Ensayo expositivo

Alpiste silvestre resistente a herbicidas: alerta temprana para el campo mexicano

Herbicide-resistant wild canarygrass: early warning for the Mexican field

Sarahyt González Figueroa¹, Víctor Montero Tavera¹,
Elizabeth Chiquito Almanza¹, José Luis Anaya López^{1*}

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío.

Autor de correspondencia:
*anaya.jose@inifap.gob.mx

Recibido:08-06-2023 Aceptado: 08-02-2024 (Artículo Arbitrado)

Resumen

Phalaris minor y *P. paradoxa* son dos especies de maleza conocidas en México de manera indistinta como alpiste silvestre o alpistillo, en inglés se les denomina “littleseed canarygrass” y “hood canarygrass”, respectivamente. Estas especies son un problema común en los campos de trigo y pueden encontrarse tanto de forma individual como mezcladas. Su presencia puede ocasionar una pérdida de hasta 50 % en la producción. A pesar de su importancia, se ha prestado poca atención al estudio de esta maleza. La mayoría de los esfuerzos se han dirigido al control mediante herbicidas específicos. Sin embargo, la identificación de genotipos con resistencia cruzada en las principales zonas de producción de trigo en México justifica hacer una revisión del tema para conocer el estatus de la resistencia a herbicidas y establecer la magnitud de los daños en el rendimiento debidos a estas especies. En este artículo se realizó la revisión de los mecanismos de resistencia a los herbicidas y los métodos para caracterizarla, considerando la resistencia mediada por las enzimas acetil coenzima carboxilasa (ACCase) y acetolactato sintasa (ALS). Además, se propone un enfoque integral para minimizar las pérdidas ocasionadas por esta maleza.

Palabras clave: *Phalaris minor*, *Phalaris paradoxa*, mecanismos de resistencia, manejo de maleza.

Abstract

Phalaris minor and *P. paradoxa* are two weed species known in Mexico interchangeably as “alpiste silvestre” or “alpistillo”, in English they are called “littleseed canarygrass” and “hood canarygrass”, respectively. These species are a common problem in wheat fields and can be found individually and mixed. Its presence can cause a loss of production up to 50 %. Despite its importance, little attention has been paid to the study of these weeds. Mostly, efforts have addressed its control by using specific herbicides. Nevertheless, the identification of genotypes with cross-resistance in the main wheat production areas in Mexico justifies a review on the subject to know the status of the resistance to herbicides and the magnitude of the damage to the yield due to these weeds. In this article a review of the mechanisms of resistance to herbicides and the methods to characterize them was carried out, considering the resistance mediated by the enzymes acetyl coenzyme carboxylase (ACCase) and acetolactate synthase (ALS). Furthermore, a comprehensive approach is proposed to minimize the losses caused by these weeds.

Keywords: *Phalaris minor*, *Phalaris paradoxa*, resistance mechanisms, weed management.

Introducción

En las regiones del Bajío y el Noroeste de México la maleza es un factor que limita la producción, debido a que compete con el cultivo por nutrientes, espacio, agua y luz, afectando además la calidad del grano con las impurezas que genera durante la cosecha.

Las pérdidas de rendimiento ocasionadas por la maleza dependen de factores como el tiempo de emergencia, densidad y tipo de maleza, el cultivo y fertilidad del suelo, entre otros. En el cultivo de trigo

se estima que la maleza puede reducir hasta 60 % el rendimiento (Medina-Cázares y Rosales-Robles, 2014).

Phalaris son plantas anuales de invierno que se propagan por semilla y afectan a los cereales cultivados en el ciclo otoño-invierno (O-I). Se trata de una maleza de hoja angosta que daña el cultivo de trigo en muchas partes del mundo (Gharde et al., 2023; Hashim et al., 2019; Abbas et al., 2017). Estimaciones

específicas realizadas en la India indican que las pérdidas en el rendimiento de trigo asociadas a infestaciones de *P. paradoxa* y *P. minor* pueden llegar a 40 y 50 %, respectivamente (Chaudhary et al., 2021; Soni et al., 2023).

En México, 97 % del trigo, 50 % de la cebada y 20 % de la avena se producen durante el ciclo O-I en las regiones del Bajío y del Noroeste (SIAP, 2023). Además de alpistillo, en el cultivo de cereales de invierno en el Bajío se han reportado alrededor de 22 especies de maleza de hoja ancha, y otras ocho de hoja angosta persistentes (Medina-Cázares y Rosales-Robles, 2014).

