

TELEDETECCIÓN Y USO DE DRONES PARA CONTROL LOCALIZADO DE MALAS HIERBAS: VENTAJAS Y PERSPECTIVAS

JOSÉ MANUEL PEÑA BARRAGÁN, ANA ISABEL DE CASTRO MEJÍAS, JORGE TORRES SÁNCHEZ, MONTSERRAT JURADO EXPÓSITO Y FRANCISCA LÓPEZ GRANADOS (INSTITUTO DE AGRICULTURA SOSTENIBLE, IAS-CSIC)

Se describen las investigaciones basadas en técnicas de teledetección para la obtención de mapas de malas hierbas en cultivos extensivos como trigo, girasol y maíz, con el objetivo de diseñar mapas de tratamientos localizados de herbicidas que sean empleados por maquinaria de agricultura de precisión. Se han utilizado diversos tipos de imágenes remotas según la fase de crecimiento del cultivo: 1) Imágenes procedentes de satélite o de aviones tripulados, cuando el cultivo se encuentra en fase de desarrollo tardía, y 2) Imágenes tomadas con drones, cuando el cultivo se encuentra en fase de desarrollo temprana. Asimismo, se discuten las ventajas y perspectivas de esta tecnología según las principales variables, tanto agronómicas como técnicas, que determinan su aplicabilidad en la detección de malas hierbas.

Hacia una mejor gestión de las parcelas agrícolas: Agricultura de precisión y control localizado de malas hierbas

El uso de fitosanitarios es imprescindible para mantener la actual producción agraria y cumplir las necesidades de calidad y cantidad de alimentos que demanda la población. La Asociación Empresarial para la Protección de las Plantas estima que los gastos en fitosanitarios ascienden anualmente en Europa a cerca de 9.000 millones de euros, de los que unos 650 millones de euros corresponden a España (AEPLA, 2015). Con el objetivo de realizar una aplicación eficiente de los mismos, desde la Unión Europea se adoptaron dos actos legislativos que incorporan los fundamentos de la estrategia para el uso sostenible de fitosanitarios: 1)

el Reglamento (CE) 1107/2009, relativo a la comercialización de productos fitosanitarios, y 2) la Directiva 2009/128/CE, para conseguir un uso sostenible de plaguicidas. Dentro de estas normativas se destacan como elementos clave “el fomento del bajo consumo (reducción de las aplicaciones) y la utilización de dosis adecuadas y ajustadas a la superficie a tratar”.

Estos componentes están incluidos en el fundamento agronómico de la agricultura de precisión, cuya finalidad radica en que las parcelas de cultivo se gestionen de forma localizada, ajustándose las tareas y los tratamientos agrícolas a las necesidades reales de cada zona del cultivo. Con estas técnicas se persigue reducir costes, optimizar el rendimiento, aumentar la rentabilidad y obtener beneficios económicos y medioambientales.



Figura 1. Cultivo de maíz en época temprana (izquierda) y de trigo en época tardía (derecha) donde se observan infestaciones localizadas de malas hierbas.

Un caso particular es el control localizado de malas hierbas, que consiste en aplicar el herbicida u otra medida de control sólo en las zonas infestadas por malas hierbas, adaptando el tratamiento a la cobertura y tipología de malas hierbas presentes. Este control se fundamenta en que las malas hierbas se suelen distribuir en rodales o agregados dentro de los cultivos, tal como prueban numerosos trabajos científicos (Heijting et al., 2007; Jurado-Expósito et al., 2009), lo que permite obtener mapas de zonas con infestación y sin infestación (figura 1).

El proceso para aplicar un control localizado de malas hierbas incluye tres pasos fundamentales:

1. Conocer la posición espacial de las malas hierbas dentro del cultivo (p.ej., mediante mapas georreferenciados de malas hierbas).
2. Análisis de los datos y toma de decisiones, lo que también se denomina planificación del control: dónde, qué, cuánto y cuándo aplicar.
3. Actuación en campo o ejecución del control localizado propiamente dicho con maquinaria específica de precisión.

