

Últimos avances en tecnologías para una gestión sostenible de las malas hierbas

César Fernández-Quintanilla^{1✉}, José Dorado¹, Dionisio Andújar¹, José María Peña¹,
Ángela Ribeiro², Ana Isabel de Castro³, Francisca López-Granados³

¹Instituto de Ciencias Agrarias, CSIC, Serrano 115B, 28006 Madrid

²Centro de Automática y Robótica, CSIC, 28500 Arganda del Rey, Madrid

³ Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, 14004 Córdoba

✉ cesar@ica.csic.es

Resumen: Hoy en día es posible realizar una detección temprana de malas hierbas en cultivos de girasol y maíz desde drones, habiéndose avanzado en el establecimiento de umbrales de acción y en la elaboración de mapas de tratamiento. En el caso del trigo es posible cartografiar zonas de riesgo en base a imágenes adquiridas al final del ciclo. Asimismo, existen diversos sensores (LIDAR, cámaras RGB y RGB-D) para la detección temprana en cultivos en líneas amplias desde plataformas terrestres. En cuanto a las tecnologías de actuación, existen diversos equipos para realizar tratamientos localizados de herbicidas y escardas mecánicas de precisión. El valor añadido de estas soluciones debería ser evaluado, validado y demostrado en la práctica en explotaciones comerciales.

Palabras clave: detección de malas hierbas, drones, sensores, tratamientos localizados, escardadores inteligentes.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años el desarrollo de nuevas tecnologías para la agricultura de precisión ha alcanzado un considerable grado de madurez. En el ámbito específico de la gestión de las malas hierbas se han desarrollado numerosas tecnologías tanto de detección como de actuación. A los procedimientos disponibles para la detección desde satélite o desde avión se han unido otros mucho más precisos para la detección desde drones volando a baja altura (López-Granados, 2011). Por otro lado, la disponibilidad actual de sensores y cámaras 2D y 3D de muy alta resolución y de ordenadores más rápidos capaces de procesar grandes volúmenes de datos abre la posibilidad de llevar a cabo actuaciones en tiempo real. En este trabajo haremos una breve síntesis de los últimos avances producidos en sistemas de detección aérea y terrestre así como de algunos de los equipos inteligentes disponibles para el control físico o químico de las malas hierbas detectadas. La revisión realizada se ha centrado principalmente en trabajos desarrollados dentro de nuestro país en los últimos cinco años.

2. TECNOLOGÍAS PARA LA DETECCIÓN DE MALAS HIERBAS

2.1. Desde plataformas remotas. La teledetección de malas hierbas puede hacerse desde diferentes tipos de plataformas remotas (Fig. 1). Castillejo-González et al. (2014) fueron capaces de generar mapas bastante precisos de la posición de *Avena sterilis* en parcelas de trigo utilizando imágenes multiespectrales en rango visible e infrarrojo cercano (RGB+NIR) obtenidas por el satélite QuickBird. La discriminación entre el cultivo y la mala hierba se basó en el hecho de que la senescencia en trigo se inició antes que en *A. sterilis*, por lo que era relativamente fácil detectar las panículas verdes de esta especie sobresaliendo por encima de las espigas doradas del trigo.

La utilización de aviones volando a altitudes mucho menores permite la detección de las malas hierbas en estados tempranos de su desarrollo, posibilitando la elaboración de mapas de

prescripción y la ejecución de tratamientos localizados en esa misma campaña. En un vuelo llevado a cabo sobre una parcela de maíz en el estado de 4-6 hojas, utilizando un sensor hiperespectral, fue posible definir la localización de las zonas libres de malas hierbas y las infestadas por *Sorghum halepense*, *Xanthium strumarium* y *Abutilon theophrasti* (Martín et al., en preparación).

