

# Resolviendo el problema del jopo de las leguminosas con variedades resistentes

Los programas de mejora han tenido éxito en el desarrollo de habas y guisantes resistentes

El cultivo de leguminosas se ve gravemente afectado en toda la cuenca mediterránea por la proliferación de jopo. La especie de jopo más extendida es *Orobanche crenata*, pero otras especies como *O. minor*, *O. foetida* y *O. aegyptiaca* pueden ser importantes en ciertas zonas. En este artículo se analizan las distintas medidas de control de esta especie en el cultivo de las leguminosas.

Los ataques de *O. crenata* en leguminosas no son nuevos, autores de la antigua Roma ya los describieron hace siglos. Desgraciadamente la situación real es que, en lugar de controlarse, el jopo se está extendiendo fuera de la cuenca mediterránea a nuevas zonas que se consideraban libres de infestación, subiendo al norte de Europa, bajando por el sur de África y hacia el este de Asia, lo que representa una situación que podría agravarse con el cambio climático.

El aspecto más relevante de la biología del jopo es que es una planta que ha evolucionado para alimentarse de otras plantas, perdiendo así su capacidad fo-

Diego Rubiales, E. Barilli, M.J. Cobos, A.M. Villegas.

Instituto Agricultura Sostenible, CSIC.



Ejemplo de guisante con jopo adherido a las raíces.

tosintética. Como planta que es, el jopo puede considerarse una mala hierba en cuanto a su reproducción, dispersión de semillas y control químico con herbicidas. Sin embargo, a diferencia de las malas hierbas comunes, el daño del jopo no se debe a la competencia por la luz y el agua del suelo, sino al establecimiento directo de una interacción permanente con las raíces de las plantas hospedantes, de las que se alimenta y que alteran su fisiología. Por lo tanto, el jopo es una enfermedad y puede abordarse desde una perspectiva fitopatológica. La planta infectada puede defenderse de la infección, de forma similar a como se defiende de infecciones con otros patógenos como hongos, bacterias o virus. Por lo tanto, los mejoradores pueden desarrollar variedades más resistentes a la infección del jopo, de forma similar a como desarrollamos variedades resistentes a hongos, bacterias o virus.

## Estrategias de control

El control del jopo es muy complicado por varios motivos. Uno es su amplia gama de huéspedes, que en el caso de *O. crenata* incluye a la mayoría de las leguminosas, así como cultivos como la zanahoria, la lechuga, el geranio o el apio. Otra dificultad para su control radica en que la infección se produce bajo tierra y no se detecta hasta que el jopo emerge del suelo, momento en el que la mayor parte del daño ya está causado y es demasiado tarde para intentar cualquier medida de control. Además, una sola planta puede producir una gran cantidad de semillas con una gran capacidad de supervivencia en el suelo, germinando solo al ser estimuladas por señales emitidas por las plantas hospedantes. Estas semillas pueden dispersarse por el viento a corta distancia por lo que su distribución suele ser aglomerada en rodales. Sin embargo, pueden propagarse a mayores distancias por el estiércol de los animales que se alimentan de ellos y, so-



Campo de guisantes atacado por jopo.

bre todo, por la acción humana, ya sea por el movimiento de maquinaria contaminada entre explotaciones agrícolas o a distancias aún mayores mediante el comercio de lotes de semillas de cultivos que contienen residuos de tierra y semillas de jopo. Por lo tanto, las medidas de saneamiento, la desinfección de la maquinaria y de la semilla de siembra son esenciales para prevenir la expansión a nuevas zonas.

El control del jopo se ha intentado siguiendo diversas estrategias, abarcando desde prácticas agronómicas hasta control biológico y han dado lugar a importantes descubrimientos científicos; sin embargo, su aplicación comercial ha sido limitada, ya que solo han proporcionado una protección parcial o simplemente no son económicamente viables para cultivos de bajo insumo, como la mayoría de las leguminosas que analizamos. En la práctica, las únicas medidas que han tenido alguna aplicación comercial para las leguminosas, así como para la mayoría de

los cultivos extensivos, han sido las estrategias de control químico con herbicidas y el uso de variedades resistentes.

