



Dosificación variable de fertilizantes

en cultivos extensivos mediante mapas prescriptivos

M. Videgain; F. Javier García-Ramos.

Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.

En relación con la introducción de las tecnologías de agricultura de precisión en agricultura, la aplicación diferenciada de fertilizantes en cultivos extensivos es una de las prácticas más habituales dada la existencia de abonadoras dotadas de tecnología adecuada y de herramientas y tecnología para la generación de mapas prescriptivos con un nivel de dificultad razonable para el usuario. En este artículo se detalla la metodología para implementar la técnica de fertilización variable mediante mapas prescriptivos en cultivos extensivos.

En primer lugar, debemos ser conscientes de que hay condicionantes, como las variables climatológicas, que condicionan cualquier estrategia de agricultura de precisión en una explotación agrícola a cielo abierto. En

este sentido, para garantizar una buena producción, la disponibilidad de agua por parte del cultivo es el factor más limitante, siendo, principalmente en las explotaciones de secano, un parámetro básico que puede llevar al traste, junto con el efecto

de la temperatura, cualquier estrategia de dosificación variable de insumos en años con climatología adversa.

El primer concepto que debe quedar claro para aplicar de forma diferenciada fertilizantes, o cualquier otro insumo, es que la parcela objeto del tratamiento debe disponer de zonas con diferente potencial productivo en las que, por lo tanto, sea rentable económicamente aplicar dosis diferenciadas de fertilizante, basando esta rentabilidad en el balance neto entre gastos e ingresos.

De forma práctica, el potencial productivo viene marcado por las características físico-químicas del suelo de la explotación, por lo que el primer paso para poder implementar técnicas de agricultura de precisión es conocer, de la forma más aproximada posible, el diferente potencial productivo del suelo y, por lo tanto, su zonificación.

Para ello, podemos disponer de varias fuentes de información que podemos utilizar de forma individual o combinada:

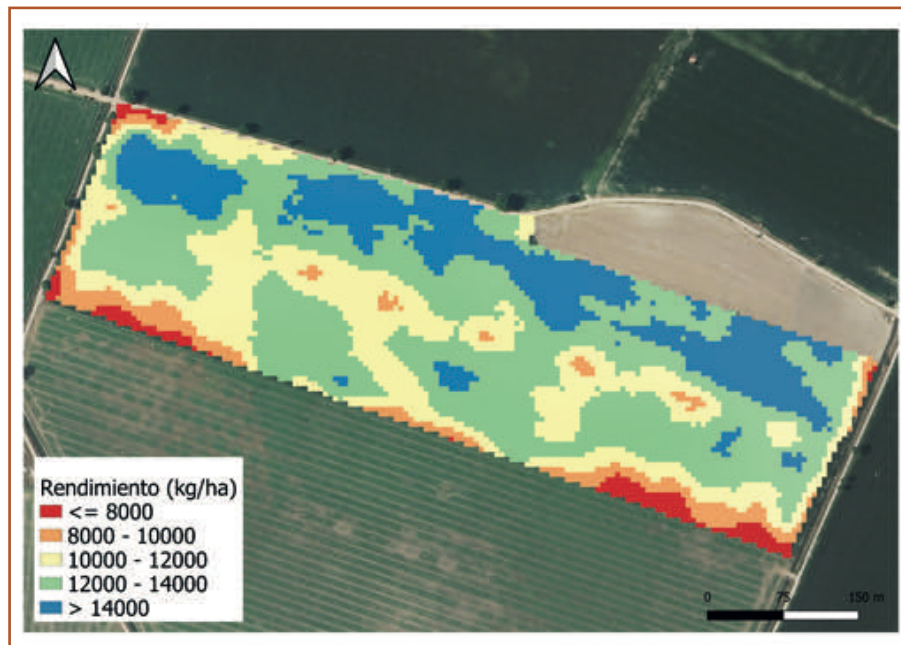
- Mapas de rendimiento de cultivos anteriores.
- Mapas de conductividad eléctrica aparente de los suelos.
- Análisis físico-químicos de muestras de suelo.
- Mapas de índices de vegetación obtenidos mediante teledetección.

Además de estas fuentes principales, en la actualidad se está trabajando con otras tecnologías, como plataformas múltiples de sensores para detectar la posible variabilidad en propiedades del suelo, o sensores ópticos de proximidad, que además de aplicaciones en tiempo real pueden servir para recopilar información del desarrollo del cultivo y generar mapas de prescripción basados en ellos.