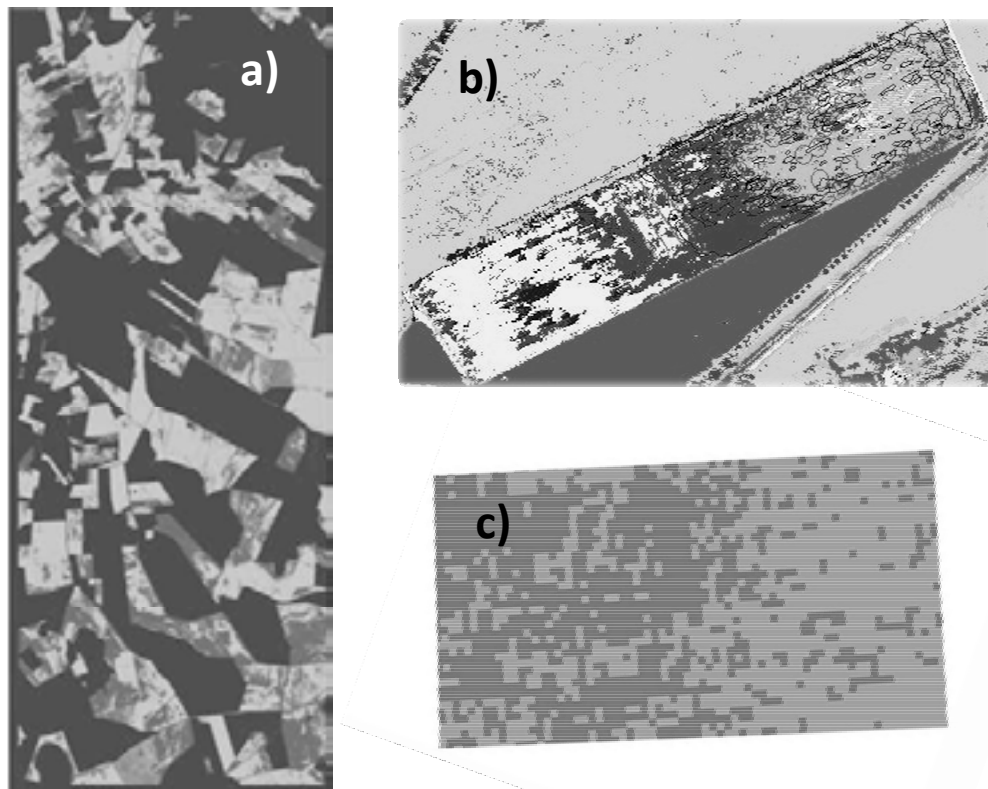


Figura 1. Ejemplos de imágenes remotas obtenidas con diferentes tipos de plataformas: a) Territorio de 73 km² con parcelas de trigo infestadas por *A. sterilis*; desde el satélite QuickBird a 450 km de altitud; b) Parcela de maíz de 5 ha infestada por varias especies de malas hierbas; desde un avión C-212-200 RS a 1.000 m de altitud; c) Parcela de girasol de 1 ha infestada por varias especies de malas hierbas; desde un dron a 30 m de altitud.

El empleo de drones volando a baja altura permite la obtención de imágenes con mucha mayor resolución espacial. Diversos estudios llevados a cabo con drones volando entre 30 y 60 m de altitud equipados con cámaras multispectrales (RGB+NIR) y cámaras RGB convencionales han mostrado la capacidad de estos equipos para obtener imágenes de muy elevada precisión de las malas hierbas presentes en cultivos de viña, girasol y maíz (de Castro et al., 2017; López-Granados et al., 2016 a y b). Sin embargo, en cultivos de trigo la detección temprana de malas hierbas está en proceso de solventarse ya que es más compleja dada la proximidad de las líneas del cultivo y el hecho de que este cubre rápidamente todo el terreno enmascarando a las malas hierbas presentes (Torres-Sánchez et al., 2014).

Las imágenes aéreas obtenidas deben ser procesadas para poder disponer de mapas de prescripción. En ese sentido, Peña et al. (2013) elaboraron un mapa con tres categorías de cobertura de malas hierbas (alta-mediana-baja) a partir de las imágenes obtenidas desde un dron volando sobre una parcela de maíz. Dicho mapa se ajustaba a la realidad con un grado de precisión cercano al 90%. En la elaboración de los mapas de prescripción, un parámetro fundamental es el umbral de tratamiento. Este parámetro condiciona de forma directa la superficie final que debe ser tratada. Por ejemplo, en un estudio realizado sobre una parcela de girasol se encontró que, dependiendo del umbral utilizado, el porcentaje de superficie tratada variaba desde un 23% (con un umbral de 0% de cobertura) hasta un 2,5% (con un umbral de 15% de cobertura). Paralelamente, la precisión de la definición de las zonas a tratar se incrementó desde un 71% a un 100% al incrementar el umbral utilizado (López-Granados et al., 2016).

