

# Experiencias en agricultura de precisión

## Los sensores remotos\*



**Juan Agüera-Vega y  
M. Pérez-Ruiz**  
Universidad de  
Córdoba

**A. Miranda-Fuentes**  
Universidad de  
Sevilla

La agricultura, como actividad integrada en el sistema productivo, está influida por los cambios científicos y tecnológicos generados como consecuencia de los trabajos de investigación. La intensidad y el avance de estos trabajos, especialmente en el último siglo, han permitido que la producción de alimentos crezca para adecuarse a la población humana actual de siete mil millones de habitantes, sin un aumento significativo de la superficie cultivable y venciendo retos importantes como son la conservación de los recursos naturales y el mantenimiento de la calidad y sanidad de los productos. Todo ello ha generado, además, unos beneficios empresariales que hagan rentable la actividad agraria, asegure puestos de trabajo y evite la despoblación de los núcleos rurales.

Las tecnologías de la información y el conocimiento (TIC) suponen la más reciente incorporación de nuevas herramientas a la agricultura, con las que se espera cumplir el objetivo no ya de

poder alimentar la población actual, sino la estimada para 2050 de nueve mil millones de personas. En la década de los noventa del siglo XX surgió lo que se dio en llamar “agricultura de precisión”, cuyo concepto responde a la incorporación de las TIC en el sistema productivo agrario.

La agricultura de precisión ha ido enriqueciéndose desde sus inicios con la constante incorporación de nuevas tecnologías, entre las que se encuentra la “teledetección”, una tecnología que representa un pilar muy importante en la gestión individualizada de las parcelas de cultivo. A ella habría que añadir otras, como el Sistema de Navegación Global por Satélite (GNSS) o la tecnología de distribución variable (VRT) en la dosificación y uso de insumos tales como los fertilizantes, los fitosanitarios o el agua de riego.

El objetivo principal de este artículo es ofrecer una visión general de distintas técnicas integradas en lo que se conoce como agricultura de precisión, dando a conocer, en un primer apartado,

\* Los autores agradecen la financiación del proyecto del Plan Nacional de Investigación “AGL2013-46343-R” y del proyecto de Excelencia del Plan Andaluz de Investigación “P12-AGR\_1227”. Ambas fuentes de financiación nos permiten continuar investigando en técnicas de agricultura de precisión, para contribuir al avance del sector agrario en el ámbito nacional y regional.

▼  
**La agricultura de precisión ha ido enriqueciéndose desde sus inicios con la constante incorporación de nuevas tecnologías, entre las que se encuentra la “teledetección”, una tecnología que representa un pilar muy importante en la gestión individualizada de las parcelas de cultivo**

aquellas que se consideran ya consolidadas (como las basadas en mapas o las que utilizan sensores remotos), para seguir luego con la exposición de tres casos de experiencias llevadas a cabo recientemente por distintos grupos de investigación y que son representativas de las nuevas posibilidades que el futuro ofrece en este campo.

Los casos seleccionados tratan sobre: 1) la racionalización de la gestión del abonado nitrogenado en el cultivo del trigo; 2) el empleo de cámaras y UAV de bajo coste en tareas de selección de fenotipos para programas de mejora en el olivar, y 3) la aplicación de tratamientos herbicidas de precisión mediante vehículos robotizados.

### Variabilidad espacial y aplicación variable de insumos

Las operaciones de cultivo que se aplican a las parcelas agrícolas siguiendo los métodos convencionales (laboreo, siembra, fertilización...), se realizan de manera uniforme en toda la extensión de la misma. Sin embargo, a la hora de la recolección se observa que determinadas zonas resultan más productivas que otras. Este fenómeno es conocido desde la antigüedad, pero nunca ha sido tenido en cuenta por las dificultades que conlleva. Ello da lugar a que las dosis de insumos (semillas, fertilizantes, fitosanitarios...) sean calculadas para las distintas operaciones en base a una producción final media, lo que implica que suelen ser superiores a las necesidades reales en unas zonas e inferiores en otras.

Sin embargo, la maquinaria agrícola destinada a la distribución de cualquier producto y equipada con tecnología de distribución variable (VRT) permite una aplicación más acorde a dichas necesidades, al poder variar sobre la marcha, de forma automática, la dosis que aplican.

Podemos distinguir dos sistemas para implementar la aplicación de la tecnología variable VRT: 1) el que se basa en “mapas”, y 2) el basado en “sensores”.

### El sistema de mapas

Los sistemas basados en mapas realizan la aplicación tras un estudio previo de la parcela. Por lo general, en dicho estudio se tienen en cuenta diversos factores, tales como las texturas, la compactación, el contenido previo de nutrientes, el pH del suelo, la topografía..., lo que permite po-

ner de manifiesto las diferencias existentes en las distintas zonas de manejo dentro de la parcela.