En los últimos años se han hecho importantes avances en las etapas de toma de decisiones y de actuación (pasos 2 y

3), existiendo ya maquinaria agronómica con los dispositivos necesarios (GPS, barras de aplicación variable, sistemas de decisión inteligentes, robótica, etc.) para realizar con éxito una aplicación localizada del herbicida necesario. Sin embargo, el paso 1 (detección de las malas hierbas) es un componente crítico para la adopción generalizada de las técnicas de control localizado, especialmente si dicha detección se debe realizar en estados fenológicos tempranos del cultivo y malas hierbas, que es cuando los tratamientos de herbicidas se realizan habitualmente. El problema radica en el pequeño tamaño de las plantas en época temprana de desarrollo y en la similitud espectral y morfológica entre cultivo y malas hierbas, lo cual hace muy complicado su discriminación. Sin embargo, la reciente universalización del uso de los drones en el sector civil y, concretamente, en aplicaciones relacionadas con la agricultura (Zhang y Kovacs, 2012), ha abierto nuevas oportunidades para resolver este problema. Los drones permiten adquirir imágenes aéreas a baja altura y, por tanto, observar detalles del cultivo, tales como las plántulas de malas hierbas, que hasta entonces era imposible con las imágenes convencionales de teledetección (figura 2).



Figura 2. Un dron volando sobre una parcela de maíz (izquierda) y detalle del tipo de imágenes aéreas tomadas (derecha), en donde se pueden observar las plántulas de cultivo (en líneas) y de malas hierbas (en rodales).

La teledetección como herramienta para la generación de mapas de malas hierbas

La teledetección consiste en obtener información espacial, espectral y temporal (en estudios a lo largo del tiempo) de un objeto, superficie o fenómeno de manera remota, así como en el conjunto de técnicas que permitan el análisis e interpretación de dicha información. Generalmente, esta información se registra mediante imágenes digitales capturadas por una cámara o sensor instalado en una plataforma aérea o de satélite. Por tanto, según las características del sensor empleado y la distancia de la plataforma al elemento estudiado, se adquieren datos con distinta resolución espacial y espectral, que son las variables que condicionan la aplicación de esta tecnología en objetivos agronómicos. Es decir, se pueden monitorizar las condiciones del cultivo si se usan las imágenes remotas con la resolución espacial y espectral necesaria, así como tomando dichas imágenes en el momento temporal adecuado.

Usando distintos tipos de imágenes y técnicas de teledetección, el grupo de investigación 'Teledetección aplicada a agricultura de precisión y malherbología' del Instituto de Agricultura Sostenible de Córdoba (<http://www.ias.csic.es>) ha desarrollado diversos protocolos para la detección de malas hierbas en cultivos extensivos como el trigo, maíz y girasol, tanto en época temprana como tardía, y la generación de mapas georeferenciados que permitan su implementación en equipos de tratamiento localizados (Pérez-Ruiz et al., 2015). A continuación, se describen algunos de estos trabajos, haciendo especial mención a las posibilidades de cada tipo de plataforma remota (imagen satélite, avión tripulado y dron) para la detección de malas hierbas según su estado de desarrollo (temprano o tardío), así como la limitación de las imágenes adquiridas según la resolución espacial, espectral y temporal de las mismas.