El control del alpistillo se realiza casi exclusivamente en post-emergencia antes de la siembra o en emergencia del cultivo; para ello se usan herbicidas no selectivos como paraquat o glifosato, que eliminan tanto maleza de hoja ancha como angosta, y herbicidas selectivos para maleza de hoja angosta como tralkoxidim, fenoxaprop-p-etil, o clodinafop, que son inhibidores de Acetil Coenzima Carboxilasa (ACCase), y flucarbazone-sodium, iodosulfurón-metil-sodio, metsulfurón-metil, pinoxaden o pyroxsulam que pertenecen a los inhibidores de la enzima Acetolactato Sintetasa (ALS) (Medina-Cázares y Rosales-Robles, 2014). La dependencia de agroquímicos para controlar a la maleza, el uso de los mismos herbicidas durante varios ciclos de siembra, la ausencia de control cultural y la poca o nula rotación de cultivos, generan una alta presión de selección en favor de biotipos resistentes, cuya diseminación se incrementa con el uso de maquinaria compartida. La presencia e incremento de maleza resistente a los herbicidas es un problema multifactorial que incluye desde una deficiente regulación en el uso y comercialización de los herbicidas, hasta el desconocimiento de la distribución de las especies resistentes y los mecanismos que les confieren resistencia. Esta información es necesaria para desarrollar estrategias que mitiguen el incremento y evolución de maleza resistente.

A nivel mundial, la resistencia a herbicidas inhibidores de ALS y ACCase ocupan el primero y cuarto lugar con 169 y 50 reportes, respectivamente (Heap, 2022). Actualmente, en 10 países, incluido México, se han reportado biotipos de *P. minor* y *P. paradoxa* resistentes a herbicidas inhibidores de ACCase y de ALS (Gherekhloo et al., 2021). En la región del Bajío mexi-

cano se han presentado serios problemas de maleza asociada al cultivo de trigo debido a altas infestaciones de poblaciones de alpistillo y avena silvestre (*Avena fatua* L.) resistentes a los herbicidas usados para su control (García-Franco et al., 2014; Torres-García et al., 2015; 2018a, b; Tafoya-Razo et al., 2022).

El objetivo del presente ensayo es describir el estado de la resistencia de *Phalaris* spp. a herbicidas, e identificar la problemática y necesidades de investigación que contribuyan al entendimiento de los mecanismos de resistencia y al control de esta maleza, con el fin de alertar acerca del riesgo potencial para el cultivo de los cereales de invierno en México.

Problemática de la maleza resistente a herbicidas en el cultivo de cereales

La Sociedad Americana de la Ciencia de la Maleza (Heap, 2016) define la resistencia a herbicidas como la capacidad heredable de una planta para sobrevivir y reproducirse después de exponerse a una dosis de herbicida normalmente letal para el tipo silvestre. Bajo presión de selección continua, es decir, el uso constante de herbicidas con el mismo mecanismo de acción, las plantas resistentes se incrementan con el tiempo (Powles and Yu, 2010). También los factores biológicos y genéticos de las especies de maleza, las propiedades de los herbicidas y las prácticas agronómicas contribuyen a la evolución y propagación de la resistencia (Powles and Yu, 2010). Se ha descrito la resistencia de *P. minor*, *P. paradoxa*, y *P. brachystachys* a herbicidas inhibidores del fotosistema II (PS-II), ACCase y ALS (Gherekhloo et al., 2021; Heap, 2022) y se estima que en la India cuatro millones de hectáreas de la región norte se infestaron con *P. minor* resistente (Peterson et al., 2018). En ese país se han identificado biotipos de *P. minor* con resistencia múltiple a herbicidas inhibidores del PS-II, ACCase y ALS (Chhokar and Sharma, 2008).

En México, la presencia de maleza resistente a herbicidas se documentó por primera vez en 1996 en el cultivo de trigo en la región del Bajío (Guanajuato, Jalisco, y Michoacán), donde se identificaron poblaciones de *P. paradoxa* y *P. minor* con resistencia a herbicidas inhibidores de ACCase. Dos años después se detectaron poblaciones de *A. fatua* con resistencia a herbicidas con el mismo mecanismo de acción en Jalisco y Baja California (Heap, 2022; Chaudhary et al., 2021). Actualmente en la región Noroeste, y parti-

cularmente en el Bajío, el control de la maleza en el cultivo de trigo se dificulta, en parte debido a las altas infestaciones de *A. fatua*, *P. minor* y *P. paradoxa* resistentes a herbicidas. Aunque en México no hay casos de resistencia múltiple en estas especies, es decir resistencia a herbicidas con diferente mecanismo de acción, en 2018 se identificaron en el Bajío biotipos de *A. fatua* resistentes a herbicidas inhibidores de ACCasa y ALS (Torres-García et al., 2018b). Este hallazgo es muy importante y debe tomarse en cuenta para implementar acciones preventivas y de investigación. Dado que *A. fatua* y *Phalaris* spp. comparten nichos ecológicos, se abre la posibilidad de que el manejo tradicional para su control genere poblaciones de *Phalaris* spp. con este tipo de resistencia, lo cual podría tener impacto disminuyendo el rendimiento del trigo y otros cereales de invierno.

Determinar la magnitud del problema de maleza resistente a herbicidas es difícil debido a múltiples factores técnicos, normativos, de infraestructura y de investigación. Alcántara de la Cruz et al. (2021) hicieron una revisión crítica sobre el impacto potencial de la prohibición del uso del glifosato en la agricultura en México, y de la investigación científica de maleza en el país, sin incluir al género *Phalaris*, la cual se resume a continuación.

