

Malherbología digital, una nueva estrategia en agricultura de precisión

Pilar Barreiro, Natalia Hernández Sánchez y Belén Diezma.
LPF_TAGRALIA, UPM CEL_Moncloa.

En la actualidad, el control de la flora adventicia ha pasado a un primer plano en la gestión de las fincas agropecuarias debido a cambios en los sistemas de manejo (siembra directa), a la llegada de nuevas especies exóticas con comportamiento invasor y a la presión ejercida por la recurrencia de un mismo manejo especialmente de tipo químico. En este artículo se analizan nuevas formas de control de estas especies basadas en técnicas de agricultura de precisión.



En el acervo popular, toda aquella flora que aparece de manera indeseada en un cultivo humano es una mala hierba. Los malherbólogos, sin embargo, precisan que no es lo mismo la flora adventicia o arvense (surge de manera espontánea), que las especies que resultan claramente dañinas. En este sentido, se habrá de aquilatar el daño en términos de competencia efectiva con las plantas cultivadas (disminución de la productividad, kg/ha), o bien en relación con una posible toxicidad para el ganado u otros posibles consumidores del producto final (en el uso agroalimentario, por ejemplo).

El libro *Las malas hierbas de los cultivos españoles* de José Luis Carretero (2004) editado por Phytoma, puede considerarse una muy buena clave de búsqueda ya que incluye más de 2.500 registros (a nivel de especie o inferior) que pueden encontrarse en nuestros cultivos. Este libro, además de las claves de clasificación (que permiten una adecuada identificación), aporta detalles relativos a la morfología, corología (características de las flores) y ecología (entorno de desarrollo) de las distintas especies y subespecies. Otra fuente de información contrastada son las guías de cultivo que el MAPA está elaborando en colaboración con la mesa sectorial de Sanidad Vegetal.

Relevancia del consumo de herbicidas

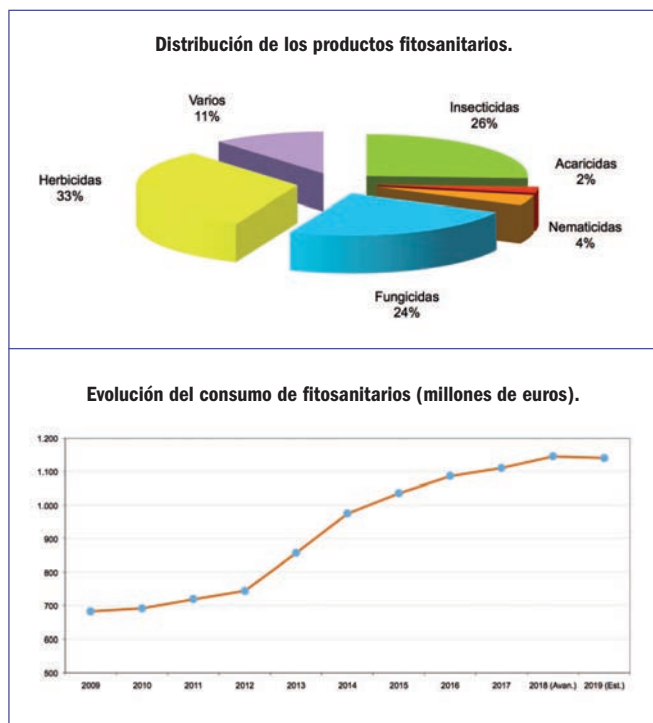
La Estadística de Comercialización de Productos Fitosanitarios, elaborada por el



¡YA ESTÁ AQUÍ! 5ª GENERACIÓN

valtra.es

Figura 1 Estadísticas básicas del consumo de fitosanitarios en el territorio español. Fuente: Anuario de Estadística Agroalimentaria, Mapa (2020).



Ministerio de Agricultura desde 2011 e integrada en el Plan de Acción Nacional para el uso sostenible de productos Fitosanitarios (PAN), recoge las cantidades de los principales grupos de las sustancias activas comercializadas dentro del marco nacional por las empresas titulares de productos fitosanitarios. La última actualización, con datos de 2019, recoge que la cantidad total de sustancias activas comercializadas fue de 75.397 toneladas, un 2,9% más que en 2018 y un 3% más que en 2011. En el conjunto de la UE se venden cada año unas 350.000 toneladas de pesticidas.