2.2. Desde plataformas terrestres. Los métodos de detección más utilizados se basan en el empleo de imágenes obtenidas por cámaras RGB. El procedimiento usado para discriminar las malas hierbas de los otros elementos de la imagen consta generalmente de tres pasos: 1) segmentación de la imagen, separando los píxeles correspondientes a vegetación del resto de elementos que aparecen en la imagen (suelo, sombras, rastrojo, etc.); 2) identificación y eliminación de las zonas de vegetación correspondientes a las líneas de cultivo; 3) identificación de la mala hierba como las zonas de la capa vegetal que permanece (Burgos-Artizzu et al., 2011). En algunos casos es incluso posible la discriminación de diferentes tipos de malas hierbas en base a su altura, forma o tamaño. Así, Herrera et al. (2014) describen una aproximación que permite la discriminación entre infestaciones de malas hierbas mono y dicotiledóneas en cultivos de maíz alcanzado una precisión media de clasificación entorno al 93%.

El análisis de estas imágenes necesita de una elevada capacidad computacional para procesar la gran cantidad de datos provenientes de las cámaras RGB. En la actualidad, la disponibilidad de mayores capacidades de procesamiento unido a cámaras digitales de alta resolución puede permitir la utilización de estas técnicas. De hecho, ya se ha comercializado un equipo (H-Sensor, Agricon) capaz de discriminar plántulas en base a formas lo suficientemente rápido como para poder realizar tratamientos localizados con herbicidas en tiempo real.

Otra posibilidad es la utilización de sensores LiDAR, sensores que emiten pulsos láser y miden el tiempo de retorno de dichos pulsos al emisor, lo que permite calcular la distancia a cada punto que integra la superficie objetivo. Estos sensores se han empleado en el seguimiento del desarrollo de cultivos y en la caracterización de la arquitectura de frutales y viña. Andújar et al. (2013) exploraron su uso para caracterizar la superficie del terreno en cultivos de maíz, discriminando la presencia del cultivo y de las infestaciones de malas hierbas dicotiledóneas y gramíneas (*Sorghum halepense*) basándose en la altura.

La combinación de varios sensores en un mismo equipo puede mejorar la detección y discriminación de malas hierbas. Las cámaras de profundidad (tipo Kinect) combinan 3 tipos de cámaras: infrarroja, RGB y RGB-D, permitiendo crear nubes de puntos y modelos 3D de la vegetación presente. Este principio ha sido utilizado por Andújar et al. (2016) para discriminar un cultivo de maíz de las malas hierbas acompañantes. Dado que la gramínea predominante (*S. halepense*) tenía una altura superior a las dicotiledóneas vecinas fue posible discriminarla en base a ese criterio, utilizando asimismo el color para aislar (segmentar) inicialmente la capa vegetal.

3. TECNOLOGÍAS PARA LA ACTUACIÓN CONTRA LAS MALAS HIERBAS

3.1. Control químico. Dentro del Proyecto RHEA (www.rhea-project.eu) se diseñó, fabricó y evaluó un prototipo de pulverizador inteligente capaz de realizar tratamientos muy precisos en base a mapas de prescripción construidos a partir de imágenes aéreas obtenidas desde drones (Pérez-Ruiz et al., 2015). Dicho equipo consta de un sistema de inyección central y de 12 válvulas de solenoide de alta velocidad. La evaluación en campo de este sistema demostró que era capaz de aplicar el herbicida de forma localizada con menos de un 5% de errores.