“Desafortunadamente la resistencia a herbicidas es un asunto de baja importancia para el sector agrícola mexicano, debido principalmente a la falta de trabajos de prospección y caracterización en campo, y a que la información en relación al manejo integrado de maleza y al uso adecuado de los herbicidas es escasa y con poca difusión. Además, la comunidad científica especializada en esta disciplina es pequeña, el financiamiento público o privado es limitado y no existen laboratorios dedicados al estudio de los mecanismos de resistencia a herbicidas o a la dinámica y destino ambiental de los mismos. En la mayoría de los casos la resistencia se determina con ensayos de dosis-respuesta, por lo que se desconocen los mecanismos subyacentes. Por otro lado, la carencia de una fuente oficial mexicana que registre la maleza resistente a los herbicidas presentes en el país dificulta precisar la magnitud del problema y orientar trabajos de investigación y control”.

A pesar de que en los anuarios de la Sociedad Mexicana de la Ciencia de la Maleza (SOMECIMA, 2023) hay más de 30 reportes de maleza resistente a herbicidas, en la Base Internacional de Datos de Maleza Resistente a Herbicidas solo se han reportado 11 especies (Heap, 2022). Además, en México no se aplica la clasificación de los herbicidas por su modo o sitio de acción, ya que las etiquetas de los herbicidas no muestran esta información (CEDRSSA, 2020). Conocer el modo o sitio de acción de los herbicidas es importante, pues permite elegir herbicidas adecuados en función a su espectro de control; usar aditivos o adyuvantes para mejorar su acción, diagnosticar el daño a los cultivos, y usar herbicidas con distintos modos de acción para prevenir la selección e incremento de maleza resistente.

Clasificación de herbicidas y de los mecanismos de resistencia

La capacidad de una maleza para sobrevivir a un herbicida puede estar conferida por uno o varios mecanismos, y estos brindar resistencia a uno o varios herbicidas. Los herbicidas que actúan inhibiendo a la ACCasa se clasifican por su modo de acción en “inhibidores de la síntesis de lípidos”, y por su sitio de acción en “inhibidores de ACCasa”, mientras que los que actúan sobre la Acetolactato Sintetasa en “inhibidores de la síntesis de amino ácidos” y en “inhibidores de ALS”, respectivamente. Así, un biotipo de *Phalaris* resistente a distintos herbicidas inhibidores de ACCasa tendría resistencia cruzada, y si además es resistente a herbicidas inhibidores de ALS tendría resistencia múltiple.

En función al mecanismo, la resistencia a herbicidas se divide en dos grandes grupos: la resistencia relacionada con el sitio de acción (TSR) y la resistencia no relacionada con el sitio de acción (NTSR) (Torra et al., 2021; Torra y Alcántara-De la Cruz, 2022). La resistencia de las plantas con un mecanismo TSR se debe a cualquier alteración genética capaz de cambiar la interacción entre la proteína blanco codificada y el herbicida, de modo que este no puede interferir lo suficiente para causar la muerte de la planta. En este mecanismo se incluyen mutaciones en la secuencia del gen que codifica a la proteína blanco del herbicida, lo que provoca la pérdida de afinidad entre ambos dando lugar a la resistencia (Beckie y Tardif, 2012). También incluye la sobreexpresión de las pro-

teínas blanco y la ganancia de copias extras del gen que las codifica, lo que resulta en el incremento de la cantidad de proteína blanco y por ende el número de sitios de unión, limitando el daño del herbicida (Laforest et al., 2017). Los mecanismos TSR generalmente son monogénicos, es decir que la resistencia es conferida por un solo gen (Gaines et al., 2020).

Los mecanismos NTSR no involucran a la proteína objetivo y pueden reducir la cantidad de herbicida que llega al sitio de acción lo suficiente como para que las plantas sobrevivan. La resistencia NTSR puede ser resultado de la alteración de uno o más procesos fisiológicos, a menudo es parte de la respuesta al estrés de la planta que evoluciona con el tiempo, y puede conferir resistencia múltiple (Jugulam y Shyam, 2019). En esta categoría se incluyen fenómenos como la absorción, translocación, secuestro y metabolismo de los herbicidas (Délye, 2013; Délye et al., 2013a; Ghanizadeh y Harrington, 2017). Se han descrito cuatro familias de enzimas involucradas en la resistencia a herbicidas con un mecanismo NTSR: citocromo P450 monooxigenasa (CYP450), glutatión-S-transferasa (GSTs), glicosiltransferasa (GTs), y transportadores ABC. La familia de las enzimas CYP450, GST, y GT están involucradas en la modificación bioquímica de los herbicidas a través del metabolismo, mientras que los transportadores ABC median la resistencia al compartimentar los herbicidas y sus metabolitos (Gherekhloo et al., 2021). La resistencia NTSR generalmente es regulada por varios genes, es decir que es poligénica, y por lo tanto su elucidación es más compleja que la resistencia mediada por un mecanismo TSR (Torra et al., 2021).

Métodos para caracterizar la resistencia a herbicidas

Para confirmar la evolución de la resistencia de la maleza a los herbicidas se han desarrollado varios métodos que incluyen pruebas *in vivo* usando plantas completas, el cultivo de semillas o polen en cajas Petri, ensayos enzimáticos *in vitro*, ensayos con radioisótopos, plataformas analíticas como cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), cromatografía líquida con espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS), y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), así como técnicas moleculares e hiperespectrales (Dayan et al., 2015; Nandula y Vencill, 2015; Nugent et al., 2018).