Para diferenciar las distintas zonas de manejo intraparcela (es decir, las zonas de una parcela que requieren dosificaciones diferenciadas de insumos) existen distintas tecnologías, dependiendo de la característica que se quiera diferenciar. Una operación muy importante y bastante común en la mayoría de las tecnologías de agricultura de precisión es la que consiste en asociar las características individualizadas de la intraparcela con sus coordenadas (es decir, la “georreferenciación”), de ahí el interés de utilizar los sistemas de navegación global por satélite (GNSS) en este ámbito.

Entre estos sistemas GNSS, el GPS (*Global Positioning System*), gestionado por EEUU, es el más utilizado en España, aunque está aumentando el uso del GLONASS (*GLObal NAVigation Satellite System*) gestionado por Rusia, lo que añade mayor precisión y seguridad en la georreferenciación. Numerosos fabricantes han puesto en el mercado equipos específicos para la agricultura, con niveles de precisión que van desde los 2,5 cm (RTK) hasta los 3 m.

Mediante un muestreo georreferenciado de la parcela, y haciendo uso de técnicas geoestadísticas, se obtienen planos que representan la variabilidad espacial de los distintos parámetros muestreados. El posterior estudio de la interrelación entre todos ellos permite establecer las zonas de manejo, estimar sus producciones y recomendar las dosificaciones adecuadas para cada insumo.

Para ello se emplean aplicaciones informáticas GIS (*Geographic Information System*) o, más recientemente, AgGIS, más adaptadas al uso en agricultura, ya que incluyen funciones específicas, como la generación de los mapas de prescripción con los que se programa la maquinaria de distribución variable (VRT) que ejecutará la dosificación en cada zona de manejo.

La forma de realizar el muestreo dentro de la parcela depende del parámetro a considerar, pero es importante que se realice de forma rápida y automatizada, y que abarque toda la parcela. Los monitores de rendimiento son equipos que se instalan a bordo de las cosechadoras para el muestreo del rendimiento de cultivo. Se emplean sobre todo en cosechadoras de grano y algodón, aunque también existen para otros cultivos como la patata. Los mapas de variabilidad espacial del rendimiento son de gran utilidad, tanto en la caracterización de las zonas de manejo como en la evaluación final de la gestión realizada en la parcela.

Mediante un muestreo georreferenciado de la parcela, y haciendo uso de técnicas geoestadísticas, se obtienen planos que representan la variabilidad espacial de los distintos parámetros muestreados. El posterior estudio de la interrelación entre todos ellos permite establecer las zonas de manejo, estimar sus producciones y recomendar las dosificaciones adecuadas para cada insumo

FIGURA 1  
FERTILIZACIÓN NITROGENADA CONTROLADA POR SENSOR ISARIA™



### El sistema de sensores

El sistema de sensores es utilizado, por ejemplo, en máquinas abonadoras (ver figura 1), que ajustan su dosis mediante un automatismo basado en la medida directa de un parámetro, calculado, por lo general, a partir de un sensor óptico colocado a cierta distancia del cultivo. Mediante un modelo programado en el equipo de control, se calcula la dosis necesaria y se ajusta el mecanismo dosificador a dicho valor. Este sistema se emplea también en máquinas que pulverizan herbicidas y que son capaces de distinguir la mala hierba del suelo y de realizar la aplicación solo cuando sea necesario.

Dentro del sistema de sensores, la tecnología de los “sensores remotos” permite muestrear otros tipos de parámetros de interés en agricultura de precisión. Forman parte de lo que se conoce como “teledetección”, una tecnología con la que se obtiene información de la superficie de los objetos sin tener contacto físico con ellos. Se basan en la determinación de la radiación electromagnética reflejada por la superficie del cultivo o del suelo (radiancia), o de la relación entre esta y la radiación recibida (reflectancia), diferenciadas en distintas bandas de longitud de onda. Mediante combinaciones algebraicas de la reflectancia en distintas bandas del espectro, se obtienen indicadores ópticos muy correlacionados con parámetros biofísicos representativos del tipo y estado de la vegetación.

Uno de los indicadores ópticos más utilizados es el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que permite cuantificar en una escala de 0 a 1 el vigor general de una cubierta vegetal. Responde a la expresión  $(NIR-VIS)/(NIR+VIS)$ , don-

de NIR y VIS son la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (longitud de onda entre 700 y 900 nm) y visible, representada por el rojo (longitud de onda entre 400 y 500 nm), respectivamente.

Para estudios de estrés hídrico y gestión de sistemas de riego mediante agricultura de precisión, se suele emplear el CWSI (*Crop Water Stress Index*), basado en la temperatura de la vegetación respecto a la del aire que le rodea. Cuando la transpiración de una planta es normal, su temperatura en hoja es de 1 a 4 grados inferior a la del aire, siendo su CWSI próximo a 0. En situaciones de déficit hídrico, los estomas de las hojas se cierran haciendo que disminuya la transpiración y provocando aumentos de temperatura en hoja de entre 4 y 6 grados por encima de la del aire. En estas condiciones, el CWSI será próximo a 1.

