

# ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN Y CONTROL DE MALAS HIERBAS *para optimizar la producción y calidad de cereal*

La nueva revolución agrícola debe ser una revolución sostenible. No se trata solo de innovar, sino de transformar el sistema agrícola global para que sea productivo y compatible con la salud del planeta y de las personas.

La creciente demanda de alimentos, impulsada por el aumento de la población mundial, exige un aumento considerable de la producción agrícola. Aunque la *Revolución Verde* abordó esta cuestión, su sostenibilidad está siendo cuestionada debido al uso excesivo de fertilizantes químicos, pesticidas y herbicidas.

J.M. ARJONA, F.J. CIUDAD-BAUTISTA, N. APARICIO  
Área de Investigación Agrícola. Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León

**L**a fertilización garantiza que los cultivos reciban los nutrientes esenciales en las etapas adecuadas de su desarrollo, en particular nitrógeno, fósforo y potasio, que son fundamentales para la fotosíntesis, el desarrollo de las hojas y las raíces, y la formación de granos. Una fertilización adecuada es clave para maximizar el rendimiento y la calidad de los cereales sin comprometer la sostenibilidad agrícola, entendida como la capacidad de producir alimentos de forma continua sin provocar una degradación e impacto medioambiental.

En las estrategias «De la granja a la mesa» y «Biodiversidad», la Comisión Europea presentó su plan para la agricultura europea para 2030, con el objetivo de reducir las pérdidas de

nutrientes al medio ambiente procedentes de fertilizantes en al menos un 50%, al tiempo que se garantizase el no deterioro de la fertilidad del suelo, lo cual implicaría una reducción del 20% en el uso de fertilizantes. Este objetivo solo puede alcanzarse mediante esfuerzos colectivos, y una combinación de diferentes herramientas.

El garantizar que la fertilización se realice en los momentos óptimos puede mejorar la estabilidad del rendimiento, aumentar la eficiencia de los recursos y mitigar el impacto medioambiental. Sin embargo, se está observando, por ejemplo, que la eficiencia en el uso del nitrógeno de los cereales ha descendido hasta aproximadamente el 34% (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2022),

y el 56% restante del fertilizante nitrogenado se pierde en el suelo y el agua, o se reduce a óxido nitroso por desnitrificación.

## **Nuevos fertilizantes innovadores**

Es por ello que se está trabajando en el desarrollo de nuevos fertilizantes innovadores, como fertilizantes de liberación controlada y estabilizados (con nitrificación/ureasa-inhibidores) para reducir pérdidas por volatilización y lixiviación, así como bioestimulantes foliares que combinan microelementos y hormonas vegetales, o los nanofertilizantes.

Los fertilizantes de liberación controlada y los de liberación lenta utilizan mecanismos físicos y/o químicos para liberar gradualmente los nutrientes a lo largo del tiempo, de modo que su



**FOTO 1**  
Sensores para evaluar el estado nutricional del cultivo, GreenSeeker (izq.) y SPAD (dcha).

disponibilidad se ajuste a las necesidades nutricionales de las plantas durante su ciclo de crecimiento, lo que aumenta la eficiencia en el uso del nitrógeno y reduce la frecuencia de aplicación. Por otro lado, los inhibidores son compuestos que se añaden a los fertilizantes nitrogenados para reducir las pérdidas de nitrógeno a la atmósfera o a las aguas subterráneas tras su aplicación. En el suelo, los inhibidores retrasan la descomposición del nitrógeno ureico o del amoniacal, reduciendo así las pérdidas de nitrógeno y de esta manera se contribuye a una mayor eficiencia en el uso de nutrientes.

Los nanofertilizantes, desarrollados mediante nanotecnología, utilizan materiales a escala nanométrica (equivalente a millonésimas de milímetro) para mejorar la forma en que se suministran los nutrientes a las plantas. Estos productos permiten una liberación controlada de los nutrientes, según las necesidades de la planta, incrementan la superficie de contacto con las raíces y hojas, y, además, las nanopartículas pueden llegar hasta el interior de las células vegetales.

