabricados tras una extracción minera), como a los “fertilizantes orgánicos” (derivados de excrementos

y subproductos de animales, industrias agroalimentarias e incluso residuos urbanos, como los lodos de depuradoras de agua). También incluye las enmiendas calizas y orgánicas, los extractos de algas, los productos que tienen añadidos microorganismos que facilitan el acceso a los nutrientes del suelo, y las combinaciones órgano-minerales.

En concreto, el principal aumento de precios al que nos referimos en este artículo se refiere a los fertilizantes minerales, estando ello muy relacionado con el alto consumo energético que requiere su fabricación. Además, son los que, en buena medida, marcan el mercado en un doble sentido: un aumento de su precio repercute sobre el resto de productos, pero también puede abrir la oportunidad para que algunos procesos de fabricación de fertilizantes paralizados por ser demasiado onerosos, puedan resultar de nuevo interesantes en las nuevas circunstancias.

La importancia de los fertilizantes nitrogenados

El nitrógeno (N) es el nutriente más empleado por los cultivos agrícolas, y, por ello, los



La razón de la alta demanda de fertilizantes nitrogenados es que el nitrógeno es un elemento fundamental en todos los seres vivos, ya que forma parte de nuestro material genético, de los aminoácidos que conforman las proteínas, amino-azúcares... Sin nitrógeno no sería posible el desarrollo de la vida. Además, es el nutriente limitante en la mayor parte de los sistemas de cultivo y su importancia es tal, que el nitrógeno es considerado el principal factor que condiciona la producción de alimentos a nivel mundial

fertilizantes nitrogenados minerales son los más utilizados por los agricultores, tanto a nivel nacional como mundial (FAOstat, 2021). Particularmente, los cereales son los cultivos que reciben la mayor cantidad de fertilizantes nitrogenados, siendo este sector el destino de más de la mitad de los que se utilizan. Hay que tener en cuenta, además, que de los cereales (ej. arroz, trigo, maíz, cebada) depende buena parte de la nutrición de las personas y de los piensos para animales.

La razón de la alta demanda de fertilizantes nitrogenados es que el nitrógeno es un elemento fundamental en todos los seres vivos, ya que forma parte de nuestro material genético, de los aminoácidos que conforman las proteínas, amino-azúcares... Sin nitrógeno no sería posible el desarrollo de la vida. Además, es el nutriente limitante en la mayor parte de los sistemas de cultivo y su importancia es tal, que el nitrógeno es considerado el principal factor que condiciona

la producción de alimentos a nivel mundial. Hoy en día, se ha estimado que, entre un tercio y la mitad de la producción de alimentos para la humanidad, depende directa o indirectamente de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados (Erisman *et al.*, 2008).

Es por esta razón que la falta de los fertilizantes nitrogenados y su fuerte demanda está directamente relacionada con el alza del precio de los alimentos. Es más, si la situación bélica de Ucrania se prolongara aún más (como vienen advirtiendo los medios de comunicación), el impacto de la escasez de fertilizantes en el precio de los alimentos iría en aumento.

Señalemos, además, que, en estas primeras campañas, el suelo está actuando como reservorio de nutrientes, pero que, a medida que éstos vayan siendo extraídos por los cultivos, va a ser necesario reponerlos o comenzarán a verse deficiencias relevantes que afectarán drásticamente a la producción de determinados cultivos. Por lo tanto, es ne-

cesario comprender bien por qué aumenta de esta manera el precio de los fertilizantes para así pensar en estrategias alternativas que nos permitan paliar la situación a corto y medio plazo.

El aumento del precio de los fertilizantes nitrogenados

La principal razón por la que se ha producido un aumento tan rápido del precio de los fertilizantes nitrogenados es la subida del coste de los combustibles fósiles, en concreto del gas natural, que es el más utilizado para la síntesis de los fertilizantes.

Recordemos que la fabricación de los fertilizantes nitrogenados se basa en el proceso Haber-Bosch, inventado a principios del siglo XX, y que consiste en la reacción de nitrógeno e hidrógeno gaseoso para producir amoníaco (NH_3). Posteriormente, el NH_3 es utilizado para producir una gran variedad de fertilizantes nitrogenados con diferentes formulaciones o bien fertilizantes complejos que contienen otros nutrientes además de nitrógeno (Smith *et al.* col., 2020).