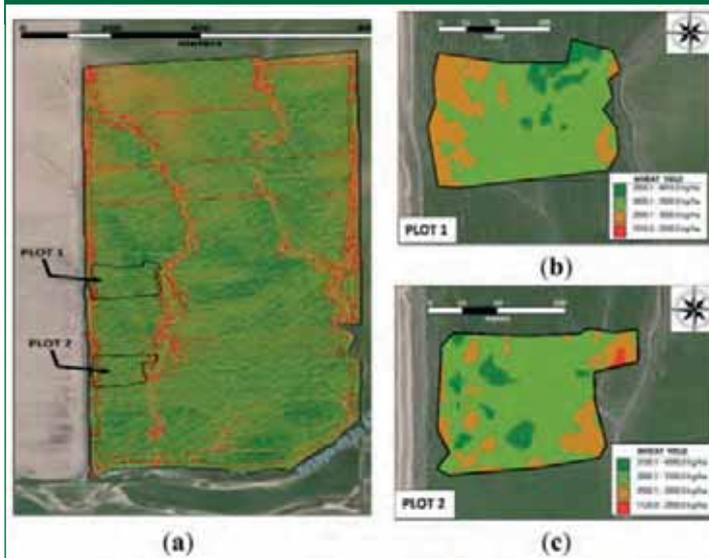
Los sensores utilizados para cuantificar la reflectancia de la superficie estudiada pueden ser multispectrales, cuando son capaces de discriminar solo unas cuantas bandas del espectro electromagnético (tres o cuatro normalmente), o hiperspectrales, cuando son capaces de diferenciar varias decenas e incluso centenares de bandas. Esto es lo que constituye la resolución espectral de un sensor. Las medidas realizadas con sensores hiperspectrales permiten el cálculo de indicadores más complejos.

Otro aspecto a considerar en los sensores ópticos es su resolución espacial; esa resolución determina la superficie mínima que puede ser diferenciada dentro de la superficie general analizada. Atendiendo a este criterio, existen sensores que analizan conjuntamente toda la luz reflejada por la superficie bajo estudio, mientras que otros dividen dicha superficie en elementos más

FIGURA 2  
LECTURA DEL NDVI DEL CULTIVO MEDIANTE SENSOR REMOTO MANUAL GREENSEEKER® DE TRIMBLE NAVIGATION LTD., SUNNYVALE, CA, EEUU.



FIGURA 3  
MAPA DE RENDIMIENTO DE LA FINCA COMPLETA (A) Y DE LAS PARCELAS 1 (B) Y 2 (C) (QUEBRAJO ET AL., 2015)



pequeños, ofreciendo la medida individualizada para cada uno de esos elementos en forma de matriz. Dependiendo de la aplicación, se pueden requerir resoluciones espaciales que van desde 25 cm hasta 30 m.

En la década de 1950 empezaron a utilizarse los primeros sensores remotos a bordo de satélites artificiales para la exploración de la superficie terrestre. En la actualidad hay otras alternativas. Por ejemplo, además de sobre satélites en órbitas a diferentes alturas, los sensores remotos pueden montarse a bordo de globos aerostáticos, pequeñas aeronaves tripuladas y, lo más extendido en la actualidad, sobre aeronaves no tripuladas o UAV. También existen en el mercado equipos manuales que permiten tomar medidas a distancias de 0,5 a 1 m de la vegetación (figura 2), muy útiles para el muestreo en zonas donde exista sospecha de retraso en el desarrollo o falta de vigor de la planta.

### Resultados de algunas experiencias

#### a) En la racionalización del abonado nitrogenado en cereales

En el estudio de Quebrajo *et al.* (2015) se compararon, de un lado, las medidas del citado indicador NDVI, realizadas con un dispositivo manual sobre un cultivo de trigo, y, de otro lado, los contenidos reales de nitrógeno foliar medidos en la-

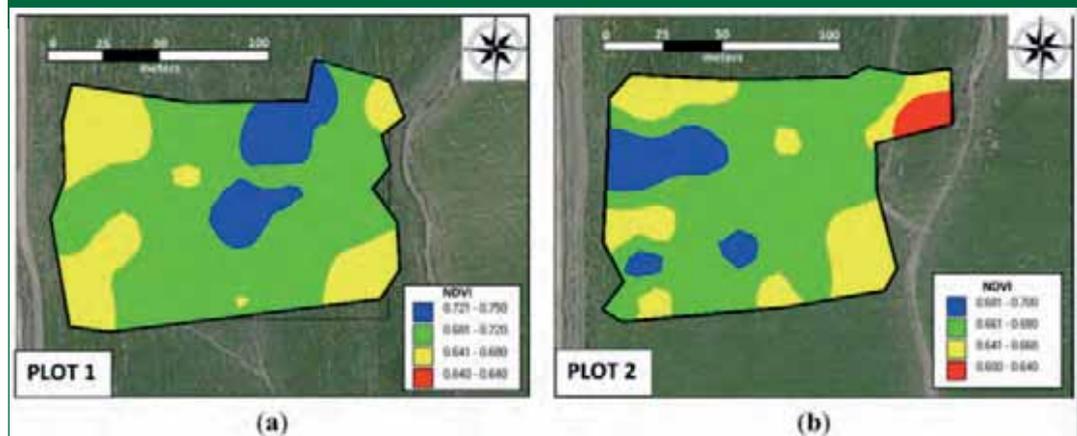
boratorio. También se lleva a cabo un estudio de la variabilidad espacial y las relaciones entre el rendimiento del cultivo (obtenido mediante un monitor de rendimiento comercial), el contenido real de nitrógeno y las medidas de NDVI en dos parcelas comerciales.

