

INTERFERENCIA DE NABÓN (*Raphanus sativus* L.) RESISTENTE A HERBICIDAS INHIBIDORES DE AHAS EN GIRASOL CL

Trabajo de intensificación



Alumno: Maximiliano Ribes

Director: Dr. Alejandro Presotto

Consejeros: Dr. Claudio Pandolfo y Dr. Guillermo Chantre Balacca

Asesor externo: Ing. Agr. Román B. Vercellino

Universidad Nacional del Sur



AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE

Índice de figuras.....	pág. 3
Resumen.....	pág. 4
Introducción.....	pág. 5
Hipótesis.....	pág. 10
Objetivos.....	pág. 10
Materiales y métodos.....	pág. 11
Resultados.....	pág. 15
Girasol.....	pág. 15
Nabón.....	pág. 19
Discusión.....	pág. 23
Conclusión.....	pág. 27
Bibliografía.....	pág. 28
Anexo.....	pág. 32

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Altura de planta de girasol bajo la interferencia de densidades crecientes de *Raphanus sativus* (nabón). Las distintas letras muestran diferencias significativas para la prueba de LSD de Fisher ($P < 0,05$)..... **pág. 16**
- Figura 2.** Número de hojas verdes por planta de girasol bajo interferencia de densidades crecientes de *Raphanus sativus* (nabón). Las distintas letras muestran diferencias significativas para la prueba de LSD de Fisher ($P < 0,05$)..... **pág. 16**
- Figura 3.** Área foliar promedio de las tres hojas centrales de girasol bajo interferencia de densidades crecientes de *Raphanus sativus* (nabón). Las distintas letras muestran diferencias significativas en la prueba de LSD de Fisher ($P < 0,05$)..... **pág. 17**
- Figura 4.** Efecto de densidades crecientes de nabón sobre el diámetro de capítulos de girasol (cm). Las distintas letras muestran diferencias significativas en la prueba de LSD de Fisher ($P < 0,05$)..... **pág. 17**
- Figura 5.** Pérdida de rendimiento del girasol en función de la densidad de *Raphanus sativus* (nabón). La curva corresponde a un modelo hiperbólico rectangular no lineal ($R^2 = 0,57$)..... **pág. 18**
- Figura 6.** Relaciones entre la densidad de nabón y biomasa seca por planta (A; $R^2 = 0,59$) y biomasa seca por metro cuadrado (B; $R^2 = 0,79$) de nabón en el cultivo de girasol descriptas por los modelos de decaimiento exponencial e hiperbólico, respectivamente. Las barras verticales indican las medias \pm ES..... **pág. 20**
- Figura 7.** Relaciones entre la densidad de nabón y el número de silicuas por planta (A; $R^2 = 0,50$) y el número de silicuas por metro cuadrado (B; $R^2 = 0,79$) de nabón en el cultivo de girasol descriptas por los modelos de decaimiento exponencial e hiperbólico, respectivamente. Las barras verticales indican las medias \pm ES..... **pág. 21**
- Figura 8.** Relaciones entre la densidad de nabón y el número de semillas por planta (A; $R^2 = 0,44$) y el número de semillas por metro cuadrado (B; $R^2 = 0,79$) de nabón en el cultivo de girasol descriptas por los modelos de decaimiento exponencial e hiperbólico, respectivamente. Las barras verticales indican las medias \pm ES..... **pág. 22**

RESUMEN

Raphanus sativus (nabón) es una especie anual invierno-primaveral, perteneciente a la familia Brassicaceae. El nabón es una maleza problemática que ha desarrollado resistencia a herbicidas inhibidores de la enzima acetohidroxiácido sintasa (AHAS) en varios países del mundo, incluido Argentina. Además, algunas cohortes tienen un ciclo estival pudiendo interferir con los cultivos de verano, y el manejo de las poblaciones resistentes en estos cultivos se torna más dificultoso. En consecuencia, el estudio del impacto de su interferencia podría proporcionar información de utilidad para generar estrategias de manejo adecuadas. En este estudio se evaluó el efecto de interferencia de densidades crecientes de nabón sobre un cultivo de girasol CL. Las densidades de nabón fueron de 1,6, 4, 8 y 16 plantas m^{-2} . El experimento se llevó a cabo durante la temporada 2016/2017 en el predio del Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur. Los resultados revelaron que la interferencia de *R. sativus* generó reducciones en la altura de plantas, número de hojas verdes, área foliar y diámetros de capítulos de girasol, lo que en conjunto se tradujo en pérdidas de rendimiento superiores a 12%. Además, a medida que la densidad de nabón aumentó, se incrementó su biomasa seca, silicuas y semillas por m^{-2} . Sin embargo, estos parámetros se redujeron al considerar a las plantas individualmente. El nabón produjo entre 1000 a 5000 semillas m^{-2} a bajas y altas densidades, respectivamente, lo que supone un significativo aporte al banco de semillas del suelo. En conclusión, *R. sativus* causó pérdidas de rendimiento considerables en girasol, incluso en una estación de crecimiento en la que esta especie no puede expresar su potencial de crecimiento.

INTRODUCCIÓN

Las malezas pueden ser definidas como plantas que causan pérdidas económicas, generan problemas de salud a los seres humanos o animales, o son indeseables en el lugar que crecen (WSSA, 2016). Desde el comienzo de la agricultura ha ocurrido una aparición continua de malezas problemáticas como resultado de la presión de selección de las prácticas agrícolas (Hancock, 2012). A nivel mundial, el gasto en herbicidas supera los U\$S 55.000 millones (Agrow, 2018). En Argentina, se estima que las pérdidas causadas por las malezas alcanzan los U\$S 1300 millones anuales y el gasto en herbicidas es de U\$S 700 a 1000 millones (Esperbent, 2015).