Generación de mapas de malas hierbas en época tardía (imágenes de satélite o de avión tripulado)

La discriminación de malas hierbas en estados fenológicos tardíos (floración o inicio de senescencia) con imágenes remotas se facilita por los siguientes factores: 1) hay escasa interferencia del suelo ya que la vegetación (cultivo y malas

hierbas) lo suele cubrir en su totalidad, 2) malas hierbas y cultivo suelen tener una maduración desigual, lo que se traduce en una elevada diferencia espectral entre ambos, y 3) las malas hierbas forman rodales de tamaño relativamente grande que, además, suelen ser estables en su localización en años sucesivos. Esta estabilidad temporal justifica que los mapas de las infestaciones de un año puedan ser útiles los años siguientes (p.ej., malas hierbas gramíneas en cereal, figura 3a), aunque los mapas también podrían ser usados el mismo año si el control con herbicidas de pre-emergencia no fue efectivo (p.ej., crucíferas en cereal, Figura 3b).

En nuestro grupo hemos desarrollado investigaciones para obtener mapas de infestaciones en época tardía en los siguientes escenarios:

1. Malas hierbas gramíneas como avena loca (*Avena spp.*), alpiste (*Phalaris spp.*) y vallico (*Lolium rigidum*) en trigo (figura 3a).
2. Malas hierbas crucíferas (generalmente *Sinapis spp.* y *Diptotaxis spp.*) en trigo (figura 3b) y habas.
3. Nerdo (*Ridolfia segetum*) en girasol (figura 3c).

En estos casos, se utilizaron imágenes en color e infrarrojo-color procedentes de aviones pilotados (López-Granados et al., 2006; Peña-Barragán et al., 2007) o imágenes multiespectrales del satélite de alta resolución espacial QuickBird (de Castro et al., 2013) para la discriminación de las malas hierbas, obteniéndose mapas de tratamientos que permitirían ahorros en herbicidas de más del 50% en las parcelas estudiadas (figura 4).

Figura 3. a) Infestaciones de malas hierbas gramíneas en un cultivo de trigo en estado senescente; b) Infestaciones de malas hierbas crucíferas en floración en trigo; c) infestaciones de nerdo en girasol.

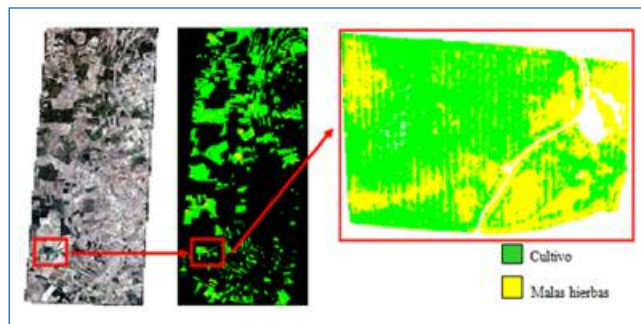


Figura 4. Imagen del satélite QuickBird (102 km²) utilizada en un estudio a nivel comarcal: imagen sin clasificar (izquierda) e imagen clasificada de campos de trigo con mapas de infestaciones de malas hierbas crucíferas (centro). Detalle de una parcela con zonas de malas hierbas y cultivo (derecha).



El uso de este tipo de imágenes para la detección de malas hierbas en época tardía está principalmente limitado por su resolución espacial, ya que ésta debe ser como mínimo una cuarta parte del tamaño de los rodales de malas hierbas existentes en el cultivo (Hengl, 2006). Asimismo, la disponibilidad de estas imágenes está también limitada por la frecuencia de paso del satélite por la zona de estudio (en el caso de imágenes de satélite) o por la capacidad de toma de imágenes de la empresa comercial contratada para realizar los vuelos con avión pilotado.