Mapas de rendimiento

Centrándonos en los cultivos extensivos de cereal, que son los más habituales en nuestra agricultura, las cosechadoras utilizadas para su recolección equipan o pueden equipar sensores de rendimiento y humedad que permiten generar mapas de kg/ha a una humedad determinada en las diferentes zonas de la parcela. Así, el mapa puede constituir un resultado más del servicio aportado por la cosechadora que es capaz de generar dicho mapa de forma automática, previa calibración adecuada de los sensores. Para generar el mapa, los sensores de rendimiento y humedad incorporados en la cosechadora registran y georreferencian de manera continua el rendimiento y la humedad del grano al medir la cantidad de grano recolectado por unidad de superficie, para lo que tienen en cuenta el trayecto realizado, la velocidad de avance y la anchura de trabajo de la máquina. Mediante la geolocalización de esta información con el sistema de posicionamiento global se dispone, por

FIGURA 1. Mapa de rendimiento generado por cosechadora.



lo tanto, de las coordenadas geográficas de cada dato de rendimiento. La cartografía resultante constituye el mapa de rendimiento (**figura 1**) a partir del cual se pueden realizar comparaciones entre diferentes zonas productivas y establecer estrategias de agricultura de precisión.

Mapas de conductividad eléctrica aparente

La conductividad eléctrica aparente de un suelo (CEa) es la medida de la facilidad que ofrece el suelo al paso de la corriente eléctrica (conductancia) considerando el suelo en su estado natural, por lo que se considera tanto la fase sólida como la fase líquida del suelo. La unidad habitual de medida es milisiemens por metro (mS/m). La conductividad eléctrica es un dato que se mantiene bastante estable durante los años, aunque se ve influenciada por condiciones coyunturales del suelo como la humedad.

Numerosos estudios de investigación han encontrado correlaciones de la CEa con algunas propiedades del suelo: sali-

nidad, contenido en humedad, textura, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, etc. No obstante, es preciso destacar que la correspondencia con las propiedades del suelo no es exacta y tiene que ser determinada para cada condición edafoclimática con análisis de muestras de suelo en laboratorio. También se han encontrado correlaciones entre la CEa y parámetros del cultivo como los valores de índices de vegetación y el rendimiento.

Para la medida de la CEa se utilizan sensores arrastrados por vehículos. Actualmente existen dos tecnologías: sensores de contacto galvánico y sensores de inducción electromagnética.

Los sensores de contacto galvánico se basan en la introducción de una corriente eléctrica en el suelo a través de electrodos (transmisores) en contacto con la superficie del suelo (discos similares a los discos de apertura de una sembradora) y en la medición de la diferencia en el potencial de flujo de corriente en electrodos de potencial (receptores). Con el dato de diferencia de potencial se obtiene resistividad y, a partir de dicho dato, la conductividad. Como ejemplo de esta tecnología podemos citar



Foto 1. Equipo de medida de conductividad eléctrica aparente Veris.



Foto 2. Equipo de medida de conductividad eléctrica aparente Dualem.

los equipos Veris (**foto 1**) (www.veristech.com) y Geocarta (www.geocarta.net).