Para la ejecución de tratamientos herbicidas localizados en tiempo real se han comercializado, al menos, dos equipos diferentes: el ya mencionado H-Sensor de Agricon (<http://www.p3-sensor.de/produkte/h-sensor/>) y el Spot Sprayer de Garford (www.garford.com/news_latest.html). Este último equipo utiliza varias cámaras colocadas en la barra del pulverizador para definir la posición de las líneas del cultivo y localizar plantas individuales o rodales de malas hierbas presentes entre las líneas. Posteriormente, aplica un herbicida (selectivo o total) a esas zonas, utilizando un sistema innovador de pulverización de alta precisión. Este equipo se emplea en diversos cultivos de alto valor económico y baja competitividad con las malas hierbas (p. ej. remolacha, cebolla) y para la eliminación mediante glifosato de plantas de patata provenientes de la anterior campaña en cultivos de cebolla o zanahoria.

3.2. Control físico. Existen diversos equipos comerciales capaces de realizar una escarda mecánica muy precisa, utilizando cámaras de vídeo que permiten ajustar lo más posible la labor a las líneas del cultivo, evitando daños a este. Un nivel superior de precisión, consistente en realizar la escarda dentro de la misma línea, ha sido abordado con éxito mediante varios procedimientos (Fennimore et al., 2016). Uno de los más extendidos es el Robocrop de Garford (http://www.garford.com/spanish/products_robocrop_es.html). Dicho equipo dispone de unos discos rotativos cuyo movimiento está controlado por un sistema de visión que detecta la presencia de plantas de cultivo y evita que se labore esa zona. Estos dispositivos se emplean comercialmente en cultivos hortícolas con formas fácilmente identificables tales como la lechuga, la col o el apio.

Recientemente la empresa Bosch, bien conocida por sus desarrollos tecnológicos, ha iniciado la comercialización de una plataforma robótica («Bonirob»)(www.deepfield-robotics.com/index-en.html) que puede ser equipada con una variedad de componentes para realizar diversas operaciones agrícolas. Uno de estos componentes permite la escarda mecánica, utilizando un sistema de visión que detecta la presencia de plántulas de malas hierbas y un mecanismo de presión que las aplasta y entierra en el suelo (Michaels et al., 2015).

Dentro del Proyecto RHEA se desarrolló un apero que combina la escarda mecánica de las malas hierbas entre las líneas del cultivo, utilizando un cultivador binador, con el control térmico localizado en las líneas, utilizando unos quemadores de propano que ajustan la intensidad de la llama a la densidad de malas hierbas detectadas por un sistema de visión (González de Santos et al., 2016). Tanto este equipo como el anterior pueden integrarse en un robot móvil autónomo lo que permite una ejecución autónoma de esta operación

4. APLICACIONES EN INVESTIGACIÓN

La disponibilidad de algunas de estas herramientas para detectar y discriminar automáticamente y de forma precisa las malas hierbas, abre nuevas posibilidades para abordar estudios agro-ecológicos con el fin de mejorar su gestión. Los investigadores en malherbología podrían así

dar el salto desde los ensayos en parcelas de tamaño reducido en fincas experimentales a estudios a mayor escala que incluyan las condiciones reales de campos comerciales. Dichas investigaciones producirían resultados más próximos a la realidad y facilitarían la participación de los agricultores, que aportarían de esa forma sus conocimientos, experiencia e ideas.

5. CONCLUSIONES

Aunque existe un arsenal bastante amplio de nuevas tecnologías para el control de malas hierbas, su adopción por parte de los agricultores es todavía escasa. Hoy en día la oferta es superior a la demanda. Para superar este reto es necesario que los agricultores y las cooperativas jueguen un mayor papel en la búsqueda de soluciones técnicas. El valor añadido de estas soluciones debe ser evaluado, validado y demostrado en la práctica en explotaciones comerciales. Asimismo es necesario tener en cuenta que el empleo de estas tecnologías puede tener efectos tanto positivos (mejora de la eficiencia y sostenibilidad de la producción) como negativos (eliminación de puestos de trabajo).

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el proyecto coordinado AGL2014-52465-C4.