Generación de mapas de malas hierbas en época temprana (imágenes tomadas con drones)

En numerosas ocasiones no es posible realizar tratamientos localizados herbicidas en fases tardías por no disponer de herbicidas adecuados para su aplicación en dicho momento, por lo que se requieren tratamientos en fases más tempranas, justo cuando las malas hierbas y el cultivo están en estado fenológico de plántula (tratamientos de post-emergencia). En este caso, la discriminación de plántulas de malas hierbas requiere imágenes de muy elevada resolución espacial y tomadas en el momento temporal adecuado, lo cual sólo es posible actualmente con el uso de drones (López-Granados, 2011). Sus ventajas en comparación con las plataformas convencionales (satélites o aviones tripulados) son principalmente las siguientes:

- 1) **Autonomía y flexibilidad:** Los drones trabajan con total autonomía e incluso en días nublados, por lo que se pueden programar los vuelos a demanda y con una gran flexibilidad en momentos críticos del cultivo (figura 5).
- 2) **Vuelos a baja altura e imágenes de ultra-alta resolución espacial:** Los drones pueden volar a muy baja altura, lo que permite obtener imágenes aéreas con una elevada resolución espacial (1-10 cm/píxel), todo ello en función de las necesidades del usuario y la finalidad del estudio. Actualmente, la normativa española limita la altura máxima de vuelo de los drones de uso civil a 120 m (BOE, 2014).
- 3) **Configuración de sensores:** Los drones pueden utilizar sensores o cámaras con diferente tipo de rango espectral dependiendo del objetivo agronómico que se persiga (figura 6).

Nuestro Grupo de Investigación lleva a cabo varios estudios con drones en diferentes parcelas de trigo, maíz y girasol. Estos cultivos se han elegido en base a su elevado impacto agro-económico en España y otros países y a la posible extrapolación de los resultados a otros cultivos igualmente importantes que se siembran en hilera estrecha o en hilera ancha. Para ello, hemos puesto a punto todo el protocolo de captura de imágenes con el drone y estudiado los principales factores que afectan a la calidad de las imágenes y su capacidad para discriminar las malas hierbas presentes en dichos cultivos, tales como altura de vuelo, tipo de cámara o sensor utilizado, solape entre imágenes y proceso de mosaicado y orto-rectificación (Torres-Sánchez et al., 2013).

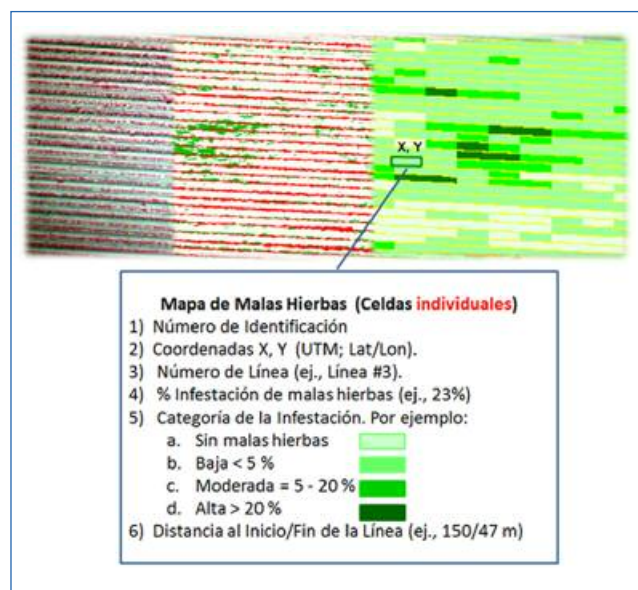
Figura 5. Evolución de un cultivo de maíz durante las primeras etapas de desarrollo, en donde se observa su rápido crecimiento. Imágenes tomadas con un drone a los 34 días (izquierda), 41 días (centro) y 48 días (derecha) después de la siembra.



Figura 6. Un drone equipado con una cámara multi-espectral (izquierda) y con una cámara convencional de espectro visible (derecha).