Las parcelas de estudio se situaron en la provincia de Sevilla y presentaban unas superficies de 1,60 ha (parcela 1) y 1,21 ha (parcela 2). El suelo responde a las características típicas de un vertisol en ambos casos, con alto contenido en caliza (64%). El cultivo recibió un abonado convencional de fondo y una cobertera.

El sensor remoto manual con el que se mide el NDVI (*GreenSeeker®* de Trimble Navigation Ltd., Sunnyvale, CA, EEUU) basa su funcionamiento en la emisión de pulsos de luz roja e infrarrojo cercano (NIR), midiendo la reflectancia en ambas bandas. Las medidas se tomaron sobre la superficie del cultivo a 0,5-0,6 m de altura, en 30 zonas de muestreo aleatoriamente distribuidas por las parcelas de ensayo. Un ordenador de campo con recepción GPS y correcciones EGNOS (*Juno 5D*, Trimble Navigation Ltd., Sunnyvale, CA, EEUU) almacenó, para cada punto de muestreo, las coordenadas, hora, fecha, número de satélites GPS disponibles y valor de NDVI.

El monitor de rendimiento RDS Ceres II, instalado en una cosechadora Claas-Mega 216 con antena GPS, permitió asociar el rendimiento y la humedad del grano a cada posición en las par-

FIGURA 4  
VALORES DEL ÍNDICE NDVI REGISTRADOS EN LA PARCELA 1 (A) Y 2 (B) (QUEBRAJO ET AL., 2015)



celas de ensayo. Los datos se almacenaron en una tarjeta SD a medida que la operación se realizaba a una velocidad de  $4,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , con un ancho de corte de 6 m. La recogida de hojas para la determinación del contenido real de nitrógeno se llevó a cabo según el protocolo de referencia. Se muestrearon un total de 20 zonas por parcela, recogiendo 50 hojas por zona de muestreo (una por planta de trigo).

Todos los datos de campo fueron importados a un sistema de información geográfica comercial de uso agrícola (Farm Works TM, Trimble Navigation Ltd., Sunnyvale, CA, EEUU). El tratamiento estadístico de los datos fue llevado a cabo con el software libre R. Para estudiar el grado de covarianza de las variables se empleó el coeficiente de correlación de Pearson. La figura 3 muestra los mapas de rendimiento obtenidos en las dos parcelas experimentales.

Los coeficientes de Pearson que relacionan el rendimiento y el NDVI fueron altos en las dos parcelas ( $r_{xy} = 0,64$  y  $r_{xy} = 0,78$  para las parcelas 1 y 2, respectivamente) y presentaron una alta significación estadística ( $p < 10^{-4}$ ), lo que sugiere que el parámetro NDVI tiene un alto potencial predictivo para el rendimiento del trigo en estas condiciones. Los valores de NDVI de las dos parcelas aparecen representados en la figura 4.

En cuanto a la correlación entre el NDVI y el contenido real de nitrógeno de las hojas recogidas, también se obtuvieron relaciones muy significativas, con coeficientes de correlación de  $r_{xy} = 0,71$  y  $r_{xy} = 0,89$  para las parcelas 1 y 2, respectivamente, y de nuevo una alta significación estadística ( $p < 10^{-4}$ ).

Por último, los autores establecieron la posibilidad de emplear un modelo de aplicación pro-