## Prácticas agronómicas

Empezando por las prácticas agronómicas, la primera medida que siempre se menciona es la eliminación manual de los jopos emergidos, lo que requiere mucha mano de obra y solo es útil cuando las infestaciones aún son leves. La segunda práctica más recomendada es retrasar la fecha de siembra, lo cual puede reducir la infección, pero que en sistemas de cultivo de secano en climas mediterráneos se asocia con una reducción del potencial productivo al no aprovechar las lluvias invernales. Otras prácticas recomendadas son el no laboreo para reducir la incorporación de semillas al suelo, o, por el contrario, arar muy profundamente para sembrar las semillas a bastante profundidad. La fertilización del suelo puede contribuir al control del jopo, ya que las infestaciones

son más graves en suelos pobres. Esto es debido a que, en condiciones de escasez de nutrientes, en particular de P, los cultivos exudan más estrigolactonas para favorecer la micorrización, lo que colateralmente a su vez favorece al jopo. Esto se reduce con la fertilización. Por otro lado, la urea y el amonio pueden tener un efecto tóxico sobre las semillas y las plantas de jopo. Otra alternativa es el cultivo “trampa” de especies altamente susceptibles, que se infectan y destruyen antes de que el jopo produzca semillas, ya sea incorporándolos al suelo como abono verde o utilizándolos para ensilado. Los cultivos mixtos (intercropping) con ciertas especies como la alholva, la avena o el trébol de Alejandría pueden reducir la infección por jopo en leguminosas. Sin embargo, es necesario ajustar las prácticas de cultivo para que puedan ser adoptadas por los agricultores. El efecto alelopático de una serie de cultivos sobre el jopo puede explotarse no solo en cultivos mixtos, sino también en rotaciones. Así, se han descrito cultivos que pueden inducir la germinación de semillas de jopo sin infectarse, con potencial como otra modalidad de “cultivos trampa” que reducen el banco de semillas en el suelo. El principio es el mismo que el de la “germinación suicida” mediante la aplicación de estimulantes de germinación al suelo. La base teórica es brillante y, en ambos casos, se basa en la germinación de semillas de jopo que luego mueren al no encontrar raíces de un cultivo huésped para infectar, ya sea con cultivos que las estimulan, pero no están infectados o mediante la aplicación directa de los estimulantes de germinación al suelo en ausencia de cultivos susceptibles. Sin embargo, en ambos casos la reducción no es completa, por lo que se necesitarían varios ciclos de cultivo para un control efectivo. En el caso de la aplicación directa de estimulantes sintéticos de la germinación al suelo, existe la dificultad añadida de encontrar un método eficaz de incorpora-



Variedades de guisante resistente rodeada por dos susceptibles.

ción, así como de su persistencia y coste.

### Control biológico

Dentro del control biológico, se han realizado esfuerzos para promover el uso de diversos insectos, como *Phytomyza orobanchia*, específico de *Orobanche*, cuyas larvas pupan dentro de cápsulas de jopo y destruyen un gran número de semillas. Otros tipos de agentes de biocontrol ampliamente estudiados son una serie de hongos y bacterias que han mostrado ciertos niveles de control en estudios en macetas bajo condiciones controladas, pero aún no se han dado resultados concluyentes de estudios de campo, lo que destaca sobre todo la dificultad de encontrar un método viable de aplicación y persistencia. También se ha propuesto el uso de una serie de metabolitos naturales producidos por hongos o plantas, o incluso aminoácidos y reguladores del crecimiento como el uniconazol que han demostrado un efecto en el laboratorio. Sin embargo, es necesario optimizar el método de extracción o síntesis en el caso de metabolitos, así como la incorporación y persistencia en el campo para todos ellos para que sean aplicables.

Se ha propuesto la activación de la resistencia sistémica adquirida mediante la aplicación de ácido salicílico o benzotiazol. Los simbioses como las micorrizas y los rizobios también pueden tener un efecto protector, ya que su colonización afecta los exudados radiculares o activando la resistencia. Sin embargo, el efecto,

aunque significativo, es pequeño. Por lo tanto, debemos concluir que, aunque el control biológico del jopo sigue siendo muy prometedor, aún no ha resultado en una aplicación comercial. Alternativamente, podemos prever el biocontrol mediante el uso de jopo para alimentos o en las industrias farmacéutica y cosmética.

### Aplicación de herbicidas

Dado que el jopo es una planta, puede controlarse con varios herbicidas. La desinfección química del suelo puede ser muy efectiva, pero al igual que la desinfección física (es decir, la solarización), solo se recomienda para áreas pequeñas. Además, como la mayoría de las leguminosas son cultivos de secano con bajos insumos y la infección se produce en las raíces, el número de herbicidas que se pueden utilizar se reduce, excluyendo prácticamente los herbicidas de contacto que requerirían riego para incorporarse a las raíces. Esto ha limitado los herbicidas utilizados a los sistémicos, incorporados en las hojas y translocados a las raíces. El más recomendado ha sido el glifosato en habas, que, aun así, encuentra problemas para su amplia adopción por los agricultores. El glifosato también es tóxico para los cultivos, por lo que es necesaria la aplicación repetida de una dosis muy baja en las etapas iniciales de la infección; por lo tanto, encontrar un equilibrio entre el daño al cultivo y el control de la infección es difícil. Esto se ha complicado aún más