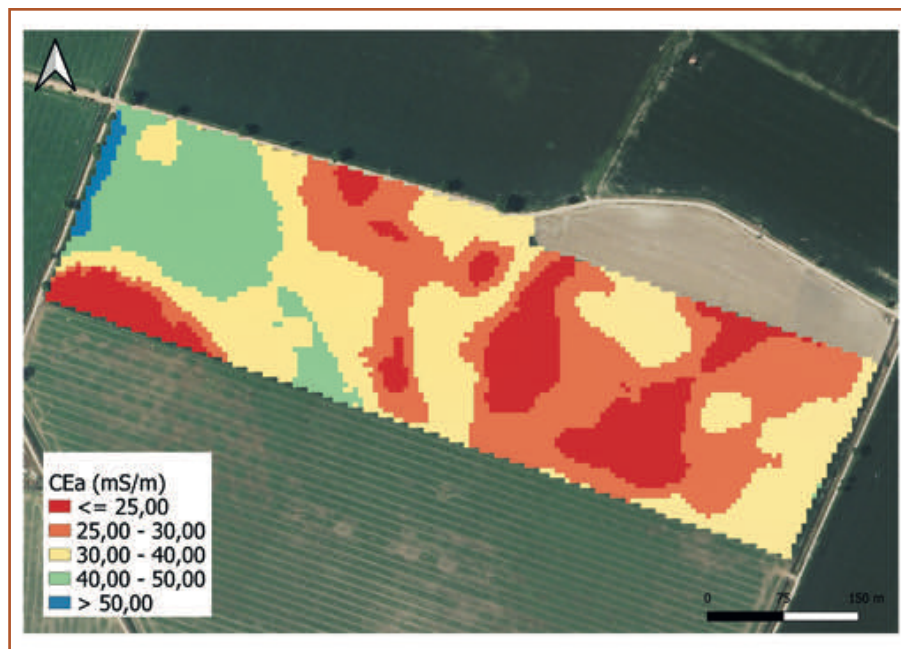
Los sensores de inducción electromagnética (**foto 2**) constituyen una técnica no invasiva con el suelo (el sensor se coloca en superficie) basada en el análisis de la transmisión de un campo magnético a través del suelo, utilizando bobinas emisoras y receptoras de campo magnético colocadas superficialmente. Como ejemplo podemos citar los desarrollados por Dualem (www.dualem.com), Geonics (www.geonics.com) o Geophex (www.geophex.com).

Los equipos disponen de un receptor GNSS de forma que se realizan trayectorias por la parcela, con separación entre pasadas entre 12 m y 15 m y frecuencias de muestreo en torno a 1 dato/s, obteniendo mapas digitales de CEa (**figura 2**) a diferentes profundidades en función del tipo de sensor. A partir de la información de los mapas se pueden establecer estrategias de agricultura de precisión en base a la zonificación generada en los mismos.

Mapas de índices de vegetación

Los índices de vegetación (NDVI, GNDVI, SAVI, ENDVI, etc.) se obtienen con fórmu-

FIGURA 2. Mapa de conductividad eléctrica aparente.



las matemáticas sencillas que combinan dos o más bandas (verde, rojo, infrarrojo cercano, etc.) del espectro electromagnético reflejado por los cultivos. La reflectancia en las diferentes bandas del espectro electromagnético es captada mediante cámaras multispectrales equipadas a bordo de satélites, drones u otro tipo de vehículos.

Existen diferentes índices de vegetación, siendo uno de los más habituales el

índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que mide el contenido de clorofila y la actividad fotosintética de las plantas mediante la relación entre las bandas del rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR). Los cálculos del NDVI se realizan mediante la **ecuación 1**. Los valores más altos (cerca de 1) indican vegetación con mayor vigor y densidad, mientras que valores más bajos (cerca de 0) indican escasa

cobertura vegetal y menor desarrollo del cultivo. Valores entre 0 y -1 indicarían superficies con falta de vida.

Ecuación 1.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Para obtener estos índices en cultivos extensivos, donde la resolución de la imagen no es tan exigente como la necesaria para cultivos arbustivos o viñedo, se pueden utilizar imágenes de satélite, como las suministradas de forma gratuita por la flota de satélites Sentinel-2 perteneciente al programa Copernicus de la Comisión Europea, los cuales cuentan con el sensor denominado MSI (MultiSpectral Instrument). Las imágenes proporcionadas por la misión Sentinel-2 son públicas y tienen 13 bandas espectrales con una resolución espacial de 10 a 60 metros (según la banda) y una resolución temporal actual de aproximadamente 10 días para cada satélite (según la latitud), o 5 días en tándem. También existe la posibilidad de trabajar con imágenes de mayor resolución suministradas por constelaciones privadas, un ejemplo sería la constelación de satélites PlanetScope (www.planet.com), que entrega imágenes prácticamente diarias de la Tierra y con 3 m de resolución óptica aproximadamente.

Existen multitud de índices de vegetación que se pueden calcular a partir de imágenes multispectrales. Una base de datos muy extensa en la que se describen algunos se puede consultar en <http://www.indexdatabase.de/>, en ella se pueden buscar índices espectrales por sensor (es decir, posibilidades de cálculo de índices según las bandas que adquiera un sensor determinado), por ámbito de aplicación, o por otro tipo de criterios.