Los herbicidas son el segundo grupo en importancia, con 17.023 toneladas anuales, lo que supone un 22,6% del total, manteniéndose en el mismo nivel que en 2018; un 20% superior al valor de 2011.

La **figura 1** muestra las estadísticas básicas de consumo de fitosanitarios de acuerdo con el Anuario de Estadística Agroalimentaria. El valor previsto para 2019 ascendió a un gasto de 1.140 millones de euros, 360 millones correspondientes a herbicidas. Por tanto, una reducción a la mitad del uso de herbicidas no solo es medioambientalmente recomendable, sino que puede suponer un alivio económico relevante si se consigue desarrollar un método alternativo con un coste inferior.



LO QUE QUIERES
A TU ALCANCE

Visita: valtra.es/finance

VALTRA

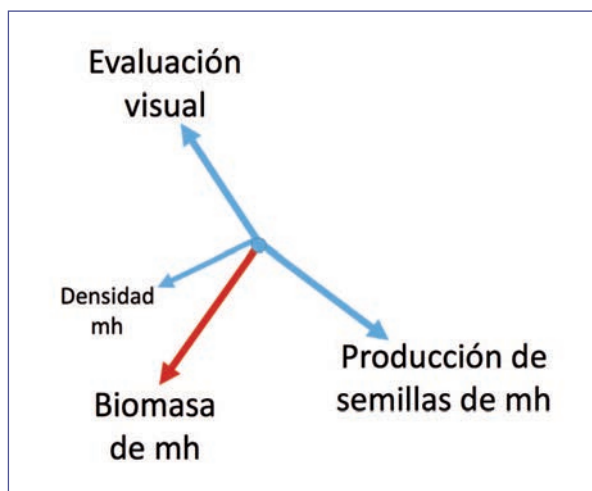
YOUR WORKING MACHINE

Las autoridades comunitarias en el “Informe Especial sobre el Uso Sostenible de Productos Fitosanitarios” constatan los escasos avances logrados en la reducción de fitosanitarios desde la aprobación en 2009 de la Directiva 128 CE relativa al uso sostenible de plaguicidas (**figura 1**). En este contexto, la Estrategia De la Granja a la Mesa, publicada en mayo de 2020, establece objetivos ambiciosos para los plaguicidas, en particular una reducción a la mitad en el uso de plaguicidas químicos para 2030, así como la minoración en un 50% del uso de los pesticidas más peligrosos; fundamentalmente los menos selectivos (por ejemplo, arsenicales, clo-ratos y dinitrofenoles) que son más tóxicos para los animales (Gupta, 2018).

Estrategias en el control de malas hierbas

La primera fase del tratamiento variable pasa por la identificación de las malas hierbas, que exige un conocimiento previo de su biología particular: porte, vigor, agresividad, área de desarrollo (entre líneas o junto al cultivo), propagación en rodales (característico de órganos vegetativos subterráneos), o propagación en guerrilla (típico de semillas dispersadas por el viento). Se puede emplear bien una detección de la mala hierba a nivel del suelo, o bien aérea (drones). En el primer caso, se puede realizar la identificación en el momento de la cosecha montando los sensores en las cosechadoras (para actuar en la siguiente campaña), o bien en tiempo real (en el momento de realizar la escarda montado sobre el apero). El empleo de drones es recomendable para niveles de infestación de entre el 5% y el 20%, mientras que la detección en

Figura 2 Meta-análisis de la documentación científica publicada entre 1970 y 2010: 3.496 artículos.



tiempo real es óptima para valores entre 20% y 40% (Barreiro, 2015). Para valores de infestaciones superior al 40% no compensa disponer de un equipamiento de control localizado.

Cuando la identificación de la mala hierba es asíncrona (no en el momento del tratamiento) se emplean mapas cuya información se transcribe a un fichero que ha de transferirse, en el momento de realizar el tratamiento, al controlador de tareas Iso-bus o bien a un controlador específico del equipo.

Para el control de malas hierbas se puede optar por medios físicos o químicos. Tradicionalmente la escarda física se asocia a un tratamiento global entre las hileras de cultivos de baja densidad (distancia entre líneas superior a 50 cm). En todo caso, la escarda mecánica se ha de realizar en el primer estadio de desarrollo de la mala hierba, y tiene el inconveniente de resultar contraproducente en malas hierbas que se reproducen por órganos vegetativos en vez de semillas.