Los métodos basados en ensayos de enzimas y metabolismo no han sido ampliamente adoptados porque requieren de equipo y personal especializado, no cubren todos los posibles mecanismos de resistencia y son propensos a la predicción de falsos negativos (Kaundun, 2014). Otra opción es el uso de técnicas de biología molecular, como el qPCR, con el que se puede cuantificar el número de copias de los genes que codifican las proteínas blanco de los herbicidas, o los marcadores moleculares con los que se detectan las mutaciones asociadas con la resistencia (Délye et al., 2015). Los resultados se obtienen en menos de dos semanas (MAPAQ, 2021), lo que permite a los agricultores tomar decisiones antes de establecer el cultivo. Los marcadores moleculares permiten identificar biotipos resistentes a los herbicidas, determinar su distribución (Tafoya-Razo et al., 2022; Kuester et al., 2015; Délye et al., 2010, 2013b) y estudiar la transmisión y el flujo de la resistencia (Maity et al., 2022; Beckie et al., 2019); sin embargo, este tipo de pruebas están más orientadas a la investigación. Para su implementación se requiere identificar a todas y cada una de las mutaciones asociadas con la resistencia, lo que, desde un punto de vista práctico, resulta tardado y costoso. Además, los resultados son válidos para un herbicida, especie de maleza y región de cultivo específicos (Kaundun, 2021).

Estudios de resistencia a herbicidas en *Phalaris* spp.

Para identificar la resistencia de *P. paradoxa* y *P. minor* a herbicidas se han utilizado principalmente ensayos dosis-respuesta y pruebas moleculares y metabólicas. En México los herbicidas más usados para controlar al alpiñillo son los inhibidores de ACCasa y los inhibidores de ALS. Esta práctica ha favorecido el incremento de biotipos resistentes a los herbicidas con estos sitios de acción. La enzima ALS cataliza el primer paso común para la biosíntesis de los aminoácidos de cadena ramificada: leucina, valina e isoleucina. En plantas superiores, la biosíntesis de estos y otros aminoácidos esenciales se realiza en los plástidos, aunque la mayoría de los genes que codifican las enzimas necesarias, incluida ALS, son codificadas en el núcleo (Weeden, 1981). Bajo presión de selección por herbicidas, los alelos resistentes son dominantes sobre los alelos susceptibles, y aunque el grado de dominancia varía entre especies de plantas y alelos,

los alelos de ALS resistentes se seleccionan incluso cuando se encuentran en estado heterocigoto siguiendo una herencia mendeliana normal, por lo que se diseminan por polen y semilla (Tranel y Wright, 2002). Estas características podrían explicar parcialmente la alta frecuencia de resistencia a los inhibidores de ALS en relación con otros herbicidas.

La ACCasa cataliza la carboxilación de la Acetil-CoA a Malonil-CoA. Este es el primer paso obligado para la biosíntesis de los ácidos grasos y se realiza en los plástidos. Las plantas tienen dos tipos de ACCasas: las citoplásmicas y las plastídicas (Konishi y Sasaki, 1994); ambas isoformas consisten de tres dominios funcionales principales: portador de biotina carboxilo, biotina carboxilasa, y carboxilo transferasa, esta última se subdivide a su vez en las subunidades α y β (Gornicki et al., 1994). Las ACCasas tienen dos formas físicamente distintas, la homomérica y la heteromérica. La forma homomérica es la susceptible a herbicidas y es justamente la que se encuentra en las gramíneas, lo cual explica su susceptibilidad (Kaundun, 2014; Sasaki y Nagano, 2004).

La resistencia de *P. minor* y *P. paradoxa* a herbicidas inhibidores de ACCasa, de ALS y de PS-II se han reportado en 10 países, incluido México. De los 20 reportes disponibles, 13 corresponden a resistencia a herbicidas inhibidores de ACCasa, uno a inhibidores de ALS, dos a inhibidores de PS-II, tres a resistencia múltiple a inhibidores de ACCasa y de ALS, y uno a resistencia múltiple a los tres tipos de herbicidas (Beckie y Tardif, 2012; Gherekhloo et al., 2021). También se han documentado en ocho especies de maleza, incluidas *A. fatua*, *P. paradoxa* y *P. minor*, 11 cambios de aminoácidos localizados en siete posiciones del extremo carboxilo de la ACCasa asociados con la resistencia a herbicidas (Beckie y Tardif, 2012; Torres-García et al., 2018a); así como 20 cambios en ocho sitios de la ALS en 48 especies, entre las que se incluye *A. fatua*, pero no *P. minor* ni *P. paradoxa* (Beckie y Tardif, 2012; Gherekhloo et al., 2021).