El uso de drones también está ganando popularidad para generar mapas de índices de vegetación. Los drones equipados con cámaras multispectrales o hiperespectrales permiten la captura de datos a resoluciones espaciales de centímetros por píxel, lo que en el ámbito que estamos tratando, puede suponer una caracterización extremadamente detallada del estado del cultivo. Entre sus ventajas destacan la capacidad de volar en momentos específicos para captar información crítica en etapas clave del desarrollo del cultivo y la posibilidad de realizar análisis en tiempo real mediante software integrado. Sus desventajas incluyen costes elevados en relación al retorno económico, necesidad de licencias o contratación de servicios habilitados, así como dependencia de condiciones climáticas favorables para el vuelo.

Para la elaboración de mapas de índices de vegetación (figura 3), las imágenes multispectrales capturadas deben ser procesadas mediante herramientas de análisis geoespacial. Software libre como QGIS permite realizar estas tareas

FENDT

fendt.com | Fendt is a worldwide brand of AGCO.



Excepcional por Naturaleza. Nuevo Fendt 600 Vario.

Un todoterreno de primera clase que marca nuevos hitos en el campo. Su estrecho radio de giro, su reducido peso combinado con una elevada capacidad de carga y su potencia hidráulica, hacen que el Fendt 600 Vario sea excepcional por Naturaleza en el segmento de potencia de entre 149 y 224 CV.

Más información fendt.com/600-vario



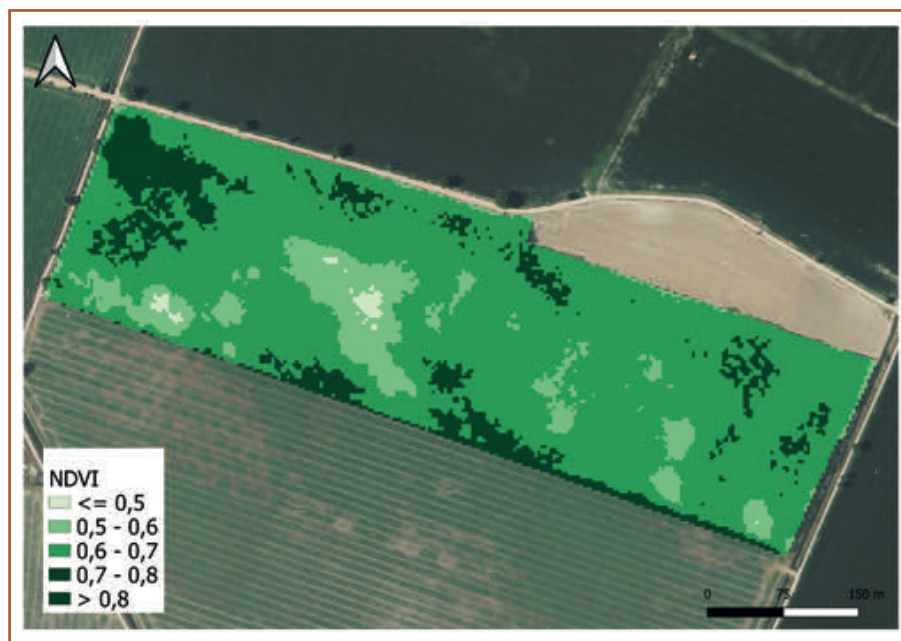
Los mejores llevan Fendt.

aplicando fórmulas ráster a las bandas correspondientes para obtener los índices deseados. El flujo de trabajo incluye la importación de las imágenes en formato compatible, la aplicación de las fórmulas matemáticas correspondientes y la representación cartográfica de los índices generados. Por ejemplo, para calcular el NDVI con la fórmula anteriormente mostrada, la herramienta de calculadora ráster dentro de QGIS permite realizar la operación entre las bandas específicas. Posteriormente, estos mapas pueden ser analizados para identificar patrones espaciales de desarrollo del cultivo, permitiendo definir zonas con diferentes niveles de vigor. Estas zonas pueden ser exportadas como capas vectoriales con valores asociados en sus tablas de atributos, que servirán para generar mapas prescriptivos. Una vez obtenidos, estos mapas son transferidos a las máquinas agrícolas con capacidad de dosificación variable, facilitando así la aplicación diferencial de insumos y optimizando los recursos disponibles.