Una gran ventaja es que la fuente de materia prima que sirve para la síntesis de NH_3 es inagotable, ya que se trata del N_2 , un gas inerte que existe de forma mayoritaria en la atmósfera terrestre (78%). Una característica del N_2 es que está formado por dos átomos de N unidos por un fuerte enlace triple ($\text{N}\equiv\text{N}$). Para romper este enlace y acelerar la reacción del nitrógeno liberado con el hidrógeno es necesaria una gran cantidad de energía que permita elevar la presión hasta 150-200 atmósferas y la temperatura hasta 200-300 °C.

La energía necesaria para llevar a cabo el proceso de Haber-Bosch se obtiene principalmente a partir de la quema de gas natural, y por eso los precios de los fertilizantes nitrogenados están íntimamente ligados al coste de los combustibles fósiles. Existen algunas modificaciones del proceso de Haber-Bosch, como es el caso del proceso Bosch-Meier, utilizado para la síntesis de urea, pero igualmente requieren altas cantidades de energía. Para hacernos una idea de lo que supone a nivel global, en el mundo se producen en torno a 150 millones de toneladas de fertilizantes nitrogenados al año, que necesitan aproximadamente un

8,3% de la energía total consumida en el mundo. El transporte y la distribución de los fertilizantes nitrogenados también tienen asociado un consumo de energía, pero es muy bajo comparado con el que se consume en su fabricación.

La obtención de los otros dos macronutrientes necesarios para los cultivos: el fósforo (P) y el potasio (K), se realiza a partir de las rocas fosfórica y potásica, que se extraen mediante minería en los lugares donde existen menas de elevada riqueza. Sin embargo, el consumo energético de los procesos de extracción, trituración y procesamiento de estos otros fertilizantes es mucho menor que el de la síntesis de los fertilizantes nitrogenados.

Búsqueda de alternativas

La UE en su conjunto es muy poco autosuficiente en fertilizantes minerales, ya que importamos el 30% de los fertilizantes nitrogenados, el 68% de los fosfóricos y el 85% de los potásicos (Fertilizers Europe, 2021). Una parte muy relevante de estas importaciones (46%) proceden de Rusia y Bielorrusia. Es más, la cifra aparentemente baja de fertilizantes nitrogenados importados es engañosa, ya que, si bien son fabricados en la UE, el gas utilizado para producir la energía necesaria para realizar la síntesis también es importado. Lo era en gran medida de Rusia, pero desde el inicio del conflicto bélico de Ucrania, lo importamos de otros países proveedores y, en muchos casos, hemos tenido que disminuir el consumo debido a la menor disponibilidad y a su mayor coste.

Mejorar la eficiencia energética en la producción de fertilizantes

Eso explica que la industria de los fertilizantes nitrogenados lleve tiempo buscando alternativas que permitan mejorar la eficiencia energética del proceso de síntesis, o sustituir la fuente de energía utilizada para llevarlo a cabo (Smith *et al.*, 2020). Por un lado, se está avanzando en la búsqueda de nuevos catalizadores de la síntesis de amoníaco que permitan mantener la velocidad de la reacción actual, pero disminuyendo la presión y la temperatura a la que se lleva a cabo.



En los tiempos actuales, es muy importante que los agricultores realicen análisis de suelo y hoja para que los pocos fertilizantes disponibles se destinen sólo a los campos y cultivos que más lo necesitan. En esta misma línea, es una buena ocasión para potenciar las tecnologías digitales (ej. sensores, teledetección) que, combinadas con las abonadoras de dosis variable, permiten hacer aplicaciones ajustadas a las necesidades de los cultivos en cada sitio de la parcela y en el momento adecuado

Por otro lado, el empleo de paneles solares para producir la energía que permita obtener por electrolisis el hidrógeno necesario para reaccionar con el nitrógeno mejoraría mucho la eficiencia energética. La combinación de estos procesos podría llevar a la descarbonización de la fabricación de fertilizantes y dar lugar a lo que se ha llamado “amoníaco verde” o “fertilizantes nitrogenados verdes”.

En España ya se está trabajando en ese objetivo, poniendo a punto una planta en la que colaboran empresas de producción de energía fotovoltaica y de fertilizantes. Se trata de utilizar el hidrógeno como transportador de energía, pero, en este caso, basada en la proximidad de las industrias. Todavía llevará un tiempo hasta que se ponga a punto y suponga una parte importante de la producción, pero es una tecnología con un gran potencial a largo plazo. En cualquier caso, aunque desde un punto de vista energético supondrá gran ahorro, es probable que los


fertilizantes producidos con esta tecnología sean más costosos económicamente y tengan un mayor precio para los agricultores. No hay nada gratis. Cuidar el medio ambiente tiene su coste.