Las malezas disminuyen el rendimiento de los cultivos, al competir por recursos esenciales como la luz, el espacio, los nutrientes y el agua, o al liberar sustancias químicas tóxicas (alelopáticas) al ambiente. Ambos fenómenos son interacciones bióticas negativas que pueden ser aislados teóricamente y experimentalmente, pero en la práctica son difíciles de individualizar, por lo que el término interferencia es utilizado para incluir estas interacciones sin especificar la causa. Las pérdidas de rendimiento de los cultivos debido a la interferencia de una maleza dependen principalmente del tiempo de emergencia relativo de la maleza respecto al cultivo, la densidad de la maleza y la especie en cuestión (Curtis & Schnek, 2008; Swanton *et al.*, 2015). Las malezas también reducen la calidad comercial e industrial de los granos de las especies útiles, al contaminar los granos con semillas de malezas y materias extrañas, que muchas veces son difíciles de separar, dificultan las operaciones de cosecha, al aumentar la humedad y el volumen vegetal que pasa por el sistema de trilla de las cosechadoras, y son huéspedes de plagas y enfermedades (Marzocca *et al.*, 1976). En consecuencia, el control efectivo de las malezas es crucial para que un sistema agrícola sea rentable.

Existen varios métodos para el control de malezas: manual, mecánico, cultural (rotación de cultivos, corrimiento de la fecha de siembra, uso de cultivos y variedades competitivas, distanciamiento entre hileras, cultivos de cobertura), control químico a través del uso de herbicidas, control biológico y otros métodos menos usuales como el control eléctrico y por fuego (Zimdahl, 2007). El control químico mediante el uso de

herbicidas, desarrollado luego de la Segunda Guerra Mundial con la introducción en el mercado del 2,4-D, es actualmente el método más utilizado, más económico y posiblemente el más efectivo para el control de malezas en los sistemas agrícolas de todo el mundo (Bajwa, 2014). A pesar de la existencia de 26 modos de acción, un número limitado de ellos han sido continuamente utilizados para el control de malezas, y tan solo tres modos de acción superan el 50 % del mercado mundial de herbicidas (Kraehmer *et al.*, 2014). La sobre-dependencia de herbicidas del mismo modo de acción para controlar las poblaciones de malezas genera un ambiente favorable para la aparición de malezas resistentes (Yu & Powles, 2014). Un biotipo se considera resistente cuando sobrevive a la aplicación de un herbicida en dosis que normalmente controlan con efectividad a las plantas de la misma especie. Actualmente, existen 505 biotipos, pertenecientes a 259 especies, que presentan resistencia a herbicidas en todo el mundo (Heap, 2019).

La enzima acetohidroxiácido sintasa (AHAS), también conocida como acetolactato sintetasa (ALS), es la primer enzima en la vía de la biosíntesis de los aminoácidos ramificados valina, leucina e isoleucina, y es el sitio de acción común de cinco familias químicas de herbicidas: sulfonilureas, imidazolinonas, triazolopirimidinas, pirimidiltiobenzoatos y sulfonil-amino carbonil triazolinonas (Duggleby *et al.*, 2008). Desde su introducción en la década de 1980, estos herbicidas han sido ampliamente utilizados debido a su amplio espectro de control de malezas a bajas dosis de aplicación, bajo impacto ambiental, baja toxicidad en mamíferos, alta selectividad de cultivos y elevada eficiencia de control (Duggleby *et al.*, 2008). El uso intensivo de herbicidas inhibidores de AHAS ha resultado en una rápida evolución de poblaciones de malezas resistentes (Yu & Powles, 2014), y la creciente adopción del sistema de labranza cero junto con la reducción en la rotación de cultivos, han favorecido un incremento en las malezas resistentes (Kraehmer *et al.*, 2014). Actualmente, existen 162 especies de malezas resistentes a los herbicidas inhibidores de AHAS, 62 monocotiledóneas y 100 dicotiledóneas. Además, este grupo de herbicidas es el más propenso a generar resistencia, siendo los biotipos resistentes a este grupo los más encontrados en los últimos veinte años (Heap, 2019).

El género *Raphanus* pertenece a la familia Brassicaceae (brasicáceas o crucíferas) y comprende dos especies básicas: *Raphanus sativus* L. (rábano o rabanito), que engloba todas sus formas botánicas cultivadas, y *R. raphanistrum* L. (rábano silvestre), nativo de las costas del Mediterráneo y probable ancestro de *R. sativus*. El rábano silvestre es una invasora exitosa y ha ingresado en el ranking de las peores malezas del mundo, registrada en más de 45 cultivos en al menos 65 países (Pandolfo *et al.*, 2018). Ambas especies son anuales, auto-incompatibles de reproducción cruzada obligada, y polinizadas por insectos.

El rábano es una planta cultivada en todo el mundo por el valor alimenticio de sus raíces engrosadas. A pesar de que su origen no ha sido dilucidado por completo, algunas investigaciones sugieren que fue domesticado independientemente en Eurasia y el este de Asia. Representaciones encontradas en las paredes de las pirámides de 4000 años de antigüedad sugieren que el rábano fue un cultivo importante en antiguo Egipto aproximadamente en el 2000 a.C., y también fue cultivado en el este de Asia hace más de 2000 años (Pandolfo *et al.*, 2018).

Las poblaciones espontáneas de rábano (nabón) encontradas en varias partes del mundo, de raíces delgadas y ciclo corto, son consideradas formas asilvestradas o de-domesticadas (ferales), derivadas del biotipo cultivado (Pandolfo *et al.*, 2018). El nabón es una maleza invasora frecuente en zonas templadas de América incluyendo Brasil, Uruguay, Paraguay, Chile, Argentina, México y Estados Unidos (Pandolfo *et al.*, 2018).

En distintas partes del mundo, *R. sativus* y *R. raphanistrum* han desarrollado resistencia a herbicidas. Se ha demostrado la presencia de *R. raphanistrum* con resistencia a AHAS en Australia, Brasil y Sudáfrica (Heap, 2019). La resistencia a AHAS en *R. sativus* ha sido demostrada en Brasil, Chile y Argentina (Pandolfo *et al.*, 2016a; Vercellino *et al.*, 2018; Heap, 2019).

En Argentina, *R. sativus* es reconocida como una especie invasora desde la década de 1930 y se ha demostrado su presencia en al menos 20 provincias. El nabón crece principalmente en ambientes disturbados, como márgenes de caminos, y en suelos agrícolas (Pandolfo *et al.*, 2018). Presenta un ciclo de vida otoño-inverno-primaveral, con emergencias en otoño y floración y fructificación desde la primavera hasta

principios de otoño. Si las condiciones son favorables puede desarrollar un ciclo estival, con emergencias en primavera y floración en otoño (Pandolfo *et al.*, 2018). Es una maleza frecuente de cultivos de cereales, oleaginosas y algunos cultivos forrajeros y hortícolas (Pandolfo *et al.*, 2018), y por su ciclo prolongado puede interferir con los cultivos de verano, como soja (*Glicine max* L.), maíz (*Zea mays* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.) (Faccini *et al.*, 2012).