Cómo generar el mapa prescriptivo

La elaboración de mapas prescriptivos de fertilización ajustados a la variabilidad intraparcilaria se basa, en general, en la integración de mapas promedio de rendimiento, mapas de CEa o mapas de índices de vegetación, como el NDVI. Los mapas de rendimiento promedio se emplean comúnmente para diseñar prescripciones de fertilización de base, fundamentando la zonificación en el potencial productivo de cada área. Por otro lado, los valores puntuales de índices de vegetación en fechas específicas permiten planificar aplicaciones diferenciadas en cobertera, aunque también es posible utilizar datos promedio para generar zonificaciones más robustas que sirvan como base para prescripciones de fertilización en fondo.

FIGURA 3. Mapa de índice de vegetación NDVI.



Existen dos estrategias principales para la elaboración de mapas prescriptivos de fertilización ajustados a la variabilidad interparcelaria: homogeneizar el rendimiento o maximizarlo

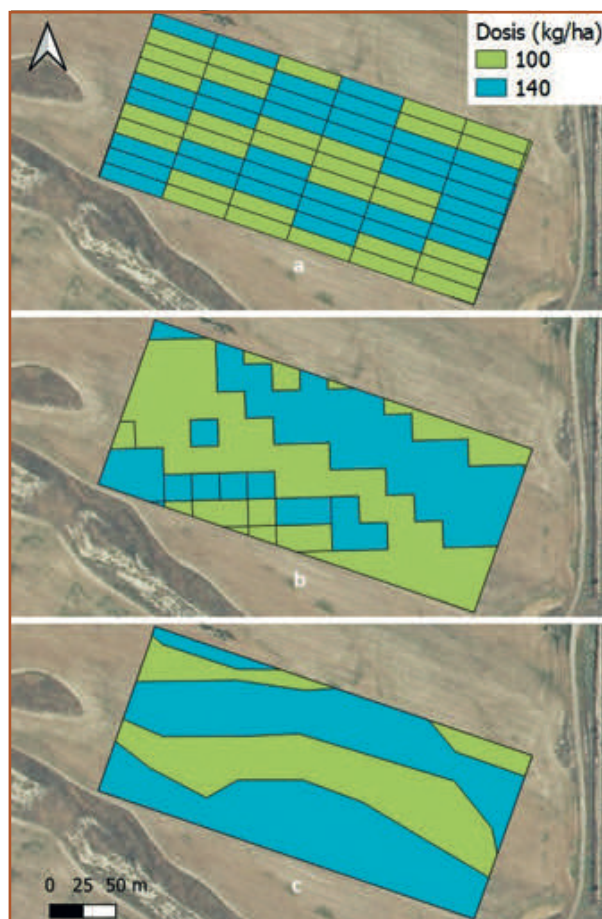
Para la generación de los mapas prescriptivos, una vez definida la zonificación de la parcela, se pueden seguir diferentes estrategias agronómicas. La hipótesis inicial es que las zonas de la parcela con mayores valores de índices de vegetación, rendimiento y CEa (dentro de unos niveles que no impliquen salinidad) representan un mayor potencial productivo del cultivo. A partir de esta información, existen dos estrategias principales para la elaboración de mapas prescriptivos de fertilización: a) maximizar el rendimiento y b) homogeneizar el rendimiento.

Tomando como referencia una dosis homogénea de fertilización de un determinado nutriente, como el nitrógeno, la estrategia de maximizar el rendimiento, conocida como la estrategia del Rey ("the King's approach"), sugiere incrementar las dosis de nitrógeno en las zonas con mayor potencial productivo y reducirlas en las zonas con menor productividad. De esta forma, la cantidad reducida en las zonas menos productivas se reasigna a las más productivas, maximizando así el rendimiento global. Por el contrario, la estrategia de homogeneizar el rendimiento, conocida como la estrategia Robin Hood ("the Robin Hood approach"), propone aplicar más nitrógeno en las zonas menos productivas y reducir la dosis en las zonas más productivas, buscando equilibrar la producción en las diferentes zonas en el momento de recolección. Desde un punto de vista agronómico, la elección entre estas estrategias debe considerar las características edafoclimáticas específicas de cada zona. En sistemas de secano fresco o en regadíos, numerosos estudios han demostrado que la estrategia de equilibrar, es decir, maximizar el rendimiento en las zonas con menor potencial suele ofrecer