En México, los primeros estudios sobre los mecanismos de resistencia a herbicidas de maleza de hoja angosta se realizaron con biotipos de *A. fatua* (Cruz-Hipólito et al., 2011), *P. paradoxa* (Cruz-Hipólito et al., 2012) y *P. minor* (Cruz-Hipólito et al., 2015) colectados en cultivos de trigo en el Bajío. Estos estudios concluyeron que la resistencia cruzada a herbicidas inhibi-

dores de ACCasa se debió a un mecanismo TSR. Posteriormente, este mismo mecanismo de resistencia se confirmó en biotipos de *P. minor* (Torres-García et al., 2018a) y de *A. fatua* colectados en Baja California y Sonora (Tafoya-Razo et al., 2016). Estos hallazgos indican la probabilidad de que en el Noroeste de México también haya biotipos de *Phalaris* spp. resistentes a los herbicidas empleados recurrentemente en esa región.

En el Bajío se han identificado biotipos de *A. fatua* resistentes a herbicidas inhibidores de ACCasa y de ALS con mecanismos TSR y NTSR (Torres-García et al., 2018b), por lo que es probable que también existan poblaciones aún no caracterizadas de *Phalaris* spp. con este tipo de resistencia. La magnitud del problema en el Bajío es alta, pues en el caso de *A. fatua*, un estudio reciente indica que 70 % de los campos de cultivo muestreados tuvieron biotipos con resistencia cruzada a herbicidas inhibidores de ACCasa con un mecanismo TSR, y al menos cuatro patrones de expresión metabólica diferentes, por lo que se puede considerar al Bajío como un mosaico geográfico de resistencia a herbicidas (Tafoya-Razo et al., 2022). Estos antecedentes indican que se requiere realizar estudios sistematizados para determinar la distribución de biotipos de *P. minor* y *P. paradoxa* resistentes a los herbicidas, así como de los mecanismos de resistencia que poseen para desarrollar e implementar estrategias de control y manejo.

Discusión

En México, al igual que en otros países productores de cereales, la resistencia de *P. minor* y *P. paradoxa* a los herbicidas es un problema en el cultivo de cereales de invierno. Se han identificado biotipos de *P. minor* y *P. paradoxa* con resistencia cruzada a herbicidas inhibidores de ACCasa, pero no con resistencia a inhibidores de ALS; sin embargo, la alta presión de selección por el uso de herbicidas, y la presencia de biotipos de *A. fatua* con resistencia múltiple a herbicidas inhibidores de ACCasa y de ALS (Torres-García et al., 2018b), sugieren un alto riesgo de que *P. minor* y *P. paradoxa* desarrollen resistencia múltiple, como ha ocurrido en Sudáfrica, India y Australia (Gherekhloo et al., 2021), o bien que ya hay biotipos resistentes que debido a los escasos estudios realizados aún no se han caracterizado.

Para reducir el riesgo de que *P. minor* y *P. paradoxa* evolucionen y desarrollen resistencia a los herbicidas es esencial tener una mejor comprensión de la dinámica de la resistencia, detectar de manera temprana a las poblaciones resistentes, realizar supervisiones periódicas, e implementar prácticas de manejo integrado. Entre las opciones para determinar la resistencia a herbicidas de manera rápida e identificar los mecanismos de resistencia destacan dos técnicas complementarias. La primera, desarrollada por la compañía Syngenta, es la prueba Rápida de Resistencia Durante la Temporada, o RISQ por sus siglas en inglés, que usa plantas completas y cuyas principales ventajas son su bajo costo y requerimiento de infraestructura y personal capacitado, pero sobre todo la rapidez con la que se obtienen los resultados (Kaundun et al., 2011). Esta técnica ha sido probada para identificar biotipos de *P. minor* resistentes a herbicidas inhibidores de ACCasa y de ALS en India y Pakistán con buenos resultados (Kaundun, 2021), por lo que se puede validar su utilidad con *P. paradoxa*.

Detectar oportunamente a las poblaciones de *Phalaris* spp. resistentes a los herbicidas permitirá a los productores tomar mejores decisiones para su control durante la temporada de siembra y reducir el gasto y riesgo por el uso de pesticidas innecesarios, disminuyendo así su proliferación. RISQ permite detectar la resistencia a distintos herbicidas independientemente del mecanismo de resistencia. Aunque desde el punto de vista práctico esta característica es una ventaja, para implementar una estrategia de control de maleza adecuada es fundamental conocer el mecanismo que confiere la resistencia (Beckie y Harker, 2017). Por ejemplo, si el mecanismo es de tipo TSR y depende de un solo gen, la rotación de herbicidas con un modo de acción diferente podría ser suficiente para controlar a la maleza. En caso contrario, si el mecanismo es de tipo NTSR con un carácter poligénico, que confiere resistencia múltiple a herbicidas que no fueron previamente utilizados en el área, además de la rotación de herbicidas, se requiere de estrategias de manejo integrado que incluyan la rotación de cultivos, labranza mínima, calibración de equipos de aplicación, limpieza de cosechadoras, monitoreo de poblaciones de maleza y usar herbicidas preemergentes o con distinto modo de acción (Alcántara-de la Cruz, 2022).