Asimismo, se han analizado imágenes de muy elevada resolución espacial (1 – 5 cm por píxel), tomadas tanto con cámaras multispectrales como convencionales de espectro visible (figura 6), y desarrollando algoritmos propios para el análisis de las imágenes de manera automática con el objetivo final de generar mapas de tratamientos adaptados a cada cultivo (Peña et al., 2013). Los procedimientos desarrollados generan información alfanumérica y tabulada de la parcela estudiada, y calcula las coordenadas y porcentaje de infestación siguiendo una estructura de malla, lo cual es muy útil para su interpretación y uso por parte de la maquinaria de tratamiento (figura 7)./

Figura 7. Secuencia del proceso de generación de mapas de malas hierbas: 1) imagen aérea (arriba, izquierda), 2) discriminación de malas hierbas, cultivo y suelo desnudo (arriba, centro) y mapa de cobertura de malas hierbas (arriba, derecha); así como tabla con la información obtenida del mapa de malas hierbas y que es exportado a la maquinaria de tratamiento (abajo).



Agradecimientos

Los Proyectos del grupo de investigación han sido financiados por el MINECO (y Fondos FEDER) y por la Unión Europea a través del 7º Programa Marco:

- Proyecto RECUPERA 2020: 'Monitorización de cultivos y malas hierbas mediante tecnologías aéreas con sensores en infrarrojo para la mejora de la gestión agrícola'.
- Proyecto MINECO: 'Detección Temprana de Malas Hierbas para control localizado: aplicaciones y perspectivas del uso de vehículos no tripulados', ref. AGL2011-30442-C02-01.
- Proyecto TOAS: 'New remote sensing technologies for optimizing herbicide applications in weed-crop systems', ref. FP7-PEOPLE-2011-CIG-293991. Más información en <https://toasproject.wordpress.com>
- Proyecto RHEA: 'Robot fleets for highly effective agriculture and forestry management', ref. FP7-NMP-2009-LARGE-3. Más información en <http://www.rhea-project.eu>

Referencias bibliográficas

- AEPLA (2015). Evolución del mercado fitosanitario. <http://www.aepla.es/el-mercado-fitosanitario>.
- BOE (2014). Real Decreto-ley 8/2014, de 4 de julio, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia. Boletín Oficial del Estado, Ministerio de la Presidencia (Madrid). https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-7064.
- De Castro, A. I., López-Granados, F., Jurado-Expósito, M. (2013). Broad-scale cruciferous weed patch classification in winter wheat using QuickBird imagery for in-season site-specific control. Precision Agriculture, 14(4), 392–413.
- Heijting, S., Van Der Werf, W., Kruijer, W., Stein, A. (2007). Testing the spatial significance of weed patterns in arable land using Mead's test. Weed Research, 47(5), 396–405.
- Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. Computers & Geosciences, 32(9), 1283–1298.
- Jurado-Expósito, M., López-Granados, F., Peña-Barragán, J. M., García-Torres, L. (2009). A digital elevation model to aid geostatistical mapping of weeds in sunflower crops. Agronomy for Sustainable Development, 29, 391–400.
- López-Granados, F. (2011). Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches. Weed Research, 51(1), 1–11.
- López-Granados, F., Jurado-Expósito, M., Peña-Barragán, J. M., García Torres, L. (2006). Using remote sensing for identification of late-season grass weed patches in wheat. Weed Science, 54, 346–353.
- Peña-Barragán, J. M., López-Granados, F., Jurado-Expósito, M., García-Torres, L. (2007). Mapping *Ridolfia segetum* patches in sunflower crop using remote sensing. Weed Research, 47(2), 164–172.
- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., de Castro, A. I., Kelly, M., López-Granados, F. (2013). Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images. PLoS ONE, 8(10), e77151.
- Pérez-Ruiz, M., González-de-Santos, P., Ribeiro, A., Fernández-Quintanilla, C., Peruzzi, A., Vieri, M., et al. (2015). Highlights and preliminary results for autonomous crop protection. Computers and Electronics in Agriculture, 110, 150–161.
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., De Castro, A. I., Peña-Barragán, J. M. (2013). Configuration and Specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Early Site Specific Weed Management. PLoS ONE, 8(3), e58210.
- Zhang, C., Kovacs, J. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. Precision Agriculture, 13, 693–712.