Por otra parte, en los tratamientos químicos (mediante herbicidas) hay que diferenciar entre el control por tramos de secciones de pulverización, respecto a la pul-

verización puntual (*spot spraying*) que además de luchar contra las plantas adventicias, minimiza el riesgo de que éstas se vuelvan resistentes a los herbicidas. Los fabricantes indican que con una pulverización puntual es posible ahorrar hasta un 80-90% del coste de los productos químicos en comparación con un trabajo de pulverización en todo el campo. Además, al ser significativamente menor el volumen de caldo aplicado por hectárea, el número de veces que se rellena el depósito se reduce considerablemente. Igualmente hace posible el uso de equipos de aplicación con depósitos de menor volumen, lo que conlleva un ahorro en el coste de adquisición y de tracción.

Bases de la malherbología

El comité de Prevención de Resistencias a Herbicidas¹ (CPRH) ofrece una recopilación de información muy relevante para cualquier técnico y usuario especializado interesado en este tema. En la actualidad, se han descrito 521 casos de resistencia de las malas hierbas a herbicidas, correspondientes a 263 especies. Además de los 26 modos de acción conocidos, existen referenciados 23 casos de resistencias. Estos datos ponen en evidencia la urgencia de encontrar métodos alternativos y, en su defecto, procedimientos de aplicación localizada en rodales con dosis adaptadas a cada situación. Un estudio científico de Norsworthy y colaboradores (2018) indica que para entender la causa de las resistencias hay que acudir al concepto de tasa de mutación real. Aunque este valor no se conoce para la mayoría de los herbicidas, la tasa de mutación natural y espontánea para un solo gen se estima entre 1 y 10 ppm por generación, considerando que algunas malas hierbas como el amaranto

producen más de 600.000 semillas por planta, es fácil suponer que las resistencias no harán más que incrementarse al nivel actual de tratamientos.

De acuerdo con el trabajo anteriormente mencionado, el estudio de los bancos de semillas de malas hierbas en el suelo se consideraba fundamental por su relación con el conocimiento de la dinámica de las malas hierbas, así como para formular tratamientos viables. Hoy en día lo ampliaríamos a la viabilidad de formular tratamientos variables a nivel subparcelario, es decir, establecer una malherbología de precisión.

En el escenario actual de resistencia a herbicidas urge volver a los orígenes de la malherbología y huir de los herbicidas de amplio espectro. Para ello, se ha propuesto la estrategia de umbral 0, es de-

cir, una mínima cantidad de aplicación de caldo (y de materia activa) puede ser suficiente, si se emplea como criterio el control del número y fertilidad de las semillas de las malas hierbas.

Norsworthy y colaboradores han realizado un meta-análisis de la documentación científica publicada entre 1970 y 2010: 3.496 artículos, utilizando para ello los términos de búsqueda: eficacia de herbicidas, y evaluación de los herbicidas (no varios sinónimos de entrada). Con este conjunto de artículos, se hizo una búsqueda secundaria empleando como palabras claves: producción de semillas, banco de semillas y su fecundidad, así como reproducción mediante órganos vegetativos subterráneos: 162 artículos de los cuales 81 aludían a la clasificación visual de malas hierbas. La aplicación de un

análisis multivariante a los metadatos permite explicar un 65% de la información contenida en los artículos en relación a los términos evaluados. Un resultado de enorme valía de este trabajo es que muestra que la densidad de mala hierba evaluada visualmente solo muestra una correlación marginal (escasa) con la eficacia y la evaluación de los herbicidas (medida en términos de biomasa de malas hierbas, **figura 2**), de donde se deduce, que es necesario reconsiderar los métodos que empleamos actualmente a la hora de decidir la dosis de caldo (y la concentración en materia activa) si queremos evitar que siga ampliándose el número de especies que son resistentes a los herbicidas. La **figura 2** representa como vectores la relación entre algunas variables del estudio: cuanto más larga

Continental
The Future in Motion

TractorMaster

Mayor duración y confort gracias a la tecnología de taco d.fine

Impulsado por la pasión y la dedicación, el agricultor trabaja infatigablemente para conseguir la mejor cosecha. Del mismo modo, nuestros ingenieros se esfuerzan a diario en diseñar un neumático que responda a las necesidades del agricultor en cualquier circunstancia.