La segunda técnica importante es el diagnóstico molecular. Este tipo de pruebas se usan en Canadá y el gobierno las hace disponibles de manera gratuita para los agricultores a través del Laboratorio de Diagnóstico y Peritaje en Sanidad Vegetal. Con ellas se identifica la resistencia a herbicidas de cinco especies de maleza y los resultados se obtienen en menos de dos semanas (MAPAQ, 2021). Para *P. minor* y *P. paradoxa* se han utilizado con éxito técnicas moleculares para detectar la resistencia a herbicidas inhibidores de ACCasa (Gherekhloo et al., 2021). La ausencia de pruebas moleculares para detectar la resistencia de estas especies a inhibidores de ALS se debe a que hasta ahora se desconoce la secuencia del gen ALS de ambas especies. Aunque las pruebas moleculares son altamente específicas, se restringen casi exclusivamente a los mecanismos TSR, por lo que son propensas a diagnosticar falsos negativos cuando el mecanismo es NTSR. México cuenta con las instalaciones, equipo y personal calificado para su implementación. Desafortunadamente, aún no es considerado como un problema prioritario y se requiere de investigación para identificar todas las mutaciones asociadas con la resistencia. Es por ello que, al igual que con las pruebas metabólicas, analíticas y radiológicas, las pruebas moleculares están más orientadas a la investigación.

Para entender mejor el patrón de resistencia de *Phalaris* spp. es necesario investigar la susceptibilidad de los biotipos resistentes a herbicidas inhibidores de ACCasa y de ALS a otras familias de herbicidas de uso común en el cultivo de trigo, especialmente en los casos donde no hay informes sobre el mecanismo de resistencia, así como secuenciar el gen ALS de *P. minor* y *P. paradoxa* para identificar a las mutaciones asociadas a la resistencia. En el mediano y largo plazo se requiere desarrollar métodos robustos que permitan identificar los varios mecanismos de resistencia y los genes involucrados.

Conclusiones

La problemática de la resistencia del alpiñillo a los herbicidas en México es un problema multifactorial cuya mitigación requiere implementar un modelo de triple hélice que involucre a la academia (investigación), los agricultores y al gobierno. Se necesita crear una fuente oficial mexicana que registre la maleza resistente a los herbicidas presente en el país, aplicar

normas para regular el etiquetado de los herbicidas, realizar trabajos de prospección y caracterización en campo en colaboración con los productores, elaborar mapas de distribución de maleza resistente para realizar un manejo específico al sitio, y particularmente, caracterizar los mecanismos de resistencia de los biotipos de *Phalaris* spp. resistentes, ya que esta información es esencial para elaborar y ejecutar programas de manejo eficientes que contribuyan a identificar, reducir y cuantificar la incidencia de resistencia y la selección negativa de resistencia cruzada o múltiple en las diferentes regiones productoras de cereales en México.