porcional de nitrógeno basado en las lecturas NDVI, dado por la ecuación

$$y = 15,573e^{4,2795x}$$

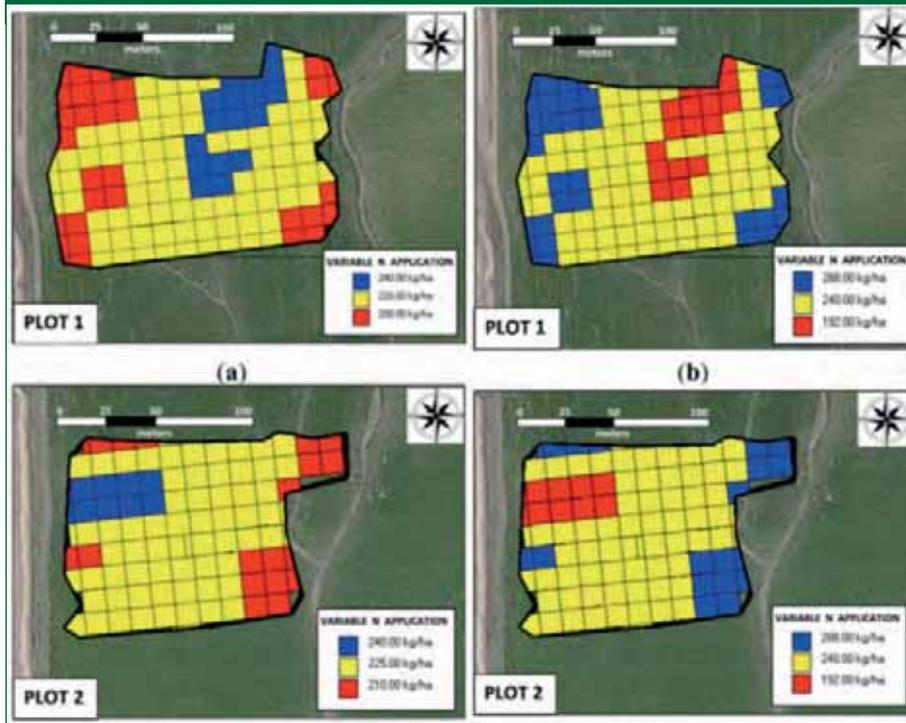
Donde “y” es la cantidad total de nitrógeno por unidad de superficie ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) y “x” es el valor del indicador NDVI obtenido con el sensor.

Esto podría dar lugar a mapas de prescripción como el que se muestra en la figura 5. La aplicación conservadora implica aumentar el beneficio manteniendo el mismo rendimiento al reducir la inversión en fertilizantes (aplicando dosis similares a las empleadas en años anteriores solo en las zonas más productivas y reduciéndolas proporcionalmente en las menos productivas). Con la aplicación arriesgada, el gasto en fertilizantes es el mismo que en años anteriores, pero al hacer una distribución más racional, las expectativas en el incremento del rendimiento son mayores. Los buenos resultados obtenidos hacen que los autores recomienden esta metodología por su bajo error en la estimación y su gran utilidad práctica.

#### **b) En la selección de fenotipos para la mejora en olivar**

El estudio realizado por Díaz-Varela *et al.* (2015) tuvo como objetivo la integración de sistemas de adquisición de imágenes de bajo coste sobre UAV. La finalidad del estudio era obtener parámetros indicadores de la forma de la copa de los árboles para poder así caracterizar el crecimiento de olivos de distintos genotipos situados en dos plantaciones. Como contraste para evaluar la precisión del sistema, se realizaron medidas manuales de los mismos parámetros sobre árboles seleccionados.

FIGURA 5  
**MAPAS DE PRESCRIPCIÓN DE NITRÓGENO DE ACUERDO A LOS VALORES NDVI PARA LAS PARCELAS 1 Y 2. SE CONTEMPLAN APLICACIONES CONSERVADORAS (B Y D) Y ARRIESGADAS (A Y C) (QUEBRAJO ET AL., 2015)**



Las parcelas de ensayo pertenecen a dos plantaciones situadas en la provincia de Córdoba. La primera es una plantación experimental, situada en la finca del centro IFAPA “Alameda del Obispo”. Presenta árboles con un marco de 4 x 2 m y poda en vaso, asemejándose a un sistema de plantación intensivo de alta densidad. De es-

ta parcela se escogió un total de 150 árboles con 29 genotipos diferentes. La segunda parcela se sitúa en una explotación comercial, en el término municipal de Pedro Abad y perteneciente a la empresa Todolivo S.L. Los árboles están plantados con un marco de 3,75 x 1,35 m, en un sistema superintensivo.

El proceso de análisis comienza con la adquisición de imágenes mediante una cámara comercial montada sobre un UAV. A partir de ellas se realiza un modelo de elevación digital del terreno y un ortomosaico o mapa de color infrarrojo (CIR). A partir de ellos se obtienen, respectivamente, la altura de los árboles y la delimitación del contorno de la copa para obtener los diámetros medios. Una vez obtenidos estos parámetros, se llevó a cabo su comparación con medidas de campo para comprobar la precisión de la metodología, y se estudió estadísticamente su validez para los distintos genotipos. Las medidas manuales se realizaron de distinta forma en las dos plantaciones. Así, en la primera (olivar intensivo) se midieron

dos diámetros de copa y su altura, y en la segunda (olivar superintensivo) se midió la altura y la anchura máximas del seto en distintos puntos.