Nuestro neumático TractorMaster destaca sobre los estándares del mercado gracias a la incorporación de la tecnología N.flex, el innovador diseño del talón y la avanzada tecnología de taco d.fine. Neumáticos que ofrecen mayor duración y confort para agricultores incansables.



Para más información:
www.continental-industrial.es

Engineered
for **Efficiency**

Pasión por la tierra
Neumáticos agrícolas de altas prestaciones

es la flecha, mayor es la importancia de la variable, y cuanto más alineadas se encuentran dos flechas (en el mismo sentido o en sentido contrario) más relacionadas están entre sí.

Este tipo de trabajos nos demuestra que resulta muy útil aplicar técnicas avanzadas de análisis de información, que caen en la esfera denominada Big Data.

Aplicación variable

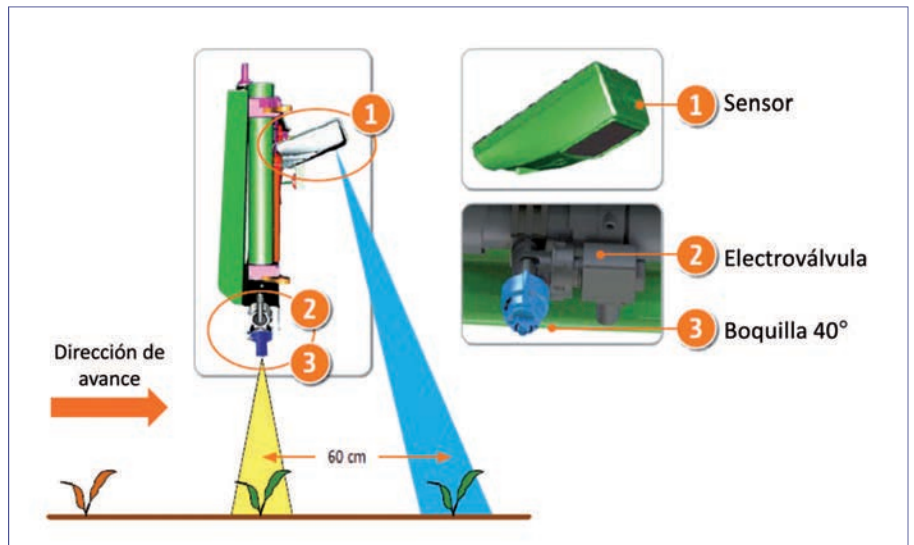
Los sistemas comerciales de aplicación puntual de herbicidas basados en sensores activos disponen de varias fuentes de luz, normalmente de tipo LED (monocromática), que iluminan el terreno. La luz emitida por cada LED interacciona de diferente manera con el suelo, el rastrojo, el cultivo y la planta adventicia, por lo que la luz que devuelven estos elementos del terreno es también diferente. Un detector se encarga de recibir la intensidad de la luz devuelta (**figura 3**), y una serie de operaciones matemáticas en tiempo real proporcionan un valor numérico que permite identificar la mala hierba. Al disponer de fuentes de luz propias los sistemas no se ven afectados por sombras u oscuridad por lo que pueden trabajar a distintas horas del día, incluida la noche.

La discriminación entre el suelo o el rastrojo y la planta (cultivo o adventicia) se denomina “Green on Brown” (verde sobre marrón) y resulta sencilla. Sin embargo, surgen grandes dificultades para discriminar entre el cultivo y la planta adventicia (“Green on Green” o verde sobre verde). Por ello, cuando el cultivo está implantado la detección es más efectiva en los espacios entre líneas o en los momentos en los que el cultivo se encuentra poco desarrollado respecto a la mala hierba. Estos sistemas de identificación están en comunicación en tiempo real con un componente electrónico que controlará la apertura y cierre de las boquillas de aplicación a través de una electroválvula de

Figura 3 Detalle y montaje del sistema WeedSeeker 2.



Figura 4 Detalle de los elementos montados en una barra de pulverización para la aplicación puntual de herbicidas. Sistema Weed-it implementado en el pulverizador UX de Amazone con el nombre de UX AmaSpot (figura modificada del catálogo del UX AmaSpot).



tipo solenoide. Para conseguir la mayor resolución espacial los pulverizadores hidráulicos deben incluir una electroválvula en cada boquilla obteniendo un control individual. Las boquillas utilizadas son convencionales, sin embargo, el portaboquillas sí requiere modificación ya que

debe incorporar la electroválvula (**figura 4**). Además, el dispositivo de emisión y detección de luz se sitúa delante de la boquilla, lo que exige un mecanismo de sujeción específico (**foto 1**). Actualmente destacan dos sistemas comerciales que son el WeedSeeker 2

(Trimble Inc.) y el Weed-it Quadro (Romotron B.V).