Referencias

- Abbas, T., Nadeem, M. A., Tanveer, A., Matloob, A., Farooq, N., Burgos, N., Chauhan, B. S. (2017). Confirmation of resistance in littleseed canarygrass (*Phalaris minor* Retz.) to ACCase inhibitors in central Punjab-Pakistan and alternative herbicides for its management. *Pakistan Journal of Botany*. 49(4):1501-1507.
- Alcántara de la Cruz R. (2022). Prevention, Detection and Management of Herbicide Resistance. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 26(Suplemento):17-18.
- Alcántara de la Cruz, R., Cruz Hipólito, H. E., Domínguez Valenzuela, J. A., De Prado, R. (2021). Glyphosate ban in Mexico: potential impacts on agriculture and weed management. *Pest Management Science*. 77(9):3820-3831.
- Beckie, H. J., Busi, R., Bagavathiannan, M. V., Martin, S.L. (2019). Herbicide resistance gene flow in weeds: under-estimated and under-appreciated. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 283:106566.
- Beckie, H. J., Harker, K. N. (2017). Our top 10 herbicide-resistant weed management practices. *Pest Management Science*. 73(6): 1045-1052.
- Beckie, H. J., Tardif, F. J. (2012). Herbicide cross resistance in weeds. *Crop Protection*. 35:15-28.
- Chaudhary, A., Kaur, S., Chauhan, B. S. (2021). *Phalaris minor* and *Phalaris paradoxa*. En: *Biology and Management of Problematic Crop Weed Species*. United Kingdom: Academic Press, 2021. p. 335-356.
- Chhokar, R. S., Sharma, R. K. (2008). Multiple herbicide resistance in littleseed canarygrass (*Phalaris minor*): a threat to wheat production in India. *Weed Biology and Management*. 8(2):112-123.
- Cruz Hipólito, H., Domínguez Valenzuela, J. A., Osuna, M. D., De Prado, R. (2012). Resistance mechanism to acetyl coenzyme A carboxylase inhibiting herbicides in *Phalaris paradoxa* collected in Mexican wheat fields. *Plant Soil*. 355:121-130.
- Cruz Hipólito, H., Fernández, P., Alcántara, R., Gherekhloo, J., Osuna, M. D. De Prado, R. (2015). Ile-1781-Leu and Asp-2078-Gly mutations in ACCase gene, endow cross-resistance to APP, CHD, and PPZ in *Phalaris minor* from Mexico. *International Journal of Molecular Sciences*. 16:21363-21377.
- Cruz Hipólito, H., Osuna, M. D., Domínguez Valenzuela, J. A., Espinoza, N., De Prado, R. (2011). Mechanism of resistance to ACCase-inhibiting herbicides in wild oat (*Avena fatua*) from Latin America. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 59:7261-7267.
- Dayan, F., Owens, D., Corniani, N., Silva, F., Watson, S., Howell, J., Shaner, D. (2015). Biochemical markers and enzyme assays for herbicide mode of action and resistance studies. *Weed Science*. 63(SP1):23-63.
- Délye C. 2013. Unravelling the genetic bases of non-target-site based resistance (NTSR) to herbicides: a major challenge for weed science in the forthcoming decade. *Pest Management Science*. 69:176-187.
- Délye, C., Duhoux, A., Pernin, F., Riggins, C. Tranel, P. (2015). Molecular mechanisms of herbicide resistance. *Weed Science*. 63(SP1): 91-115.
- Délye, C., Jasieniuk, M., Le Corre, V. (2013a). Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. *Trends in Genetics*. 29(11):649-658.
- Délye, C., Menchari, Y., Michel, S., Cadet, É., Le Corre, V. (2013b). A new insight into arable weed adaptive evolution: Mutations endowing herbicide resistance also affect germination dynamics and seedling emergence. *Annals of Botany*. 111:681-691.
- Délye, C., Michel, S., Bérard, A., Chauvel, B., Brunel, D., Guillemin, J. P., Dessaint, F., Le Corre, V. (2010). Geographical variation in resistance to acetyl-coenzyme A carboxylase-inhibiting herbicides across the range of the arable weed *Alopecurus myosuroides* (black-grass). *New Phytologist*. 186:1005-1017.
- Gaines, T. A., Duke, S. O., Morran, S., Rigon, C. A., Tranel, P. J., Küpper, A., Dayan, F. E. (2020). Mechanisms of evolved herbicide resistance. *Journal of Biological Chemistry*. 288:013572.
- García Franco, J. L., Uscanga Mortera, E., Kohashi Shibata, J., García Esteva, A., Yáñez Jiménez, P., Ortega Escobar, H. M. (2014). Morphological characterization of *Phalaris minor* biotypes resistant and susceptible to ACCase inhibitor herbicides. *Botanical Sciences*. 92(2):169-176.
- Ghanizadeh, H., Harrington, K. C. (2017). Perspectives on non-target site mechanisms of herbicide resistance in weedy plant species using evolutionary physiology. *AoB Plants*. 9: plx035.
- Gharde, Y., Dubey, R.P., Singh, P. K., Mishra, J. S. (2023). Littleseed canarygrass (*Phalaris minor* Retz.) a major weed of rice-wheat system in India is predicted to experience range contraction under future climate. *International Journal of Pest Management*. 1-12.
- Gherekhloo, J., Hassanpour-Bourkheili, S., Hejazirad, P., Golmohammadzadeh, S., Vazquez-Garcia, J. G., De Prado, R. (2021). Herbicide Resistance in *Phalaris* Species: A Review. *Plants*. 10(11):2248.
- Gornicki, P., Podkowinski, J., Scappino, L.A., DiMaio, J., Ward, E. Haselkorn, R. (1994). Wheat acetyl-coenzyme A carboxylase: cDNA and protein structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 91:6860-6864.
- Hashim, S., Jan, A., Fahad, S., Ali, H. H., Mushtaq, M. N., Laghari, K. B., Jabran, K., Chauhan, B. S. (2019). Weed management and herbicide resistant weeds: a case study from wheat growing areas of Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*. 51(5):1761-1767