buenos resultados, ya que estas áreas responden favorablemente al incremento de insumos. Sin embargo, en secanos más áridos o en zonas con mayores limitaciones hídricas, las estrategias basadas únicamente en el aumento de nutrientes pueden resultar ineficaces o incluso contraproducentes. En estas áreas, mejorar la fertilidad de las zonas menos productivas requiere estrategias más integrales y a largo plazo, como la mejora de la estructura del suelo, el incremento del contenido de materia orgánica o la optimización del manejo del agua. Por tanto, en muchas situaciones de secano, la reducción estratégica de fertilizantes en zonas de bajo potencial puede ser la mejor alternativa para mejorar los retornos económicos parciales, especialmente en años con bajas precipitaciones.

Para facilitar la creación de mapas prescriptivos, existen diversas herramientas y plataformas que permiten a los técnicos y agricultores procesar la información recopilada para su generación. Entre las más utilizadas estaría el software libre y de código abierto QGIS, como se ha comentado anteriormente. Una iniciativa de carácter público de uso cada vez más habitual es Sativum (www.sativum.es), desarrollada por el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León, que además de permitir la gestión integral de explotaciones, facilita la creación de mapas prescriptivos a partir de datos satelitales y registros de campo. Entre otras plataformas comerciales se pueden citar SMS Advanced (Ag Leader), SST Summit, Trimble Ag Software, John Deere Operations Center, AgroSense, Pix4Dfields, o DroneDeploy, todas ellas ampliamente utilizadas para la generación de mapas prescriptivos e implementación de estrategias de fertilización variable.

FIGURA 4. Ejemplos de mapas de prescripción de fertilizante a partir de diferentes fuentes de información y plataformas. (a) QGIS – a partir de conductividad eléctrica aparente; (b) plataforma comercial 1 – a partir de NDVI; (c) plataforma comercial 2 – a partir de mapa de rendimiento.



La **figura 4** muestra ejemplos de mapas prescriptivos de fertilización con dos dosis, generados a partir de distintas herramientas y exportados en formato vectorial (shape) para su representación: (a) mapa de prescripción elaborado con QGIS a partir de datos de conductividad eléctrica aparente de una parcela, diseñado en polígonos de 12 metros de anchura alineados con la dirección de pasada habitual de la máquina para facilitar la aplicación de la dosis; (b) mapa de prescripción generado con la plataforma comercial Atfarm de Yara, utilizando datos del índice NDVI y exportado en formato shape; (c) mapa de

prescripción creado manualmente a partir de datos promedio de rendimiento de la parcela mediante el Creador de prescripciones de agronomía Telus, integrado en la herramienta Operations Center de John Deere.

Aplicación en campo

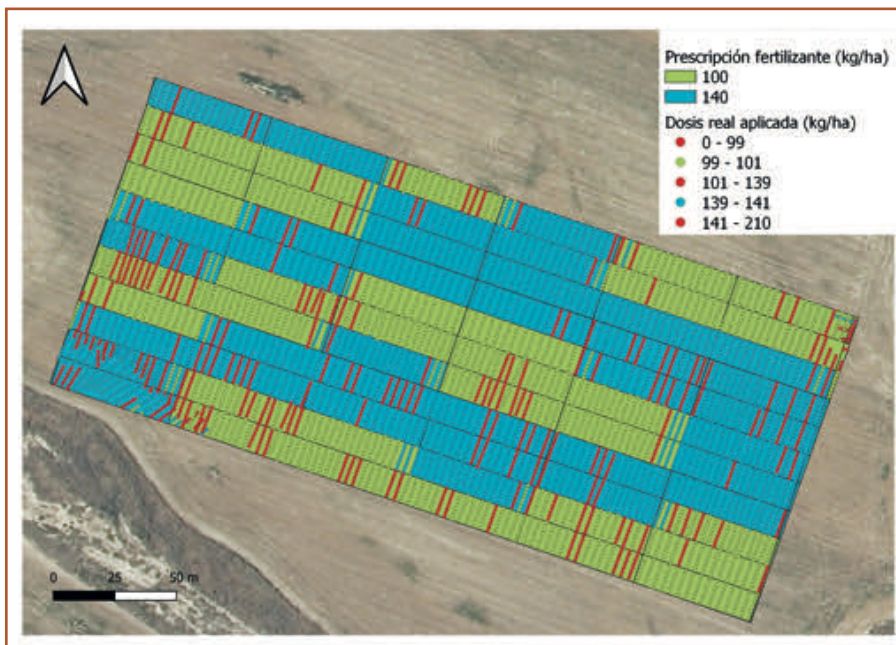
Las abonadoras utilizadas habitualmente para realizar dosificación variable son abonadoras centrífugas con sistemas de distribución de doble disco (**foto 3**). Los fabricantes han desarrollado tecnología que permite trabajar con diversas anchuras de aplicación, asegurando una distribución homogénea del fertilizante. Este tipo de máquinas cuentan con sistemas que ajustan el punto de caída del fertilizante en el disco y controlan su velocidad de giro, permitiendo adaptar el ancho de trabajo. La regulación de la dosis de fertilizante que llega a los discos se realiza en las máquinas más modernas mediante sistemas automáticos consistentes en actuadores lineales eléctricos o motores eléctricos independientes para cada disco, que permiten variar la sección de alimentación. El control de la cantidad de producto que se transmite a los discos se realiza con diferentes tecnologías: a) células de carga ubicadas en la base de la tolva que pueden ir equipadas con sensores (inclinómetros y acelerómetros) que son capaces de corregir el dato aportado por la célula de carga; y b) sensores capaces de medir el par de torsión de cada eje de los discos, de manera que la torsión es directamente proporcional a la variación del flujo de producto que cae sobre el disco.