La cámara que se empleó es un modelo comercial (Panasonic Lumix DMC-GF1) modificada para obtener la radiación infrarroja. La plataforma UAV empleada realizó el vuelo completo en

FIGURA 6  
**DELIMITACIÓN DE LAS COPAS DE LOS ÁRBOLES PARA LAS PARCELAS 1 Y 2 (DÍAZ-VARELA ET AL., 2015)**

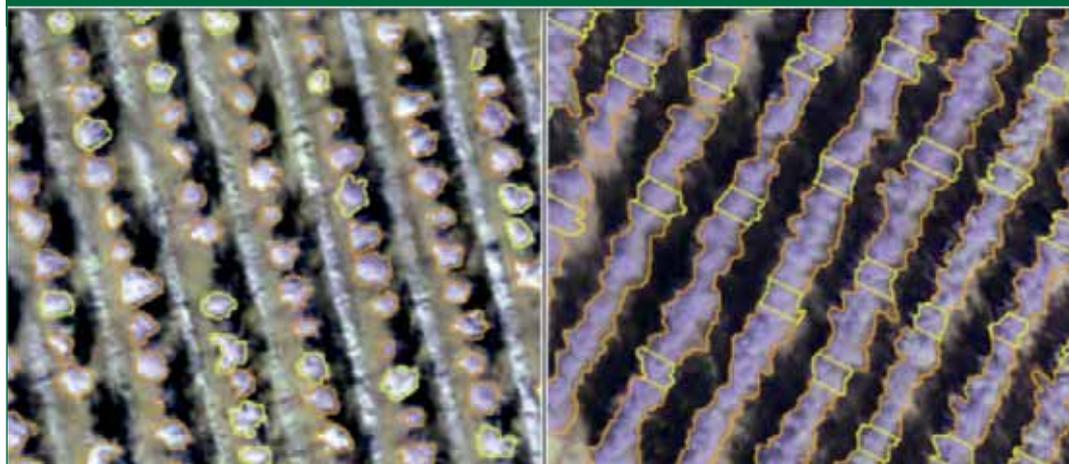
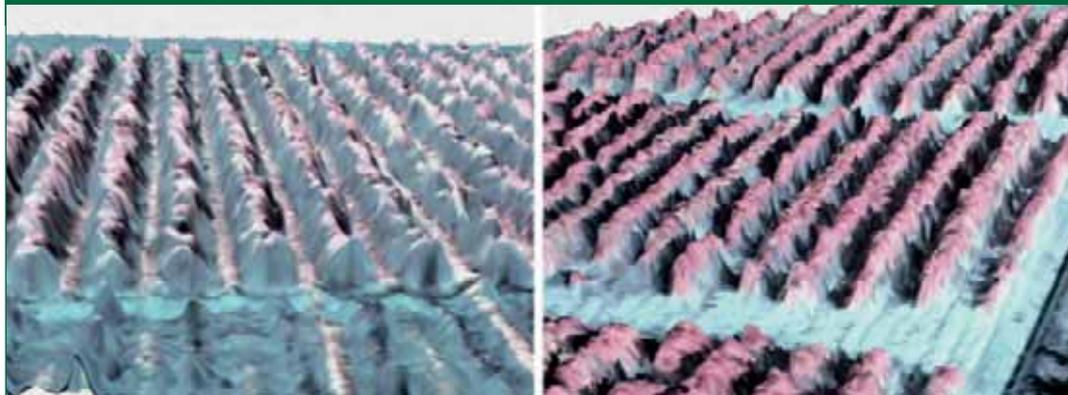


FIGURA 7  
MOSAICADO DEL INFRARROJO EN LAS PARCELAS 1 Y 2 (DÍAZ-VARELA *ET AL.*, 2015)



un tiempo de 45 minutos a una altura de 300 m, con una velocidad de  $63 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . El vuelo fue dirigido mediante un sistema de guiado autónomo controlado por una estación terrestre y asistido por un receptor GPS, para ofrecer de forma precisa las coordenadas correspondientes a cada imagen. El solape medio estimado en las imágenes fue del 80-90%. Un total de 387 y 255 imágenes fueron empleadas para realizar el modelo digital de elevaciones y el ortomosaico en las parcelas 1 y 2, respectivamente. El cálculo de las alturas de los árboles se basó en el análisis de la altura máxima local, en contraposición con la altura del terreno.

El análisis difiere sensiblemente en los dos tipos de plantaciones estudiadas. Para la obtención del diámetro de copa se definieron dos índices vegetativos, que se superpusieron sobre la capa correspondiente a la imagen aérea y que permitieron discriminar la vegetación del terreno desnudo y las sombras (figura 6). Los resultados del estudio demuestran que la metodología utilizada es válida para la recreación del modelo de elevaciones y del mosaicado (figura 7).