Reducir el consumo de fertilizantes

Analicemos, por tanto, otras alternativas que no estén basadas en la mejora de la tecnología de fabricación y que nos permitan paliar la dependencia de los fertilizantes a corto y medio plazo. Una de esas alternativas son las estrategias destinadas a mejorar la eficiencia en el uso de los nutrientes por el cultivo, es decir, a aumentar la cantidad de nutriente que es realmente utilizada por la planta. Dentro de ellas, destaca el ajuste de la aplicación de los fertilizantes a las necesidades reales de los cultivos.

España es un país en el que se constata un cierto abuso en la fertilización de los culti-

PASOS HACIA UNA FERTILIZACIÓN SOSTENIBLE ENERGÉTICA, ECONÓMICA Y MEDIOAMBIENTALMENTE...

	<p>...Cambiando las fuentes de energía para su producción: Ahora: Energías fósiles (subiendo de precio y con alta contaminación) Futuro: Energías renovables (con costes a la baja y menor contaminación)</p>	
	<p>...Cambiando los procesos de producción: Ahora: Síntesis química (con coste energético caro) Futuro: Reciclado de nutrientes y rediseño de rotaciones (fuentes más económicas)</p>	
	<p>...Cambiando su forma de uso y de aplicación: Ahora: Aplicación sistemática de grandes centros de producción Futuro: Aplicación variable y localizada en sensores y <i>bigdata</i></p>	
	<p>...Cambiando la cadena de distribución: Ahora: Importación desde grandes centros de distribución Futuro: Búsqueda de productos de proximidad</p>	

vos. La eficiencia del uso del nitrógeno es de media un 50%, lo que quiere decir que la mitad del nitrógeno utilizado no es aprovechada por las plantas (Lassaletta *et al.*, 2021). Comparado con otros países europeos de nuestro entorno, la eficiencia es baja. En parte puede justificarse por el hecho de que tenemos muchos cultivos que no producen proteínas, y necesitan aportes de nitrógeno (como pueden ser los hortalizas, frutales, olivares y viñedos) pero sigue llamando la atención que no consigamos eficiencias más elevadas en nuestros sistemas de cultivo. Los valores de eficiencia reportados para los fertilizantes fosforados son más bien del orden del 20% y están muy relacionados con la alta capacidad de retrogradación de fosfato que tienen nuestros suelos.

Por esta razón, creemos que, en los tiempos actuales, es muy importante que los agricultores realicen análisis de suelo y hoja para que los pocos fertilizantes disponibles se destinen sólo a los campos y cultivos que más lo necesitan. En esta misma línea, es una buena ocasión para potenciar las tecnologías digitales (ej. sensores, teledetección) que, combinadas con las abonadoras de dosis variable, permiten hacer aplicaciones ajustadas a las necesidades de los cultivos en cada sitio de la parcela y en el momento adecuado.

En España se ha aprobado recientemente una ayuda para la compra de fertilizantes destinada a compensar a los agricultores por el elevado coste de los insumos ligado a la

guerra de Ucrania. Sería muy conveniente que los 300 millones de euros asignados a esa ayuda no vayan destinados a la adquisición directa de fertilizantes, sino a financiar la realización de análisis o la adquisición de equipos de nuevas tecnologías que permitan disminuir la cantidad de fertilizante aplicado. De esta forma se podría reforzar el tejido de laboratorios agrarios y empresas de consultoría que, con la incorporación de personal cualificado, puedan actuar como asesores técnicos en el mundo rural.

Genotipos más eficientes en la captación de nutrientes

Para mejorar la eficiencia de nutrientes por los cultivos se debe también potenciar la obtención de genotipos más eficientes, es decir, genotipos con mayor capacidad de extracción de nutrientes, ligados en muchas ocasiones a sistemas radiculares más profundos o que exploran mayor volumen de suelo (Raya-Sereno *et al.*, 2022). Suelen ser genotipos con mayor capacidad de extracción de agua, por lo que el efecto sinérgico hídrico-nutricional se potencia mutuamente, sobre todo en condiciones de bajos insumos (Quemada y Gabriel, 2016).