Alrededor del 60% del sudeste de la provincia de Buenos Aires está dedicada a la agricultura, sembrando principalmente (más del 90%) bajo el sistema de labranza cero, y los herbicidas de las familias de las imidazolinonas y sulfonilureas son comúnmente utilizados. En este área, el nabón es una de las malezas que más incrementó su presencia en los últimos 35 años (Scursoni *et al.*, 2014). En 2011, algunos lotes de girasol resistente a imidazolinonas (CL o Clearfield®) se encontraron severamente invadidos con plantas nabón luego de la aplicación del herbicida imazapir. La falla en el control de estas plantas generó la sospecha de su resistencia a los herbicidas inhibidores de AHAS, y luego Pandolfo *et al.*, (2016a) demostraron que la mutación Trp-574-Leu era responsable de la resistencia a las cinco familias de herbicidas AHAS en estos biotipos. Desde el reporte inicial, los biotipos de *R. sativus* resistentes a inhibidores de AHAS se propagaron rápidamente, y en 2017 la Asociación Argentina de productores en siembra directa (AAPRESID) reportó la presencia de esta maleza resistente en la mayor parte de los distritos del centro-sur de la provincia de Buenos Aires (AAPRESID, 2017).

El girasol (*Helianthus annuus* L.) es una dicotiledónea de ciclo anual perteneciente a la familia de las asteráceas (USDA, 2007), nativa de Norteamérica (Putnam *et al.*, 1990). Es una oleaginosa importante a nivel mundial, que en los últimos años superó las 25 millones de hectáreas cosechadas, y es tradicionalmente cultivada en Argentina, en donde en la última década se sembraron anualmente unas 2 millones de ha (FAOSTAT, 2019. www.fao.org/faostat/es/#home).

Bajo el sistema de labranza cero, el manejo de malezas se basa en el control químico y la disponibilidad de herbicidas postemergentes para controlar malezas latifoliadas en girasol es limitada. Los agricultores y técnicos disponen escasas (por ejemplo,

aclonifen) opciones químicas de herbicidas para el control post-emergente de nabón resistente a herbicidas AHAS en el cultivo de girasol (Pandolfo *et al.*, 2016a). El desarrollo de híbridos con resistencia a herbicidas del grupo de las imidazolinonas ha permitido el control de un amplio espectro de malezas, incluyendo muchas especies de dicotiledóneas (Tan *et al.*, 2005; Sala *et al.*, 2012). Estos híbridos fueron inicialmente comercializados en Argentina como girasol Clearfield (CL) en 2003 (Tan *et al.*, 2005), y actualmente esta tecnología es utilizada en más del 60% del área sembrada (ASAGIR, 2017. www.asagir.org.ar). El fracaso de los herbicidas imidazolinonas en el control de nabón fue informado en al menos cinco establecimientos productores de girasol en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Pandolfo *et al.*, 2016a; Bedmar, 2010). A pesar de ello, no se conocen los efectos que causa la interferencia de nabón sobre el cultivo de girasol.

En este estudio se evaluó el efecto de la interferencia de varias densidades de nabón resistente a herbicidas inhibidores de AHAS sobre los componentes del rendimiento y el rendimiento de un cultivo de girasol CL, y se estimó la altura, biomasa seca aérea y la producción de silicuas y semillas de varias densidades de nabón criado sobre un cultivo de girasol.

HIPÓTESIS

El rendimiento del cultivo de girasol disminuirá debido a la interferencia de *Raphanus sativus* feral (nabón). El efecto será mayor con el aumento de la densidad de la maleza.

La producción de materia seca, silicuas y semillas de nabón por unidad de superficie será mayor a medida que aumente la densidad de la maleza.

OBJETIVOS

Evaluar el rendimiento de un híbrido de girasol CL bajo la interferencia de cuatro densidades de un biotipo de nabón resistente a herbicidas inhibidores de AHAS.

Evaluar la producción de materia seca, silicuas y semillas por planta y por unidad de superficie de un biotipo de nabón resistente a herbicidas inhibidores de AHAS creciendo en condiciones competitivas con un híbrido comercial de girasol CL.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento fue realizado entre noviembre de 2016 y marzo de 2017, en el campo experimental del Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur (latitud 38° 41' 38" S, longitud 62° 14' 53" O). El área presentó un suelo de textura arenosa-franca con buen drenaje, 1,1% de materia orgánica y pH 7,7.

En condiciones de campo, la emergencia de plántulas de nabón ocurre principalmente sobre las hileras de siembra, probablemente debido a que los discos de la sembradora escarifican las silicuas, y liberan y entierran sus semillas (Vercellino *et al.*, 2019). Por lo tanto, aquí se evaluó la interferencia de nabón establecido al mismo tiempo que el cultivo.

El 15 de noviembre de 2016, se sembró manualmente el híbrido comercial de girasol SYN 3970 CL a una densidad de 6,4 plantas m⁻². Cada unidad experimental de 5,46 m², estaba comprendida por cinco líneas de siembra, distanciadas a 0,52 m, y 2,10 m de largo. También se sembró la accesión de nabón resistente a herbicidas inhibidores de AHAS RSBA10, previamente caracterizada por Pandolfo *et al.*, (2013; 2016a) y Vercellino *et al.*, (2018), colectada por el Grupo de Investigación de las Relaciones Cultivo-Silvestre (GIRCS) CERZOS-UNS, en cercanías a la localidad de Pieres (partido de Lobería, Buenos Aires), en un lote de girasol CL luego de la aplicación de imazapir (imidazolinona). Este biotipo presentó >94 % de individuos resistentes a herbicidas AHAS debido a la mutación Trp-574-Leu (Pandolfo *et al.*, 2016a; Vercellino *et al.*, 2018). Las semillas del cultivo y la maleza fueron sembradas simultáneamente con 2 a 3 semillas por golpe a 2 – 3 cm de profundidad, de acuerdo a su plan de densidad. Las densidades propuestas para el nabón fueron de 0 (control), 1,6, 4, 8 y 16 plantas m⁻². Cuando el cultivo alcanzó el estado V4 (Schneider & Miller, 1981), se realizó un raleo manual para ajustar el stand de plantas del cultivo y de la maleza a las densidades propuestas. El cultivo fue regado mediante riego por goteo y fertilizado con 90 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico a la siembra y 150 kg ha⁻¹ de urea en el estado V4. Durante el transcurso del ciclo del cultivo se realizó desmalezado manual periódico con la finalidad de evitar la interferencia causada por otras malezas.