Por último, los biofertilizantes y microorganismos promotores se basan en bacterias y hongos benéficos que aumentan la disponibilidad de nu-

## Una fertilización adecuada es clave para maximizar el rendimiento y la calidad de los cereales sin comprometer la sostenibilidad agrícola

trientes en el suelo y estimulan el crecimiento de la planta. Entre ellos destacan: *Rhizobium* y *Azotobacter* (fijadores de N); hongos micorrízicos (facilitan la absorción de P); bacterias solubilizadoras de fósforo (*Bacillus*, *Pseudomonas*); y otros promotores del crecimiento que producen hormonas de crecimiento como auxinas y citocininas. Estos tratamientos pueden reducir la necesidad de fertilizantes minerales.

### Agricultura de precisión

Frente a la fertilización tradicional -basada en una aplicación uniforme de nutrientes en todo el campo-, en los últimos años aparece la agricultura de precisión, basada en herramientas tecnológicas avanzadas y estrategias innovadoras de fertilización.

El nivel de nutrientes disponibles para los cultivos en el suelo varía de un lugar a otro, incluso dentro de la misma parcela. Además, la demanda de fertilizantes depende de la fase de crecimiento del cultivo. Por ello, utilizando diversas tecnologías avanzadas, se recopila información, se analiza y se toman decisiones. Dentro de las técnicas en las que se basa, cabe destacar:

- (i) Sensores remotos: permiten monitorear el estado del cultivo y el suelo en tiempo real, a través de satélites, drones o sensores en campo (**Foto 1**).
- (ii) Sistema de Posicionamiento Global (GPS): posibilita la aplicación precisa de fertilizantes según la ubicación específica del terreno.
- (iii) Redes de sensores inalámbricos (WSN): recopilan datos sobre humedad, temperatura, luz, etc., para decisiones eficientes en el uso de fertilizantes.
- (iv) Internet de las Cosas (IoT): automatiza la aplicación de fertilizantes en función de datos en tiempo real sobre el suelo y el clima.



Por otro lado, dentro de las prácticas, está la distribución variable de fertilizantes, que consiste en aplicar diferentes dosis de abonado en función de mapas prescriptivos, que nos indican qué se debería hacer para alcanzar un objetivo concreto en cada parte de la parcela, de manera que se favorece una aplicación eficiente de los fertilizantes y se garantiza la sostenibilidad y la seguridad medioambiental. Estos mapas se obtienen a partir de la producción obtenida en la campaña anterior, de las características físico-químicas de la parcela, de la climatología.... y nos ayudan a programar el abonado variable, pero, para determinar la respuesta real del cultivo a esa aportación, se precisa llevar a cabo un seguimiento de su evolución a lo largo del ciclo, y apoyarse para ello en imágenes satelitales donde se tiene el control de indicadores como el estado vegetativo de la planta o la humedad del suelo en espacio y tiempo concreto. Existen plataformas gratuitas, como SATIVUM, (<https://www.sativum.es/>), que nos permiten conocer la evolución de nuestro cultivo a través

de índices vegetativos espectrales, como el NDVI (**Foto 2**). Por último, también se pueden incorporar mapas de zonificación de suelo, basados en la caracterización de los microorganismos presentes en el mismo, tanto beneficiosos como patógenos.

### Mejora genética

También existen nuevas estrategias que van más encaminadas al mejoramiento genético de las plantas. La fijación biológica del nitrógeno (FBN), es un proceso que implica la transformación del nitrógeno atmosférico para que pueda ser utilizado por las plantas. Los cereales no pueden usar el nitrógeno del aire, y por ello suelen requerir la aplicación de fertilizantes químicos. Sin embargo, las leguminosas pueden formar nódulos simbióticos en las raíces con rizobios para obtener el nitrógeno necesario para su crecimiento mediante FBN. Por lo tanto, mejorar la capacidad de FBN en los cultivos de cereales ayudaría a disminuir la dependencia de la fertilización química. El proyecto BNF-Cereals, liderado por el Dr. Luis Rubio, investigador del Instituto Na-