Potenciar las interacciones planta-microorganismo que mejoren el acceso a formas de nutrientes poco disponibles es también una vía destacada para mejorar la eficiencia. En particular, puede ser muy relevante para

el caso del fósforo, ya que muchos de nuestros suelos tienen elevada cantidad de fósforo retenido y, utilizando microorganismos o técnicas que favorezcan su disponibilidad, puede permitir que el legado de los suelos suministre este nutriente durante varios años. Otra línea relevante en la obtención de genotipos más eficientes es buscar que el nutriente absorbido sea mejor utilizado por el cultivo para la mejora del rendimiento o de la calidad del producto, como ha sido demostrado para la utilización del N en trigo en condiciones mediterráneas (Savin *et al.* 2019).

Mejorar el uso de nutrientes al nivel de la explotación agraria

Otro objetivo debe ser desarrollar estrategias orientadas a la mejora de la eficiencia en el uso de nutrientes a nivel de sistema de cultivo o de explotación agraria. A este nivel es fundamental apoyarse en la gran capacidad de adaptación y buenos conocimientos que disponen muchos agricultores, dándoles facilidades para que los apliquen. El diseño de rotaciones en las que alternen cultivos con distintas necesidades de nutrientes y diferentes capacidades de extracción es una buena estrategia hacia sistemas más resilientes.

La introducción de leguminosas es una vía segura y bien adaptada a nuestras condiciones mediterráneas para disminuir la dependencia de los fertilizantes nitrogenados; la búsqueda de nuevas formas de incorporarlas en las rotaciones mediante cultivos intercalares, abonos verdes o intercultivos, es una línea en la que la colaboración entre agrónomos y agricultores puede proporcionar nuevas ideas o retomar algunas técnicas abandonadas (Alonso-Ayuso *et al.*, 2020).

En este rediseño de los sistemas agrarios, es importante reforzar la conexión entre los sistemas de cultivo y los de producción ganadera, de forma que los residuos orgánicos de las granjas de animales se conviertan en una fuente de nutrientes mediante sistemas de economía circular. Facilitar la recirculación de nutrientes pasa en muchas ocasiones por ayudar a los agricultores en la adquisición de la maquinaria adecuada, bien para manipular o

inyectar los estiércoles frescos y purines o bien para mezclar y triturar materiales de poda o pajas que son de descomposición más lenta.

Pero también pueden ser importantes medidas estructurales que afecten a todo un conjunto de explotaciones agrarias. Así, por ejemplo, potenciar la instalación de plantas de compostado, digestión o estabilización de residuos ganaderos en zonas de elevada densidad de granjas, puede permitir un uso más racional de los materiales orgánicos, adaptando su aplicación en el tiempo y el espacio a las necesidades de los cultivos más que a las de deshacerse de un residuo que, si está fresco, puede ser incómodo de almacenar.

De modo análogo, en zonas con alta densidad de explotaciones hortícolas, la recogida de los residuos de cultivo (muchas veces ricos en macronutrientes) para un posterior compostado y reciclado como fertilizante en forma de pellets, puede mejorar mucho la eficiencia en el uso de nutrientes a nivel del conjunto de las explotaciones. Un buen ejemplo de esta mejora lo encontramos en Almería, donde se ha potenciado la recogida y compostaje de residuos de cultivo a nivel comarcal.

Mejorar la eficiencia al nivel de la cadena alimentaria

Si pensamos a más largo plazo y a nivel de la cadena alimentaria, la mejora en la eficien-

cia de nutrientes pasa por una transformación de las dietas humanas, una disminución del desperdicio de alimentos y una mayor proporción de alimentos vegetales frente a los animales (Springmann *et al.*, 2018). La producción animal presenta en general baja eficiencia en el uso de nutrientes comparada con la vegetal, por lo que cuando se destinan tierras fértiles a cultivar productos vegetales dirigidos a la alimentación del ganado, se está produciendo una disminución en la eficiencia del uso de nutrientes. No debe confundirse esto que señalamos aquí con el caso de los animales alimentados aprovechando pastos y/o restos vegetales, en cuyo caso permiten la utilización de nutrientes que no podrían aprovechar los humanos y por lo tanto mejoran la eficiencia del sistema en su conjunto.