El WeedSeeker 2 computa un valor numérico denominado Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en el rojo NDVI_{RED} (por su nombre en inglés "Normalized Difference Vegetation Index"). Este índice es una medida de la actividad fotosintética de la planta, ya que está relacionado con la presencia de clorofila. Requiere dos fuentes de luz LED (**foto 2**), una en el rojo y otra en el infrarrojo cercano. El NDVI_{RED} se obtiene de la combinación de las intensidades de la luz devuelta en dichas bandas.

El valor del NDVI_{RED} del suelo o del rastrojo es más bajo que el de una planta en desarrollo, de forma que, cuando se supera un valor umbral, el elemento es identificado como cultivo o como mala



Foto 1. Detalle del sistema de sujeción del sistema Weed-it Quadro.

FINANCIACIÓN **5.0**

5 AÑOS AL 0% TIN

SERIES T5 / T6 / T7 / T8

0,46% TAE*

PAGA EN EL FUTURO

PRIMERA CUOTA ENERO 2023

www.newhollandspain.es



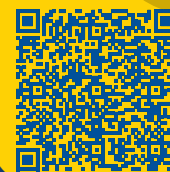
NEW HOLLAND TOP SERVICE 00800 64 111 111⁽¹⁾
ASISTENCIA E INFORMACIÓN 24/7.

⁽¹⁾ La llamada es gratuita desde teléfono fijo. Antes de llamar con tu teléfono móvil, consulta tarifas con tu operador.

5 años 0% TIN, 0.46% TAE* con primer pago Enero 2023.

*T.A.E. 0.46%. Ejemplo basado en la financiación de 10.000 € para operación de crédito 5 cuotas anuales de 2000€. Cuotas pospagables, Comisión de apertura y gastos de estudio 1,5%. Gastos de inscripción en el Registro 0€. Además de las cuotas el cliente deberá abonar el importe derivado de la protección de equipo "Asset Protection" de 90,67€** anuales. Interés subvencionado por New Holland Agriculture. Financiación realizada por CNH Industrial Capital Europe Sucursal en España. Operación sujeta a estudio y aprobación. Oferta para operaciones solicitadas a estudio desde el 1 de septiembre hasta el 30 de diciembre de 2021 para Modelos Clave de Mercado en las gamas de T5, T5EC/DCT, T5AC, T6, T7 y T8 y ejemplo calculado con inicio de la financiación el 1 de septiembre 2021. **Importe variable según el precio del equipo financiado.

FINANCIA AQUÍ



NEW HOLLAND
AGRICULTURE



Foto 2. Detalle del montaje de un sistema WeedSeeker 2 por cada boquilla.



Foto 3. Detalle de la iluminación con luz azul en el Weed-it Quadro para producir la fluorescencia de la clorofila.

hierba. La calibración del sistema debe hacerse en cada uso sobre el terreno que será el fondo de la detección (suelo desnudo o rastrojo), umbral adaptado automáticamente; si hubiera plantas adventicias debajo de un sensor cuando éste se calibra, ese sensor solo detectará plantas más grandes que las calibradas.

Cada sensor WeedSeeker 2 actúa sobre el funcionamiento de una boquilla y se coloca justo delante de ella (foto 2), siendo la separación habitual de 50 cm, con los haces de luz perpendiculares al suelo. Tiene compatibilidad Isobus. Este equipo permite la generación de mapas con la localización de los lugares donde se ha aplicado el fitosanitario. También es posible la aplicación basada en mapas de prescripción y compensar en los giros las diferencias de velocidad entre las boquillas a lo largo de la barra desde el centro a los extremos.

El sistema Weed-it Quadro también se basa en la detección de clorofila en la planta adventicia, pero en este caso hace uso del fenómeno de fluorescencia que presenta dicho compuesto (y no en la reflectancia como el sistema WeedSeeker 2). La fuente de luz es de tipo LED en el azul (foto 3). Esta luz azul es absorbida por la clorofila y provoca en ella una re-emisión en la banda del rojo a la que es sensible el detector. Este fenómeno ha demostrado ser más sensible a las malas hierbas y menos sensible al ruido de fondo.