En cuanto a la capacidad predictiva del modelo, los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de las correlaciones entre las alturas de copa medidas y las estimadas fueron muy diferentes, siendo de  $R^2 = 0,07$  en la parcela 1 y de  $R^2 = 0,53$  en la parcela 2, aunque en ambos casos las correlaciones fueron estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ). En cuanto al diámetro de copa, las correlaciones entre las medidas y las estimaciones también resultaron significativas ( $p < 0,05$ ) con  $R^2 = 0,58$  y  $R^2 = 0,22$  en las parcelas 1 y 2, respectivamente. En general se observa que el modelo tiende a subestimar ligeramente las dimensiones reales de los árboles. Los errores en la es-

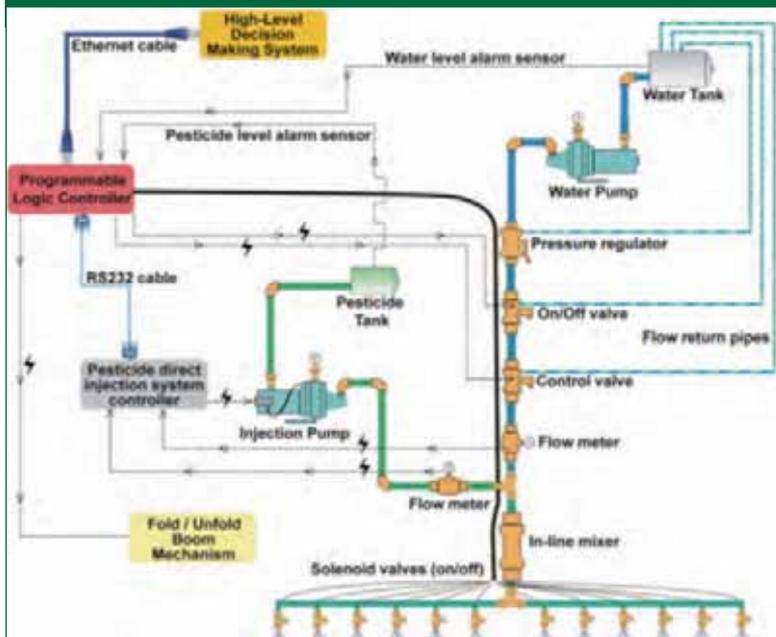
timación, medidos por el error cuadrático medio, demostraron ser mayores en el olivar intensivo para los dos parámetros evaluados.

Si se estudian los distintos genotipos por separado, los errores disminuyen sensiblemente, sobre todo en el caso del olivar superintensivo. Asimismo, las correlaciones entre medidas y estimaciones mejoran sustancialmente sus coeficientes de determinación, siendo de  $R^2 = 0,14$  y  $R^2 = 0,89$  para las alturas de copa en las parcelas 1 y 2 y de  $R^2 = 0,66$  y  $R^2 = 0,53$  para los diámetros de copa en las parcelas 1 y 2, respectivamente. En cuanto a las diferencias en los parámetros evaluados, obtenidas mediante un test ANOVA, estas son menores en el olivar superintensivo y en la altura de copa, disminuyendo en las estimaciones respecto a las obtenidas en las medidas manuales.

### c) Experiencia en la aplicación de herbicidas mediante vehículos robotizados

El objetivo más importante en este trabajo (González de Soto *et al.*, 2016) ha sido el diseño, construcción y evaluación del primer equipo, a nivel europeo, de aplicación localizada e inteligente de herbicida formado por sensores e instrumentación. Este equipo permite: 1) el control automático de tramos y/o boquillas; 2) la inyección directa del herbicida, y 3) la aplicación variable del herbicida. Se trata de un vehículo no tripulado que es controlado de forma remota siguiendo una misión creada de forma previa al trabajo. El mapa de prescripción se realizó a partir de un mapa de infestación de malas hierbas procedente de imágenes tomadas desde un UAV, aunque admite otras alternativas.

FIGURA 8  
ESQUEMA HIDRÁULICO DEL EQUIPO DE PULVERIZACIÓN INTELIGENTE (GONZÁLEZ DE SOTO ET AL., 2016)



El sistema de pulverización está formado por 12 válvulas/boquillas solenoides de alta velocidad montadas sobre la barra de aplicación de acero inoxidable separadas una distancia de 0,5 m, consiguiendo una resolución lateral de 0,5 m y una pulverización independiente de cada una de ellas (figura 8). A la barra de aplicación se le ha incorporado un sistema de pliegue/despliegue automático con dos actuadores lineales eléctricos. La barra se encontrará desplegada durante la realización de la operación y se plegará cuando encuentre un obstáculo en el giro del vehículo, al final de la pasada. El equipo integra un sistema de inyección directa con un tanque de 15 litros para el herbicida y de 200 litros para el agua, de ma-

nera que la mezcla se realiza acorde a la información procedente del programa de toma de decisiones montado en el equipo.

Este programa, desarrollado en Labview™, usa coordenadas con una precisión centimétrica (RTK-GNSS) e información de la dosis para generar las órdenes que controlan la barra de pulverización. La bomba del sistema de inyección ajusta su velocidad de giro hasta encontrar el valor en que proporciona la concentración de herbicida y la estabilización del flujo deseados. Dicha concentración, así como el lugar de aplicación, vienen proporcionados por el mapa de distribución y densidad de mala hierba generado previamente.