cional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC), y desarrollado en el Centro de Biotecnología y Genómica de Plantas (CBGP), usa la bioingeniería y biología sintética para conferir a variedades élite de cereales la capacidad de llevar a cabo la FBN, lo que les permitirá desarrollarse en condiciones con nitrógeno bajo o limitado. El objetivo es diseñar un cereal que obtenga nitrógeno del aire en lugar de a través de fertilizantes sintéticos. Las plantas de cereales se modificarán para producir nitrogenasa, enzima crucial en la fijación de nitrógeno y presente en bacterias simbióticas, que cataliza la conversión del nitrógeno atmosférico en amoníaco, forma de N que las plantas pueden utilizar para su crecimiento

Por otro lado, la tecnología CRISPR/Cas permite editar genes implicados en la eficiencia en el uso de nutrientes. El gen ARE1 (*Abnormal Cytokinin Response1 Repressor*) actúa como regulador negativo de la asimilación de nitrógeno. En estudios recientes se ha visto que la edición dirigida de ARE1 en cereales puede mejorar la

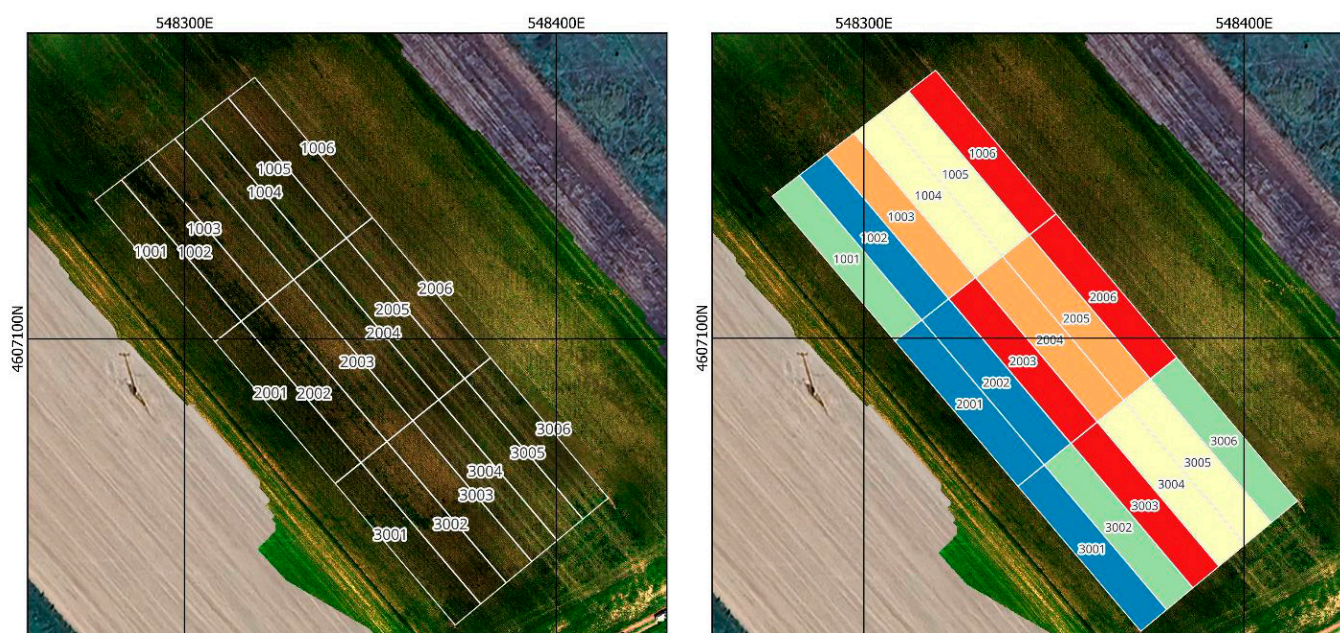


FOTO 2

Imagen aérea de campo de ensayos con distintos tratamientos (izd) y cálculo del índice vegetativos NDVI para cada una de ellas.