- Heap, I. (2022). The International Herbicide-Resistant Weed Database. Recuperado de <http://www.weedscience.com>.
- Heap, I. (2016). Criteria for confirmation of herbicide resistant weeds with specific emphasis on confirming low level resistance. Herbicide Resistance Action Committee. Recuperado de <https://hracglobal.com/files/Criteria-for-Confirmation-of-Herbicide-Resistant-Weeds.pdf>.
- Jugulam, M., Shyam, C. (2019). Non-target-site resistance to herbicides: Recent developments. *Plants*. 8(10):417.
- Kaundun, S. S. (2014). Resistance to acetyl-CoA carboxylase-inhibiting herbicides. *Pest Management Science*. 70(9):1405-1417.
- Kaundun, S. S. (2021). Syngenta's contribution to herbicide resistance research and management. *Pest Management Science*. 77(4):1564-1571.
- Kaundun, S. S., Hutchings, S. J., Dale, R. P., Bailly, G. C., Glanfield, P. (2011). Syngenta 'RISQ' test: a novel in-season method for detecting resistance to post-emergence ACCase and ALS inhibitor herbicides in grass weeds. *Weed Research*. 51(3):284-293.
- Konishi, T., Sasaki, Y. (1994). Compartmentalization of two forms of acetyl-CoA carboxylase in plants and the origin of their tolerance toward herbicides. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 91:3598-3601.
- Kuester, A., Chang, S. M., Baucom, R. S. (2015). The geographic mosaic of herbicide resistance evolution in the common morning glory, *Ipomoea purpurea*: Evidence for resistance hotspots and low genetic differentiation across the landscape. *Evolutionary Applications*. 8:821-833.
- Laforest, M., Soufiane, B., Simard, M.J., Obeid, K., Page, E., Nurse, R.E. (2017). Acetyl-CoA carboxylase overexpression in herbicide resistant large crabgrass (*Digitaria sanguinalis*). *Pest Management Science*. 73(11):2227-2235.
- Maity, A., Young, B., Subramanian, N., Bagavathiannan, M. (2022). Pollen-mediated transfer of herbicide resistance between johnson grass (*Sorghum halepense*) biotypes. *Scientific Reports*. 12(1):1-13.
- MAPAQ (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation) (2021). Recuperado de <https://agriculture.canada.ca/en/news-agriculture-and-agri-food-canada/scientific-achievements-agriculture/herbicide-resistance-genetic-tools-zero-tolerance>.
- Medina Cázares, T., Rosales Robles, E. (2014). Capítulo 3. Manejo integrado de maleza. En Tecnología para la producción de trigo de riego en el Bajío. Compiladores Solís-Moya, E. y Rodríguez-Guillén, A. Libro Técnico No. 6. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Nandula, V., Vencill, W. (2015). Herbicide absorption and translocation in plants using radioisotopes. *Weed Science*. 63(SP1):140-151.
- Nugent, P. W., Shaw, J. A., Jha, P., Scherrer, B., Donelick, A., Kumar, V. (2018). Discrimination of herbicide-resistant kochia with hyperspectral imaging. *Journal of Applied Remote Sensing*. 12(1):016037-016037.
- Peterson, M. A., Collavo, A., Ovejero, R., Shivrain, V., Walsh, M. J. (2018). The challenge of herbicide resistance around the world: a current summary. *Pest Management Science*. 74(10):2246-2259.
- Powles, S. B., Yu, Q. (2010). Evolution in action: Plants resistant to herbicides. *Annual Review of Plant Biology*. 61:317-347.
- Sasaki, Y., Nagano, Y. (2004). Plant acetyl-CoA carboxylase: structure, biosynthesis, regulation, and gene manipulation for plant breeding. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 68(6):1175-1184.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2023). Avance de siembras y cosechas. Recuperado de https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/
- SOMECIMA. Sociedad Mexicana de la Ciencia de la Maleza. Recuperado de <https://somecima.com/>
- Soni, J. K., Nibhoria, A., Punia, S. S., Yadav, D. B., Choudhary, V. K., Lalramhlimi, B., Navik, O. (2023). Herbicide resistant *Phalaris minor* in India-history of evolution, present status and its management. *Phytoparasitica*. 1-26.
- Tafoya-Razo, J. A., Mora-Munguía, S. A., Torres-García, J. R. (2022). Diversity of herbicide-resistance mechanisms of *Avena fatua* L. to acetyl-CoA carboxylase-inhibiting herbicides in the Bajío, Mexico. *Plants*. 11(13):1644.
- Tafoya-Razo, J. A., Núñez-Farfán, J., Torres-García, J. R. (2016). Migration by seed dispersal of ACCase-inhibitor-resistant *Avena fatua* in northwestern Mexico. *Pest Management Science*. 73:167-173.
- Torra, J., Alcántara-De la Cruz, R. (2022). Molecular Mechanisms of Herbicide Resistance in Weeds. *Genes*. 13(11):2025.
- Torra, J., Osuna, M. D., Merotto, A., Vila-Aiub, M. (2021). Multiple herbicide-resistant Weeds and non-target site resistance mechanisms: A global challenge for food production. *Frontiers in Plant Science*. 12:763212.
- Torres-García, J. R., Segura-León, O., Uscanga-Mortera, E., Trejo, C., Conde-Martínez, V., Kohashi-Shibata, J., Martínez-Moreno, D. (2018a). Evolution, growth and phenology of *Phalaris minor* biotypes resistant to ACCase-inhibiting herbicides in Mexico. *Botanical Science*. 96 (1):95-102.
- Torres-García, J. R., Tafoya-Razo, J. A., Velázquez-Márquez, S., Tieszen, A. (2018b). Double herbicide-resistant biotypes of wild oat (*Avena fatua*) display characteristic metabolic fingerprints before and after applying ACCase-and ALS-inhibitors. *Acta Physiologiae Plantarum*. 40(6):1-12.
- Torres-García, J. R., Uscanga-Mortera, E., Trejo, C., Conde-Martínez, V., Kohashi-Shibata, J., Núñez-Farfán, J., Martínez-Moreno, D. (2015). Effect of herbicide resistance on seed physiology of *Phalaris minor* (littleseed canarygrass). *Botanical Sciences*. 93(3):661-667.
- Tranel, P.J., Wright, T.R. (2002). Resistance of weeds to ALS-inhibiting herbicides: what have we learned? *Weed Science*. 50(6):700-712.
- Weeden, N. F. (1981). Genetic and biochemical implications of the endosymbiotic origin of the chloroplast. *Journal of Molecular Evolution*. 17:133-139.