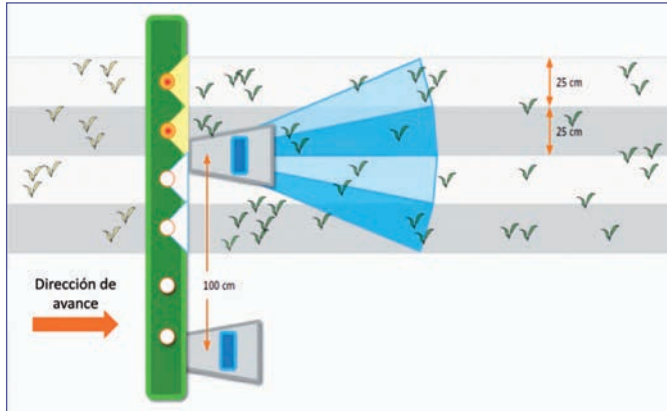
Cada sistema Weed-it Quadro controla la actuación independiente de cuatro boquillas separadas 25 cm (figura 5), lo que incrementa la resolución espacial respecto al WeedSeeker 2, aunque aumenta los requerimientos de estabilidad de la barra y exige boquillas de menor ángulo de abanico. En este caso, el haz de luz está enfocado hacia adelante, lo que amplía la distancia entre el punto de inspección y la boquilla, así se dispone de más tiempo para las operaciones de cálculo y permite al pulverizador avanzar a mayores velocidades. Además, Weed-it Quadro incorpora un procesador de doble núcleo para una comunicación rápida y una alta frecuencia de muestreo; también realiza una calibración automática del umbral de detección y permite trabajar tanto de día como de noche.

El sistema Weed-it Quadro ofrece tres modos de operación seleccionables según las necesidades del momento de aplicación. En el modo puntual (*spot spraying mode*) solo se aplica fitosanitario cuando se ha detectado la mala hierba. En el modo dual (*dual spraying mode*) se aplicará en todo el terreno una fracción del volumen de aplicación establecido para el tratamiento (normalmente el 25%). Esto garantiza que las malas hierbas que no hayan sido detectadas por tener escaso desarrollo reciban al menos una pequeña cantidad de fitosanitario, a la que probablemente sean suficientemente susceptibles. La detección

de una planta adventicia disparará la aplicación puntual del volumen establecido en la boquilla correspondiente. En el modo de cobertura (*cover spraying mode*) el equipo de pulverización trabaja como un equipo convencional, con la ventaja de que es capaz de adaptar el caudal aportado por las boquillas a la velocidad de avance sin actuar sobre la presión de trabajo ya que las boquillas instaladas son de tecnología PWM ultrarrápida (boquillas *pulse-width modulated*, objeto de otro artículo).

El sistema Weed-it Quadro tiene compatibilidad Isobus y permite la generación de mapas de aplicación, mapas de malas hierbas, mapas de biomasa, así como la aplicación basada en mapas de prescripción. Actualmente el sistema Weed-it Quadro ha sido implementado en el pulverizador UX de Amazone con el nombre de UX AmaSpot (Amazonen-Werke). Para alcanzar una mayor efectividad "Green on Green" se han desarrollado también sistemas de visión basados en análisis de imagen, con una exigencia en componentes de adquisición de datos y en complejidad de análisis muy elevados. En estos sistemas la morfología de la planta inspeccionada determina si ésta es adventicia. Algunos sistemas son capaces de discriminar entre tipos de plantas por comparación con una librería de imágenes utilizada durante el aprendizaje del sistema (*machine learning*). Esto hace posible, incluso, la aplicación de diferen-

Figura 5 Esquema de los cuatro sectores del campo de detección del sistema AmaSpot y las cuatro boquillas correspondientes (figura modificada del catálogo del UX AmaSpot).



tes fitosanitarios en función de la planta identificada. Es el caso de la tecnología See & Spray Select (John Deere) que utiliza una cámara RGB y controla el número de boquillas adyacentes que deben activarse para abarcar la totalidad de la planta detectada. See & Spray Select se combina con el sistema ExactApply (John Deere) de cuatro boquillas PWM, lo que amplía su funcionalidad permitiendo, por ejemplo, un modo de aplicación similar al dual ofrecido por Weed-it Quadro.