Las pérdidas de alimentos pueden reducirse en muchos de los eslabones de la cadena, desde el almacenamiento y transporte hasta la comercialización, restauración o en los hogares. La reutilización de algunos de los alimentos que se descartan para consumo humano como concentrados y piensos para animales es una vía para elevar su reciclaje y permitir la producción de productos animales con una mejora considerable de la eficiencia en el uso de nutrientes (Quemada *et al.*, 2020). En este sentido, los consumidores podemos colaborar a mejorar la eficiencia de nutrientes valorizando nuestros alimentos, reduciendo el desperdicio y retomando la dieta mediterránea.

Reflexiones finales

Al ser la fuente de nutrientes de nuestros cultivos, los fertilizantes, y en especial los nitrogenados, son el combustible de nuestro sistema de producción de alimentos, por lo que es fundamental hacer un uso responsable de ellos. En las últimas décadas hemos aprendido mucho sobre el impacto negativo que el abuso de fertilizantes puede tener sobre el medio ambiente y la salud humana. Las pérdidas de nutrientes asociadas a los excesos de aplicación, todavía muy comunes en nuestro país, producen un deterioro de la calidad de las aguas, tanto interiores como de costa, y tanto superficiales como subterráneas.

El exceso de fertilizantes también aumenta las emisiones gaseosas, bien de amoníaco (con sus posteriores implicaciones en la acidificación de suelos y en los cambios en la biodiversidad de los sistemas naturales en los que se deposita), bien de gases de efecto invernadero (que contribuyen al cambio climático a escala global).

La mejora de la eficiencia del uso de nutrientes en el conjunto del sistema de producción es, por tanto, una de las claves para poder producir más alimentos con menor aplicación de fertilizantes. La eficiencia en el uso de nutrientes va asociada a la mejora de la eficiencia energética, y ambas son el camino para aumentar la soberanía alimentaria en la UE, estando en sintonía con algunos de los objetivos de la estrategia “De la granja a la mesa” del Pacto Verde Europeo. ■

▼ Referencias bibliográficas

- ALONSO-AYUSO, M.; J.L. GABRIEL; J.L. PANCORBO and M. QUEMADA (2020), “Interseeding cover crops into maize: Characterization of species performance under Mediterranean conditions”, *Field Crops Research*, 249, 107762.
- ERISMAN, J. W.; M.A. SUTTON; J. GALLOWAY; Z. KLIMONT and W. WINIWARTER (2008), “How a century of ammonia synthesis changed the world”, *Nature geoscience*, vol. 1(10), pp. 636-639.
- FAOStat (2021), *Statistics Data. The Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Official website.
- FERTILIZERS EUROPE (2021), *Fertilizers industry: facts and figures*, Bruselas, Bélgica.
- LASSALETTA, L.; A. SANZ-COBENA; E. AGUILERA; M. QUEMADA; G. BILLEN; A. BONDEAU... and B.S. GIMENO (2021), “Nitrogen dynamics in cropping systems under Mediterranean climate: a systemic analysis”, *Environmental Research Letters*, 16, 073002.
- QUEMADA, M. and J.L. GABRIEL (2016), “Approaches for increasing nitrogen and water use efficiency simultaneously”, *Global Food Security-Agriculture Policy Economics and Environment*, 9, pp. 29-35.
- QUEMADA M.; L. LASSALETTA; L.S. JENSEN; O. GODINOT; F. BRENTRUP; C. BUCKLEY; S. FORAY; S.K. HVID; J. OENEMA; K.G. RICHARDS and O. OENEMA (2020), “Exploring nitrogen indicators of farm performance among farm types across several European case studies”, *Agricultural Systems*, 177, 102689.
- RAYA-SERENO, M. D.; J.L. PANCORBO; M. ALONSO-AYUSO; J.L. GABRIEL and M. QUEMADA (2023), “Winter wheat genotype ability to recover nitrogen supply by precedent crops under combined nitrogen and water scenarios”, *Field Crops Research*, 290, 108758.
- SAVIN, R.; V.O. SADRAS and G.A. SLAFER (2019), “Benchmarking nitrogen utilization efficiency in wheat for Mediterranean and non-Mediterranean European regions”, *Field Crops Research*, 241, 107573.
- SMITH, C.; A. K. HILL, and L. TORRENTE-MURCIANO (2020), “Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape” *Energy and Environmental Science*, 13.2, pp. 331-344.
- SPRINGMANN, M.; M. CLARK; D. MASON-D'CROZ; K. WIEBE; B.L. BODIRSKY; L. LASSALETTA... AND W. WILLETT (2018), “Options for keeping the food system within environmental limits”, *Nature*, 562(7728), pp. 519-525.