*Galium aparine sp.*



*Veronica arvensis sp.*



*Anthemis arvensis sp.*

**FOTO 3**

Ejemplos de especies de adventicias presentes en cultivo de cereales.

eficiencia de uso de nitrógeno y el rendimiento bajo condiciones limitantes de N. Tanto en trigo como en cebada, las plantas con ARE1 inactivado mostraron mayor productividad y mejor aprovechamiento del nitrógeno disponible.

Por último, otras técnicas como los Cultivos Intercalados, intercalando hileras de cereales con cultivos fijadores de nitrógeno, puede mejorar el suministro de nitrógeno en la rotación de cultivos, a la vez que reduce la lixiviación de nitrógeno. Es importante contar con cultivos intermedios bien establecidos y competitivos, y conseguir un equilibrio entre los cultivos principales y los intermedios.

Por lo tanto, existen varias tecnologías y metodologías nuevas de gestión de cultivos que pueden ayudar a mejorar el uso y la eficiencia de los fertilizantes. Los enfoques de agricultura inteligente, de precisión y regenerativa, junto con la aplicación de nuevas biotecnologías, pueden ayudar. También, el adoptar el principio 4R (la fuente de nutrientes adecuada, en la cantidad adecuada, en el momento adecuado y en el lugar adecuado) garantiza el uso adecuado de los fertilizantes y la optimización de la productividad y

## Existen varias tecnologías y metodologías nuevas de gestión de cultivos que pueden ayudar a mejorar el uso y la eficiencia de los fertilizantes

calidad de los cereales para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad medioambiental.

### Manejo de adventicias

El manejo de las adventicias en cereal, y en general en cualquier cultivo, resulta fundamental para la mejora de rendimiento del cultivo, reduciendo de este modo la competencia por

los recursos (luz, agua, y nutrientes) (**Foto 3**). Este control ha sufrido una tecnificación muy notable a lo largo del tiempo, desarrollo, y especialización de la agricultura.

Históricamente, y previo desarrollo de los controles químicos, el manejo de adventicia se venía realizando única y exclusivamente mediante métodos mecánicos y culturales. Los escardados manuales y la retirada mecanizada de las adventicias, siempre presentan la dificultad de lo intensivo de la mano de obra en el primer caso, y la baja especificidad del segundo. Las prácticas culturales consistirían en una acción indirecta, donde se pretende reducir la capacidad de proliferación de cualquier vegetal que no sea el propio cultivo. Por un lado, se pretende hacer rotaciones y adaptar el ciclo del cultivo para intentar reducir el banco de semillas en la parcela. Un claro ejemplo de este tipo de prácticas sería el conocido como falsa siembra, donde se estimula la germinación de las semillas presentes en el suelo, y una vez emergidas, se procede al labrado de toda la parcela, antes de la siembra del cultivo de interés. De otro modo, el uso de variedades más altas y con mayor vigor inicial, también

permitiría una mayor capacidad del cultivo para competir.

A finales del siglo XIX y principios del XX ya se hicieron algunos ensayos muy rudimentarios tratando de hacer un control químico de las adventicias, pero no fue hasta mediados del siglo XX cuando aparecieron los primeros herbicidas selectivos. La aparición del ácido 2,4-diclorofenoxiacético revolucionó absolutamente el manejo de las adventicias en cereal. Este herbicida hormonal, comúnmente conocido como 2,4-D, permitía eliminar las plantas dicotiledóneas (hoja ancha) a lo largo del ciclo del cereal sin dañarlo. Este gran hito que permitía un control efectivo y selectivo de adventicias dicotiledóneas, fue culminado en la década de los 70s-80s con la aparición de graminicidas selectivos que afectaban principalmente a gramíneas como la avena loca, raigrás, bromo, etc. Sin tener un efecto dañino en el cultivo de cereal. Al mismo tiempo, en esta época se desarrollaban herbicidas de amplio espectro de gran efectividad, como el glifosato. La aparición de este herbicida sistémico permitía la eliminación de toda la vegetación presente en las parcelas, incluyendo los órganos subterráneos, antes de la preparación del terreno o la siembra, facilitando en gran medida el control posterior de adventicias.