En el estadio R6 del cultivo, se midió la altura de planta, el ancho foliar de las tres hojas centrales, y número de hojas verdes de tres plantas vecinas dentro de la línea central de cada unidad experimental. El ancho foliar promedio por planta fue utilizado para estimar el área foliar según Aguirrezabal *et al.* (1996). Al finalizar el ciclo del cultivo (R9), se cosecharon manualmente los capítulos de las plantas anteriormente muestreadas y se colocaron en estufa a 60°C hasta peso constante con la finalidad de homogeneizar los tratamientos. En el mismo momento, se midió la altura y el número de ramas de tres plantas sucesivas de nabón dentro de cada unidad experimental. Estas plantas se cosecharon manualmente y se secaron en estufa a las condiciones mencionadas previamente. Luego, en el laboratorio, en girasol se midió el diámetro de los capítulos, peso de los granos y número de granos por capítulo. El peso unitario de los granos de cada planta se estimó al promediar el peso de tres repeticiones de 100 granos. El rendimiento (kg ha^{-1}) se calculó pesando los granos de cada planta, y luego multiplicándolos por el número de capítulos ha^{-1} .

En las plantas de nabón se evaluó el número de silicuas por planta, número de semillas por silicua, peso de las semillas y número de semillas por planta. Las silicuas fueron contadas y trilladas manualmente con la ayuda de un mortero para obtener las semillas, que fueron limpiadas y pesadas para obtener el rendimiento por planta. El peso unitario de las semillas se estimó al promediar el peso de tres repeticiones de 100 semillas. El número de semillas por planta se estimó dividiendo el peso de semillas por planta por el peso por semilla para cada planta. En el caso de no completar las tres submuestras, el número de semillas por planta fue contado directamente. Los datos de las 3 plantas de girasol y las 3 plantas de nabón de cada unidad experimental (parcela) se promediaron para el análisis estadístico.

El experimento se realizó en un diseño en bloques completamente aleatorizados con cuatro repeticiones, y se utilizó ANOVA y comparaciones de medias de a pares mediante la prueba LSD de Fisher. Con esto se buscó determinar variaciones en las variables medidas en girasol bajo la interferencia de densidades crecientes de nabón, y en las de nabón a distintas densidades de la maleza.

La relación entre la pérdida de rendimiento del cultivo y densidad de nabón fue analizada utilizando un modelo de regresión no lineal hiperbólico rectangular (Cousens, 1985), con el programa Prism (Graphpad Prism v.7.0; GraphPad Software, San Diego, California, USA). La relación de pérdida de rendimiento es descrita por la ecuación 1:

$$PR = \frac{Id}{1+Id/A} \text{ (Ecuación 1)}$$

donde PR es el porcentaje de pérdida de rendimiento relativa al tratamiento libre de malezas, d es la densidad de la maleza, I es el porcentaje de pérdida de rendimiento por unidad de maleza cuando la densidad de la maleza se acerca a cero, y A es el porcentaje de pérdida de rendimiento cuando la densidad de maleza tiende a infinito.

Para analizar las relaciones entre los caracteres de nabón (biomasa seca, número de silicuas y producción de semillas) y la densidad del mismo, se realizaron análisis de regresión utilizando el software Prism. Las relaciones se establecieron a partir de los mejores ajustes de los datos experimentales a funciones apropiadas (lógicas), y en cada caso se muestran los coeficientes de determinación (R^2). Se utilizó ANOVA para determinar diferencias entre tratamientos en altura de planta, número de ramas, número de semillas por silicua y peso de las semillas de nabón.

El modelo hiperbólico de dos parámetros (Ecuación 2) fue utilizado para describir los efectos denso-dependientes de nabón sobre la biomasa seca y el número de silicuas y semillas de nabón por metro cuadrado:

$$Y = ab / (b + D) \text{ (Ecuación 2)}$$

donde Y es la biomasa seca, el número de silicuas y la producción de semillas de nabón por metro cuadrado, a la asíntota o estimación de máxima biomasa seca, número de silicuas y producción de semillas de nabón por metro cuadrado, b la estimación de la densidad de nabón en que ocurre el 50 % de la máxima biomasa seca, número de silicuas y producción de semillas y D la densidad de nabón.

El modelo de decaimiento exponencial (Ecuación 3) fue utilizado para describir los efectos denso-dependientes de nabón sobre la biomasa seca y el número de silicuas y semillas de nabón por planta:

$$Y = b + (a - b)^{-cD} \text{ (Ecuación 3)}$$

donde Y es la biomasa seca, el número de silicuas y la producción de semillas de nabón por planta, b es el valor de Y cuando la densidad de nabón tiende a infinito, expresada en las mismas unidades que Y , a el valor de Y cuando D tiende a cero, y D la densidad de nabón.

RESULTADOS

Girasol

La altura de planta, el número de hojas verdes y el área foliar de girasol se vieron reducidas únicamente cuando la densidad de nabón fue de 16 plantas m^{-2} . La reducción fue del 6,5 % para la altura de plantas ($F = 3,33$; $P < 0,05$; Figura 1), 11,0 % para el número de hojas verdes ($F = 4,24$; $P < 0,05$; Figura 2) y de 34 % para el área foliar ($F = 3,46$; $P < 0,05$; Figura 3). El diámetro de capítulo de girasol fue reducido en 7,2 % a partir de las 8 plantas m^{-2} de nabón ($F = 4,96$; $P < 0,05$; Figura 4). El peso y el número de granos por capítulo no fueron afectados por la interferencia de nabón ($F = 0,30$; $P = 0,87$ y $F = 1,62$; $P = 0,23$).