7. REFERENCIAS

- Andújar D, Fernández-Quintanilla C, Dorado J and Ribeiro A (2016). An approach to the use of depth cameras for weed volume estimation. *Sensors*, 972, 1-11.
- Andújar D, Escola A, Dorado J and Fernández-Quintanilla C (2013). Potential of a terrestrial LiDAR-based system to characterize weed vegetation in maize crops *Computers and Electronics in Agriculture*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 92, 11-15.
- Burgos-Artizzu XP, Ribeiro A, Guijarro M and Pajares G (2011). Real-time image processing for crop/weed discrimination in maize fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75(2), 337-346.
- Castro de AI, Peña JM, Torres-Sánchez J, Jiménez-Brenes FM and López Granados F (2017). Uso de drones (UAV) para la detección de grama en cubiertas de viña. [https://www.interempresas.net/Grandes-cultivos/Articulos/167846-Uso-de-drones-\(UAV\)-para-la-deteccion-de-grama-en-cubiertas-de-vina.html](https://www.interempresas.net/Grandes-cultivos/Articulos/167846-Uso-de-drones-(UAV)-para-la-deteccion-de-grama-en-cubiertas-de-vina.html). *Grandes Cultivos*, 12, 4-8.
- Castillejo-González IL, Peña-Barragán JM, Jurado-Expósito M, Mesas-Carrascosa FJ and López-Granados F (2014). Evaluation of pixel- and object-based approaches for mapping wild oat (*Avena sterilis*) weed patches in wheat fields using QuickBird imagery for site-specific management. *European Journal of Agronomy*, 59, 57-66.
- Fennimore SA, Slaughter DC, Siemens MC, Leon RG and Saber MN (2016). Technology for automation of weed control in specialty crops. *Weed Technology*, 30, 823-837.
- González-de-Santos, Ribeiro, Fernández-Quintanilla et al. (2016) Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture. *Precision Agriculture*, doi:10.1007/s11119-016-9476-3.
- Herrera PJ, Dorado J and Ribeiro A (2014). A novel approach for weed type classification based on shape descriptors and a fuzzy decision-making method. *Sensors*, 14, 15304-15324.
- López-Granados F (2011). Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches. *Weed Research*, 51, 1-11.
- Lopez-Granados F, Torres-Sanchez J, Serrano-Perez A, de Castro AI, Mesas-Carrascosa FI and Peña JM (2016a). Early season weed mapping in sunflower using UAV technology: variability of herbicide treatment maps against weed thresholds. *Precision Agriculture*, 17, 183-199.

- López-Granados F, Torres-Sánchez J, de Castro AI, Serrano-Pérez A, Mesas-Carrascosa FJ and Peña J M (2016b). Object-based early monitoring of a grass weed in a grass crop using high resolution UAV-imagery. *Agronomy for Sustainable Development*, 36 (4): paper 67. DOI: 10.1007/s13593-016-0405-7.
- Martin P, Dorado J, Fernández-Quintanilla C (en preparación). The spatial distribution of *Sorghum halepense*, *Xanthium strumarium* and *Abutilon theophrasti* populations in maize fields can be mapped through airborne hyperspectral imaging.
- Michaels A, Haug S and Albert A (2015). Vision-based high-speed manipulation for robotic ultra-precise weed control. *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference*, 5498-5505.
- Peña J M, Torres-Sánchez J, de Castro A I, Kelly M, and López-Granados F (2013). Weed mapping in early-season maize fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. *PLoS ONE*, 8, e77151.
- Pérez-Ruiz M, Gonzalez-De-Santos P, Ribeiro A, Fernandez-Quintanilla C, Peruzzi A, Vieri M, Tomic S and Agüera J (2015). Highlights and preliminary results for autonomous crop protection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 10, 150-161.
- Torres-Sánchez J, Peña-Barragán J M, de Castro AI and López-Granados F (2014). Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, 104-113.

Recent advances in technologies for a sustainable weed management

Summary: In maize and sunflower crops it is possible to use drones for monitoring weed populations at early growth stages. In wheat crops, although it is not feasible to conduct an early weed detection from aerial platforms, it is possible to define zones of high risk of infestation based on drone images obtained at the end of the season. In addition, it is possible to use various types of sensors (LIDAR, RGB cameras, Depth cameras) on ground platforms for an early weed detection in wide-row crops. For actuation, machine vision technology, together with data processors, have been developed to enable commercial machines to recognize crop row patterns and control weeds using mechanical and chemical tools. The added value of these solutions should be tested, validated and shown in commercial farms.

Keywords: weed detection, drones, sensors, patch sprayers, smart cultivators.