en otros cultivos, como los guisantes, que son más sensibles al glifosato. Se han propuesto imidazolinonas, incluso en el tratamiento de semillas. Sin embargo, el control es solo parcial y los tratamientos deben repetirse. El control podría mejorarse incrementando la tolerancia de los cultivos a estos herbicidas, por lo que podrían aplicarse dosis más altas. Se ha identificado variación natural en la tolerancia a herbicidas en varias leguminosas, incluyendo la tolerancia a imazetapir y metribuzina en habas y lentejas. Por otro lado, se ha explotado eficazmente la inducción de mutantes resistentes a imidazolinonas, y se podría explotar el uso de técnicas transgénicas, aunque esto último no está disponible aún en leguminosas para el manejo del jopo, y de todos modos, daría problemas de aceptación en la Unión Europea.

## Desarrollo de variedades resistentes

Todo esto hace que el desarrollo de variedades resistentes sea la medida más deseable. Sin embargo, por un lado, la resistencia genética es difícil de identificar y requiere largos procesos de mejora, y por otro, la resistencia genética no suele proporcionar una protección completa; por lo tanto, es recomendable incorporar la resistencia en paquetes de manejo integrado, lo cual, además de complementar la protección, prolongaría la durabilidad de la resistencia al mantener bajas las poblaciones del patógeno y, por lo tanto, reduciría su capacidad de evolución. Se ha identificado resistencia monogénica en girasol contra *Orobanche cumana* y en caupí contra *Striga gesnerioides*, pero no en ningún cultivo de leguminosas contra jopo.

Esto presenta ventajas y problemas similares a los encontrados en la mejora genética por resistencia a cualquier tipo de enfermedad; aunque la resistencia monogénica simplifica el progreso de la mejora,



Variedad de haba resistente comparada con una susceptible.

pueden surgir nuevas razas del patógeno que rompen estas resistencias. La resistencia identificada y usada en la mejora de leguminosas suele ser incompleta y de base poligénica, debido a lo cual el progreso ha sido más lento, pero quizás también debido a esto, no ha habido una alta presión de selección sobre el patógeno y hasta ahora no se han descrito razas de *O. crenata*, *O. minor*, *O. foetida* o *O. aegyptiaca*.

El riesgo de la aparición de nuevas razas depende no solo de la base genética de la resistencia sino también de la forma de reproducción y diseminación de los patógenos. Así, se sabe que el mayor riesgo se da en organismos que combinan reproducción sexual (nuevas combinaciones genéticas) y reproducción asexual (fijación de estas nuevas combinaciones exitosas), lo que puede implicar varios ciclos completos de reproducción en una temporada

reproductiva.

En el caso del jopo, el riesgo es moderado ya que esta planta se reproduce sexualmente, con un solo ciclo por año, y excepto casos accidentales de movimiento de semillas por acción humana a largas distancias, la dispersión natural de las semillas es de unos pocos metros. Así, en el caso de *O. cumana*/girasol, aunque han aparecido nuevas razas, esto no ocurre tan rápidamente como en el caso de royas y oídios, pudiendo tardar 2-3 décadas en vez de 2-3 años. Hasta la fecha no se han descrito razas en ninguna de las especies de jopo que infectan a las leguminosas (*O. crenata*, *O. minor*, *O. foetida* ni *O. aegyptiaca*). Una posible explicación es que, dado que no se ha identificado ni explotado a gran escala la resistencia monogénica con expresión completa sino que se han usado diferentes niveles de resistencia incompleta, el patógeno no ha sufrido



Línea avanzada de veza resistente comparada con otra susceptible.

esta presión de selección y, en cualquier caso, al tratarse generalmente de cultivos minoritarios que ocupan pequeñas extensiones y rara vez se repiten en la rotación de fincas, aunque se hubieran desarrollado poblaciones más virulentas, estas no se han establecido, o al menos no hay evidencia de establecimiento.

La base de cualquier programa de mejora genética es la diversidad genética, sobre la que se puede actuar mediante diversas herramientas hasta obtener variedades resistentes que, además, sean agrónomicamente atractivas y de buena calidad. Si no se dispone de la diversidad genética necesaria, se puede generar mediante mutagénesis clásica o dirigida o mediante nuevas herramientas biotecnológicas. Sin embargo, puede ser suficiente explorar y explotar la variabilidad natural existente dentro del cultivo o especies relacionadas. Por lo tanto, existe un gran número de colecciones de germoplasma de leguminosas insuficientemente caracterizadas donde podríamos encontrar la resistencia deseada. Para ello, un factor limitante es la disponibilidad de métodos de evaluación que combinen la requerida fiabilidad con un coste razonable. Se están empezando a usar imágenes hiperespectrales para la detección temprana de la infección por jopo y así facilitar la aplicación precisa de herbicidas en términos

de tiempo y espacio. Asimismo, se intenta automatizar el fenotipado de imágenes en las respuestas de las plántulas en los rizotrones, lo cual aún resulta demasiado laborioso y requiere mucho tiempo. Como resultado, las fuentes de resistencia al jopo son limitadas y están mal caracterizadas.