El rendimiento de girasol libre de malezas fue de 3728 $kg\ ha^{-1}$. El modelo hiperbólico rectangular ($R^2 = 0,57$) mostró que a medida que aumentó la densidad de nabón incrementaron las pérdidas de rendimiento de girasol. El rendimiento de girasol se redujo 5,4 % a bajas densidades (parámetro I) y 12,2 % a altas densidades (parámetro A) de maleza ($F = 48,36$; $P < 0,0001$; figura 5).

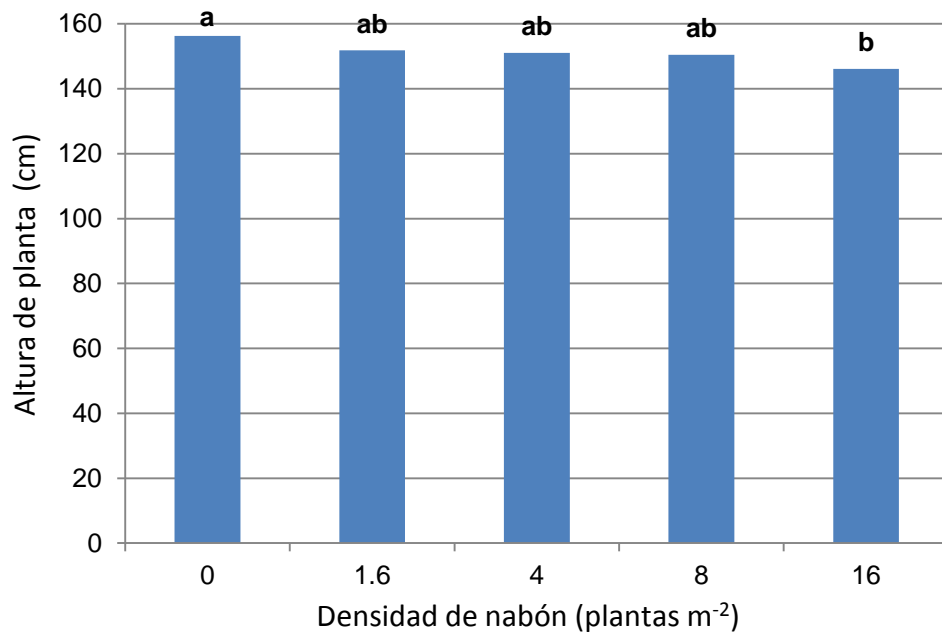


Figura 1. Altura de planta de girasol bajo la interferencia de densidades crecientes de *Raphanus sativus* (nabón). Las distintas letras muestran diferencias significativas para la prueba de LSD de Fisher ($P < 0,05$).

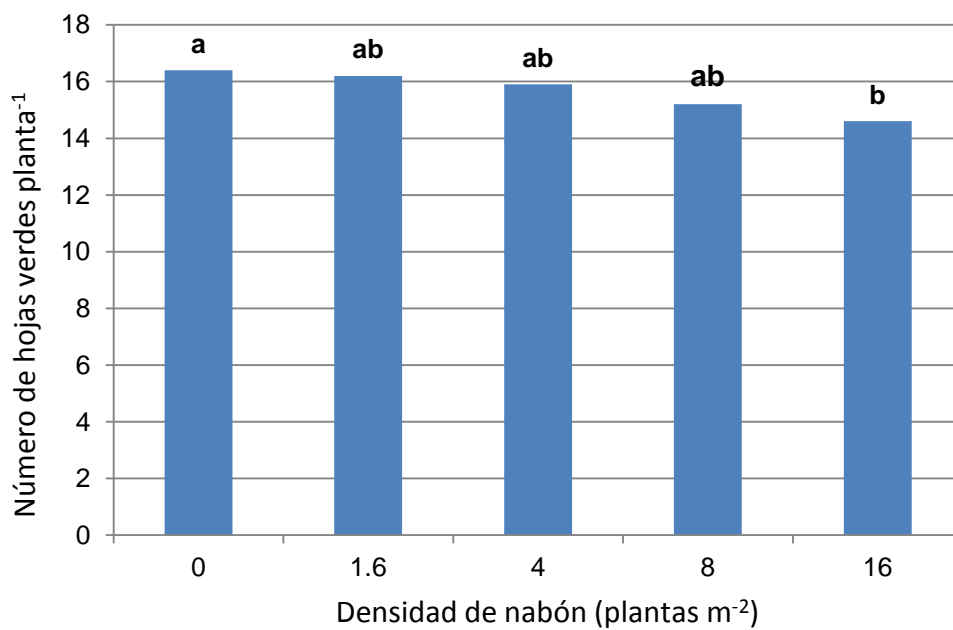


Figura 2. Número de hojas verdes por planta de girasol bajo interferencia de densidades crecientes de *Raphanus sativus* (nabón). Las distintas letras muestran diferencias significativas para la prueba de LSD de Fisher ($P < 0,05$).

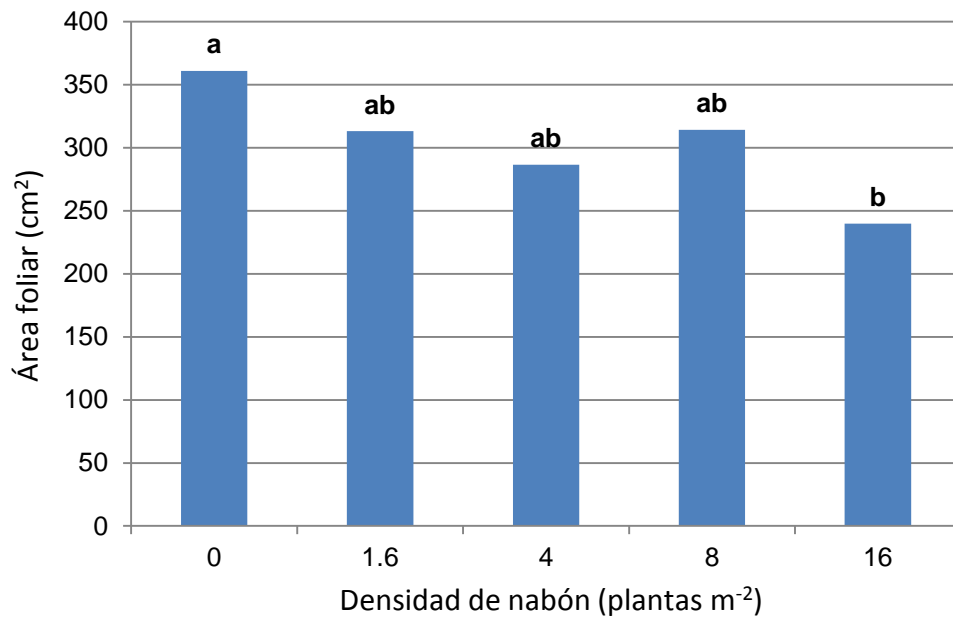


Figura 3. Área foliar promedio de las tres hojas centrales de girasol bajo interferencia de densidades crecientes de *Raphanus sativus* (nabón). Las distintas letras muestran diferencias significativas en la prueba de LSD de Fisher ($P < 0,05$).