Llegados a este punto, la eliminación mecánica de las adventicias prácticamente había sido abandonada, a excepción de la preparación del terreno. Este uso intensivo de herbicidas generó una presión selectiva, dando lugar a las primeras documentaciones de casos de resistencias a finales de los años 50 (<https://www.weedscience.org/Pages/Case.aspx?ResistID=394>) en *Commelina diffusa* y *Daucus carota* (zanahoria silvestre), en cultivo de caña de azúcar y en orillas de carreteras, respectivamente. Estos casos, y el creciente número de reportes en las siguientes décadas, generó una alerta global sobre el uso consciente de los herbicidas para el control de adventicias, ya que la expansión de ecotipos resistentes implicaría la

## La verdadera revolución está llegando en los últimos años, debido al desarrollo, avance, y abaratamiento de tecnologías basadas en algoritmos complejos (inteligencia artificial)

regresión a métodos exclusivamente mecánicos.

De este concepto de resistencia natural surgió la idea, no poco controvertida, de la modificación genética de los cultivos para conferirles resistencia a herbicidas de amplio espectro. Los primeros casos son el del maíz y la soja resistentes a glifosato, que permitían aplicación del herbicida sobre el cultivo, eliminando, de manera muy efectiva, todas las otras plantas presentes en la parcela. Aunque esta práctica, no ha tenido buena acogida en la sociedad, y no soluciona el problema de la posible aparición de adventicias resistentes. Si que muestra la posibilidad que existe, de generar cultivos, ya sea por selección y mejora tradicional, o por modificación genética, que tengan mayor capacidad para competir con las adventicias. Ya sea por un mayor vigor inicial o por la segregación de compuestos alelopáticos, que reduzcan o entorpezcan el desarrollo de las otras especies vegetales.

A finales del siglo XX e inicios de los años 2000 se llegó a la conclusión de que las prácticas más adecuadas de control de adventicias provenían de una combinación de todas las técnicas disponibles, destacando por un uso más eficiente de los herbicidas. Estas técnicas de combinación de prácticas, es lo que se conoce como Manejo Integrado, donde se procura hacer rotaciones adecuadas, seleccionar una fecha de siembra óptima, aplicación de herbicidas en caso de necesidad y en momentos puntuales. Con la premisa de la reducción de herbicidas y el incremento de la su-

perficie cultivada en cultivo orgánico o ecológico, también se ha puesto empeño en el desarrollo del control de adventicias con métodos físicos o mecánicos. En este sentido, y en unos inicios se han hecho desarrollos en los que el control de adventicias se realiza mediante aplicación de fuego entre líneas de siembra, o vapor a presión. A su vez, también se fueron mejorando los escardados y los aperos de limpieza entre plantas.

### Implementación de la IA

Pero la verdadera revolución está llegando en los últimos años, debido a que el desarrollo, avance, y abaratamiento de tecnologías basadas en algoritmos complejos (inteligencia artificial, IA) está facilitando su entrada en la fabricación de soluciones agrícolas para desherbado. Desde este punto de vista, ya nos encontramos aperos que incorporan detección en tiempo real de adventicias, haciendo una aplicación de herbicida de precisión, aplicando únicamente sobre las plantas no deseadas, o aperos de escardado que detectan las líneas de cultivo ajustando las cuchillas lo máximo posible sin afectarlas. Los desarrollos más prometedores y que ya empiezan a estar disponibles, son robots autónomos con capacidad de hacer una eliminación mecánica, a la vez que, si es necesario, una aplicación de fitosanitarios de precisión.

### Bibliografía

Queda a disposición del lector interesado en el correo electrónico: [redaccion@editorialagricola.com](mailto:redaccion@editorialagricola.com)



**servalesa®**



**SERGOMIL® L60**

Neoestim

# EL COBRE INTELIGENTE

BIOESTIMULANTE A BASE DE DERIVADOS DE SACAROSA Y COBRE SISTÉMICO



BIOESTIMULANTES  
**WOW!**