A pesar de que la genética moderna nació con los estudios de Mendel en guisante y, de manera similar, el haba jugó un papel importante en el inicio de la citogenética, el progreso en el conocimiento de estos cultivos ha sido mucho más lento que en otros cultivos, como los cereales. Afortunadamente, en los últimos años hemos estado experimentando avances espectaculares en técnicas genómicas y fenómicas en leguminosas, abriendo enormes oportunidades para su aplicación en la mejora genética. Así, en tan solo unos años, se dispone de genomas anotados de guisantes, habas, lentejas, vezas y la mayoría de las leguminosas. Aunque no se ha logrado un progreso similar en la secuenciación del genoma de *O. crenata*, se están logrando avances espectaculares en la información de secuencias de otras especies, lo que ayudará a comprender la virulencia de los parásitos y los mecanismos de resistencia del huésped. La integración de todas estas nuevas técnicas acelerará el proceso de desarrollo

de variedades resistentes a jopo. Mientras tanto, aunque el progreso en la mejora de la resistencia al jopo ha sido lento, los programas de mejora han tenido éxito en el desarrollo de variedades de habas y guisantes resistentes, y hay materiales avanzados muy prometedores en otras leguminosas como lentejas y vezas. Así, en Córdoba hemos no solo identificado y caracterizado la resistencia a jopo (*O. crenata* y otras spp.) en guisante, habas, vezas, lentejas, alborjones y almortas, sino que hemos avanzado en el desarrollo y registro de variedades de habas (Joya, Omeya, Borjana, Habanita) y guisantes (Titana, Jarana, Forana, Chicana, Antojo, Pichita, Chiruco). Asimismo, hemos desarrollado líneas avanzadas resistentes de las otras leguminosas, aunque aún no se han enviado para ser registradas. ■

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos: PID2023-146215OB-I00 (MICIU/AEI /10.13039/501100011033) y los proyectos europeos Horizon Europe BELIS (101081878), COUSIN (101135314) e IPMorama (101135348)

#### BIBLIOGRAFÍA

- Fernández-Aparicio, M., J.C. Sillero, A. Pérez-de-Luque & D. Rubiales, 2008. Identification of sources of resistance to crenate broomrape (*Orobanche crenata*) in Spanish lentil (*Lens culinaris*) germplasm. *Weed Research* 48: 85-94.
- Fernández-Aparicio, M., J.C. Sillero & D. Rubiales, 2008. Resistance to broomrape species (*Orobanche* spp.) in common vetch (*Vicia sativa* L.). *Crop Protection* 28: 7-12.
- Rubiales, D., Flores, F., Emeran, A.A., Kharrat, M., Amri, M., Rojas-Molina, M.M. & Sillero, J.C., 2014. Identification and multi-environment validation of resistance against broomrapes (*Orobanche crenata* and *O. foetida*) in faba bean (*Vicia faba*). *Field Crops Research* 166: 58-65.
- Rubiales D, Rojas-Molina MM, Sillero JC, 2016. Characterization resistance mechanisms in faba bean (*Vicia faba*) against broomrape species (*Orobanche* and *Phelipanche* spp.). *Frontiers in Plant Science* 7: 1747.
- Rubiales D, 2018. Can we breed for durable resistance to broomrapes?. *Phytopathologia Mediterranea* 57 (1): 170-185.
- Rubiales D, Osuna-Caballero S, González-Bernal MJ, Cobos MJ, Flores F, 2021. Pea breeding lines adapted to autumn sowings in broomrape prone Mediterranean environments. *Agronomy* 11(4): 769.
- Rubiales D, Moral A, Flores F, 2021. Heat waves and broomrape are the major constraints for lentil cultivation in Southern Spain. *Agronomy*, 11(9): 1871.
- Rubiales D, Moral A, Flores F, 2022. Agronomic performance of broomrape resistant and susceptible faba bean accession. *Agronomy* 12(6): 1421
- Rubiales D, 2023. Managing Root Parasitic Weeds to Facilitate Legume Reintroduction into Mediterranean Rain-Fed Farming Systems. *Soil Systems* 7(4): 99.