Durante tres años se llevaron a cabo ensayos con el equipo en laboratorio. Para los ensayos de campo, realizados a finales de 2014, se seleccionó una parcela de 0,25 ha (40,3140499° N, 3,4842388° W) sembrada de trigo. En esta primera evaluación se sembraron nueve zonas de mala hierba de 3 x 3 m<sup>2</sup>. Con la configuración de tractor autónomo y pulverizador inteligente que se muestra en la figura 9, se evaluó la precisión de la aplicación de herbicida y los ahorros de la cantidad aplicada basada en los rodales de infestación encontrados en las imágenes aéreas.

Los ensayos de laboratorio fueron encaminados a la calibración del sistema de inyección en tiempo real, según la dosis necesaria por unidad de superficie, la concentración del producto fitosanitario en su tanque y la presión necesaria en la boquilla para realizar la aplicación del caudal adecuado. En cuanto a los ensayos en exterior, varias áreas fueron pintadas en pavimento desnudo simulando parches de mala hierba (figura 10), para comprobar si la apertura y cierre de las boquillas tenía lugar de forma precisa. Para ello se escogieron tres inclinaciones de las manchas de hierba, de 0,  $\pi/4$  y  $\pi/2$  radianes (0°, 22,5° y 45°) que requieren una precisión creciente en el sistema.

Los resultados mostraron que la reducción en la cantidad aplicada con el equipo inteligente muestra una dependencia del porcentaje de infestación de mala hierba del campo, algo esperable. Un porcentaje de infestación del 3,24% proporcionó un 96,55% de ahorro de caldo aplicado por hectárea; una infestación del 10% resultó en un ahorro del 90% de caldo; una infestación de 25% ahorró un 75% (situación muy frecuente en explotaciones comerciales), y un 50% de mala hierba condujo a un ahorro del 50% del líquido aplicado por hectárea.

FIGURA 9  
PULVERIZADOR INTELIGENTE APLICANDO ÚNICAMENTE EN LOS LUGARES DONDE EL UAV DETECTÓ MALA HIERBA EN CAMPO



FIGURA 10

A) y B) ENSAYO SOBRE PAVIMENTO PARA EVALUAR LA PRECISIÓN DE CIERRE Y APERTURA DE BOQUILLAS. C) TRACTOR AUTÓNOMO CON EQUIPO INTELIGENTE DE APLICACIÓN DESARROLLANDO ENSAYOS EN CAMPO



▼  
**Los sensores remotos forman parte de la agricultura de precisión, permitiendo la adquisición actualizada y fiable de numerosos parámetros relacionados con la producción, lo que permite tomar decisiones con mayor seguridad y ejecutar las operaciones de forma más racional. Su integración es lo que asegura el éxito de su implantación**

La rápida respuesta de todos los subsistemas a los requerimientos experimentales y los resultados obtenidos en este trabajo muestran la viabilidad de uso de los equipos inteligentes de aplicación y abre una nueva era en el control de infestaciones, logrando con la automatización una operación más económica, sostenible y eficiente.

### Conclusiones

De todo lo expuesto en los anteriores apartados se desprende el enorme potencial que presenta la agricultura de precisión y el cambio de paradigma que significa frente a los métodos de gestión aplicados en la agricultura convencional.

Las tecnologías que ya están comercializadas y que podemos considerar como ya consoli-

das, incrementan su uso en las explotaciones de todo el mundo año tras año. Los nuevos trabajos de investigación en marcha, como los que se han presentado, traerán nuevos enfoques y soluciones que permitirán abordar problemas de la producción agraria, buscando minimizar su impacto ambiental, maximizar el beneficio empresarial y, sobre todo, permitir la correcta alimentación de una población creciente en el tiempo a partir de unos recursos limitados.

Los sensores remotos forman parte de la agricultura de precisión, permitiendo la adquisición actualizada y fiable de numerosos parámetros relacionados con la producción, lo que permite tomar decisiones con mayor seguridad y ejecutar las operaciones de forma más racional. Su integración, junto con el resto de técnicas, es lo que asegura el éxito de su implantación. ■

### ▼ Referencias bibliográficas

- DÍAZ-VARELA, R.A.; R. DELAROSA; L. LEÓN y P. ZARCO-TEJADA (2015), "High-Resolution Airborne UAV Imagery to Assess Olive Tree Crown Parameters Using 3D Photo Reconstruction: Application in Breeding Trials", *Remote Sens*, 7, 4213-4232; doi: 10.3390/rs70404213.
- GONZÁLEZ DE SOTO, M.; L. EMMI; M. PÉREZ-RUIZ; J. AGÜERA y P. GONZÁLEZ DE SANTOS (2016), "Autonomous systems for precise spraying - Evaluation of a robotised patch sprayer". *Biosystems Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.018>.
- QUEBRAJO, L.; M. PÉREZ-RUIZ; A. RODRÍGUEZ-LIZANA y J. AGÜERA (2015), "An Approach to Precise Nitrogen Management Using Hand-Held Crop Sensor Measurements and Winter Wheat Yield Mapping in a Mediterranean Environment", *Sensors*, 15, 5504-5517; doi: 10.3390/s150305504.