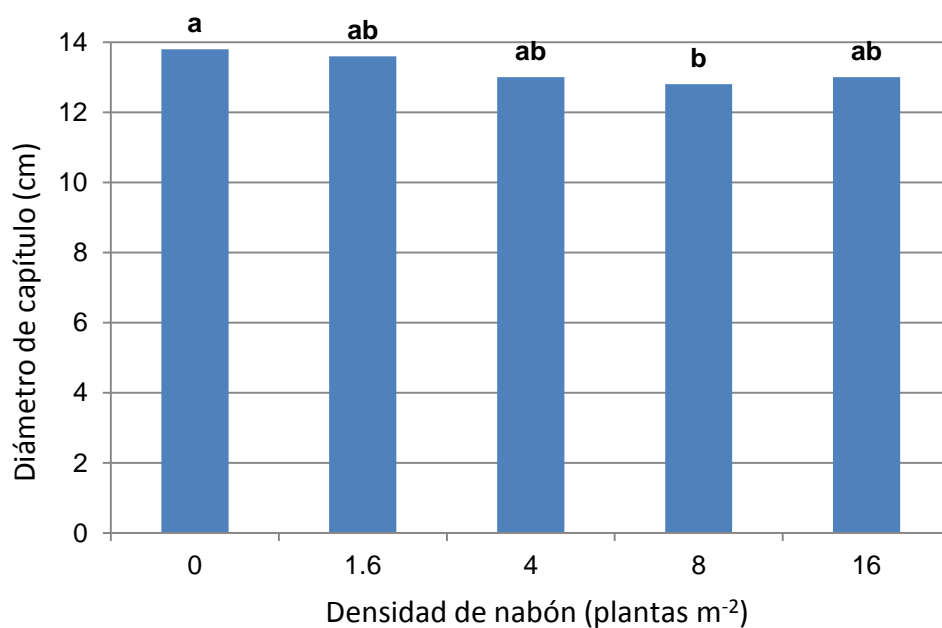


Figura 4. Diámetro de capítulo de girasol bajo interferencia de densidades crecientes de *Raphanus sativus* (nabón). Las distintas letras muestran diferencias significativas en la prueba de LSD de Fisher ($P < 0,05$).

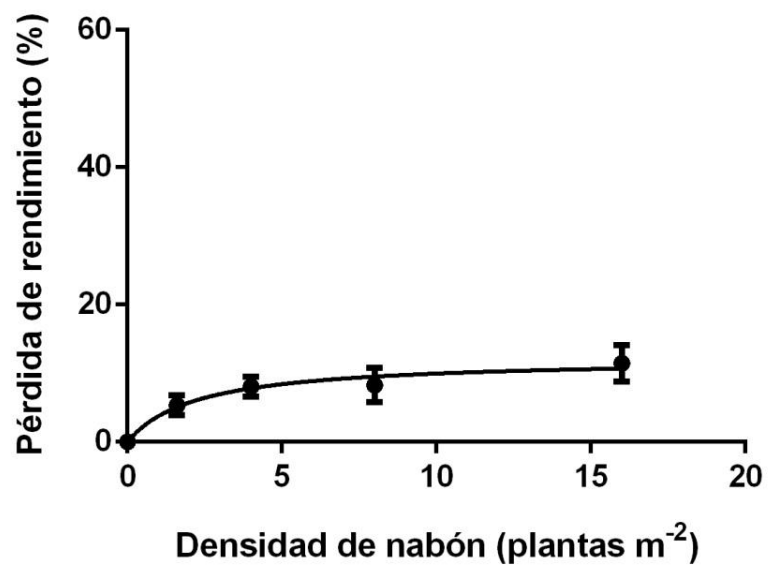


Figura 5. Pérdida de rendimiento del girasol en función de la densidad de *Raphanus sativus* (nabón). La curva corresponde a un modelo hiperbólico rectangular no lineal ($R^2 = 0,57$).

Nabón

La altura de planta ($65,4 \pm 1,8$ cm), el número de ramas ($6,2 \pm 0,3$ ramas primarias planta⁻¹), el número de semillas por silicua ($5,6 \pm 0,2$ semillas silicua⁻¹) y el peso de semillas ($6,9 \pm 0,1$ mg) de nabón no fueron afectados por la densidad de malezas. En cambio, la biomasa seca aérea y el número de silicuas y semillas por planta fueron reducidos por el aumento en la densidad de plantas, como lo indica el modelo de decaimiento exponencial (Figuras 6A, 7A y 8A, respectivamente). La biomasa seca y el número de silicuas y semillas de nabón por área también fueron dependientes de la densidad como lo indica el modelo hiperbólico, pero a diferencia de los valores por planta, ellos tendieron a incrementar con incrementos en la densidad de la maleza (Figuras 6B, 7B y 8B, respectivamente).

El número de semillas producidas por unidad de área incrementó con los incrementos en la densidad de nabón. El modelo hiperbólico mostro que el nabón produjo aproximadamente 1000 a 4700 semillas m⁻² a baja y alta densidad de nabón (Figura 8B).