Una vez generado el mapa prescriptivo, su incorporación en el monitor de la



Foto 3. Abonadora Amazone ZA-V 3200 de doble disco.

FIGURA 5. Comparación de la dosis real aplicada por una abonadora hidráulica de doble disco sobre mapa de prescripción.



abonadora puede realizarse a través de una memoria USB, siguiendo el formato requerido (ISO-XML o shape) y la estructura de carpetas específica de cada equipo. También es posible realizar este proceso mediante plataformas digitales desarrolladas por los fabricantes, que simplifican el

intercambio de datos y permiten almacenar y analizar la gran cantidad de información generada durante las labores de campo. El nivel de precisión en la aplicación de las dosis dependerá del diseño del mapa y de la capacidad de la abonadora para ajustarse a él. La **figura 5** muestra un ejemplo

Los fabricantes han desarrollado tecnología que permite trabajar con diversas anchuras de aplicación, asegurando una distribución homogénea del fertilizante

de aplicación real de fertilizante siguiendo el mapa prescriptivo previamente descrito. En este caso, se utilizó una abonadora Amazone ZA-V 3200 con una anchura de trabajo de 24 metros y dos dosis diferenciadas de urea: 100 y 140 kg/ha. La capa de puntos representa la dosis real aplicada, destacándose en rojo los datos donde la dosis no se ajustó a lo prescrito. De los 8.590 puntos registrados, solo en el 11,3% la dosis se desvió de la prescripción, lo cual es un margen muy reducido considerando que se aceptó como ajustada cualquier aplicación dentro del rango de ± 1 kg/ha.

Conclusión

La fertilización variable mediante mapas prescriptivos es una herramienta clave para optimizar el uso de insumos y mejorar la rentabilidad de las explotaciones agrícolas. Su éxito radica en la integración de datos obtenidos a través de herramientas avanzadas, como mapas de rendimiento, índices de vegetación o conductividad eléctrica aparente, junto con el conocimiento práctico del agricultor y el técnico.

Las estrategias agronómicas deben ajustarse a las características específicas de cada parcela, potenciando el rendimiento en zonas favorables o ajustando insumos en áreas de menor productividad. La tecnología, combinada con una correcta interpretación y aplicación de los datos, permite una gestión más precisa y eficiente de los cultivos. ■



LEMKEN AZURIT 9 CON DELTAROW – CADA GRANO SITUADO CON PRECISIÓN



Con Azurit 9, LEMKEN establece un nuevo estándar en la siembra de precisión. Lucha contra la sequía y permite que sus plantas tengan más espacio con LEMKEN DeltaRow. La disposición triangular proporciona el máximo acceso al agua, los nutrientes y la luz para cada planta individual.

- 70 % más espacio por planta
- Hasta un 10 % más de cosecha con LEMKEN DeltaRow
- Banda de fertilizante situada en el centro entre líneas
- Tolva de semillas central de 600 l

lemken.com

 **LEMKEN**
The Agrovision Company