Otros métodos de control de malas hierbas en desarrollo

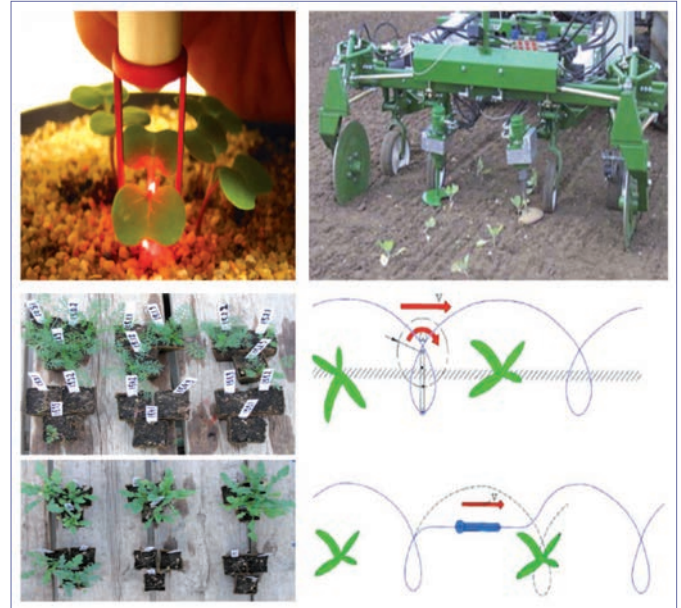
Los métodos alternativos al control químico son fundamentalmente físicos, es decir, algún tipo de escarda basada bien en tratamientos mecánicos o térmicos (**figura 6**). Los procedimientos mecánicos más avanzados son aquellos que permiten la escarda en el espacio que se denomina “close to crop”, es decir, junto al cultivo (más o menos a un círculo de unos 10-15 cm alrededor de la planta). En cambio, los tratamientos térmicos tienen como objetivo provocar un pulso de calor que eleve puntualmente la temperatura de la mala hierba de manera que se desnaturalicen las proteínas de la planta a tratar. Este método, no mata instantáneamente, y a veces no mata siquiera a largo plazo,

pero sí debilita la mala hierba de manera que no resulte una competencia con el cultivo por lo que deja de ser considerada como tal. Para más información sobre algunos tratamientos térmicos experimentales véase nuestro artículo previo publicado en el número 319 de *Vida Rural* (MG Izard y colaboradores, 2010). También los tratamientos físicos, idealmente, pueden complementarse con sistemas de percepción que no sólo detecten la presencia de la mala hierba, sino que la clasifiquen (genero, especie y subespecie) para actuar de acuerdo a las recomendaciones de los malherbólogos. Dado que el momento ideal para realizar el tratamiento es el primer estadio, los sistemas de percepción a nivel del suelo deben ser de muy alta resolución (mm).

A modo de conclusión

La malherbología es una ciencia imprescindible en el contexto de la agricultura de precisión porque aporta conocimientos clave en relación a la relevancia de las malas hierbas a tratar: la necesidad o no de su eliminación y el sistema de propagación que afecta al procedimiento de erradicación, entre otros.

Figura 6 Sistemas de control de malas hierbas en desarrollo: laser térmico a la izquierda y cuchillo de trayectoria cicloide a la derecha. Fuente: Hans Griepentrog, comunicación personal.



La resistencia de las malas hierbas a herbicidas es una realidad muy acuciante de la que la Unión Europea se hace eco. En este sentido los herbicidas de amplio espectro son referenciados como los de mayor toxicidad potencial para animales, lo que avala su paulatina eliminación.

La malherbología de precisión permitirá además establecer pautas de actuación diferencial a nivel subparcelario según modificaciones en las pautas de manejo (rotación, siembra directa, cultivo ecológico), así como abordar la amenaza de nuevas especies invasoras. Para ello, la malherbología ha de tomar en consideración el estudio de los bancos de semillas de malas hierbas, como fuente de predicción de futuras infestaciones. ■

NOTA DE LAS AUTORAS

¹ <http://semh.net/grupos-de-trabajo/cprh/>

BIBLIOGRAFÍA

Se puede solicitar a los autores en la dirección: pilar.barreiro@upm.es