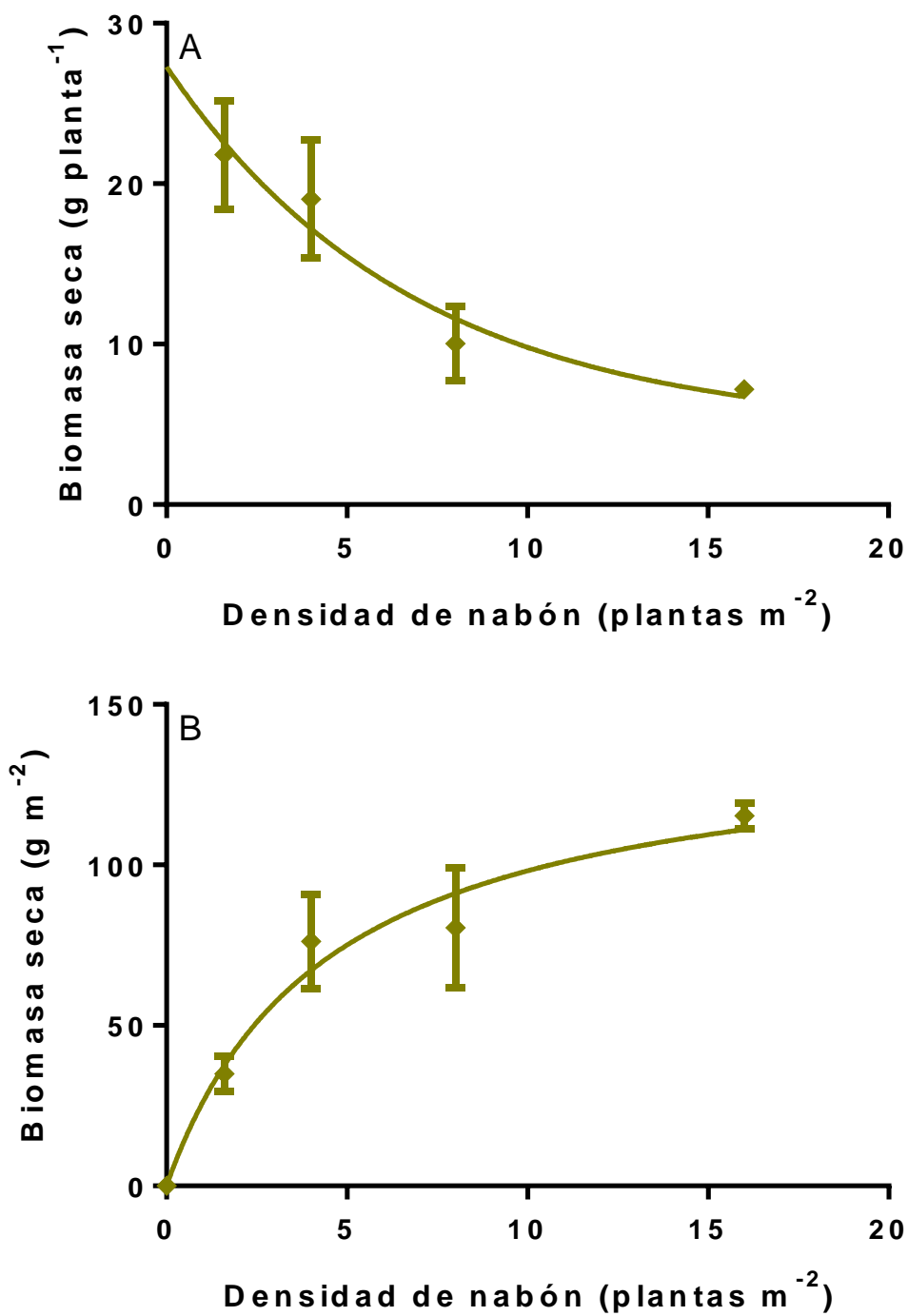


Figura 6. Relaciones entre la densidad de nabón y biomasa seca por planta (A; $R^2 = 0,59$) y biomasa seca por metro cuadrado (B; $R^2 = 0,79$) de nabón en el cultivo de girasol descritas por los modelos de decaimiento exponencial e hiperbólico, respectivamente. Las barras verticales indican las medias \pm ES.

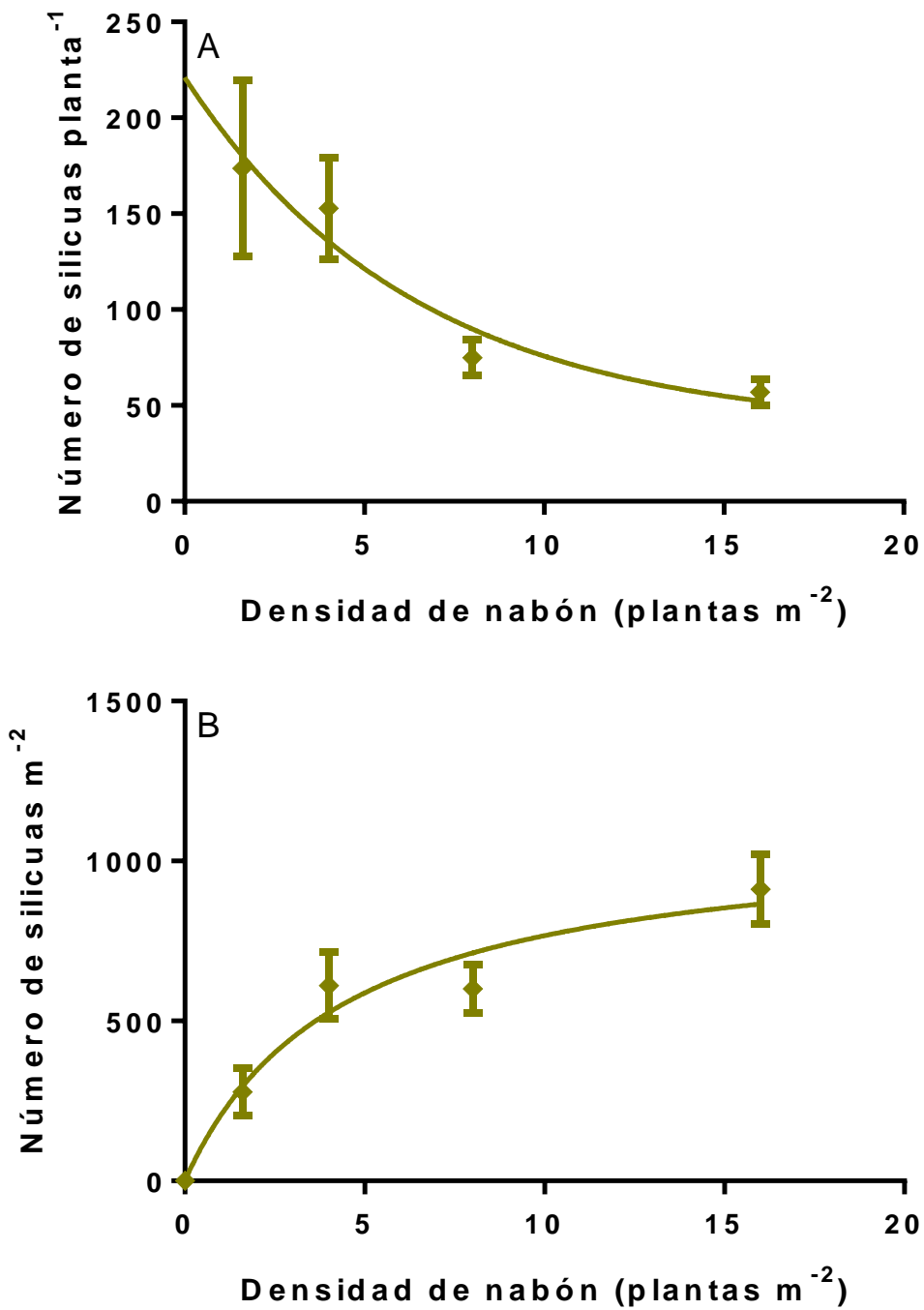


Figura 7. Relaciones entre la densidad de nabón y el número de silicuas por planta (A; $R^2 = 0,50$) y el número de silicuas por metro cuadrado (B; $R^2 = 0,79$) de nabón en el cultivo de girasol descritas por los modelos de decaimiento exponencial e hiperbólico, respectivamente. Las barras verticales indican las medias \pm ES.

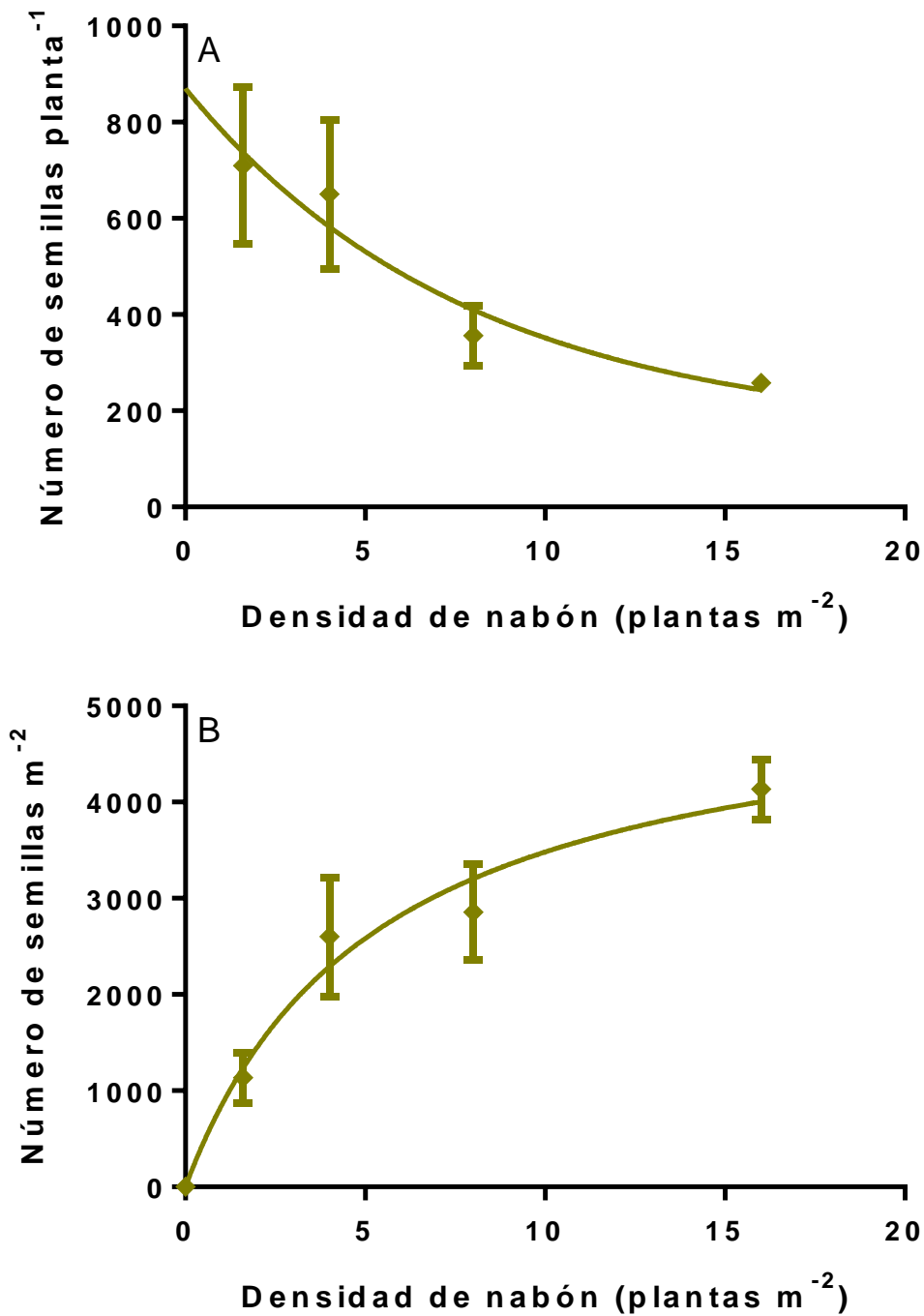


Figura 8. Relaciones entre la densidad de nabón y el número de semillas por planta (A; $R^2 = 0,44$) y el número de semillas por metro cuadrado (B; $R^2 = 0,79$) de nabón en el cultivo de girasol descritas por los modelos de decaimiento exponencial e hiperbólico, respectivamente. Las barras verticales indican las medias \pm ES.

DISCUSIÓN

Los resultados mostraron que la interferencia del nabón generó reducciones en la altura de planta, el número de hojas verdes, el área foliar y el diámetro de los capítulos de girasol. Esto resultó en mermas significativas en el rendimiento del cultivo. Por otro lado, al incrementar la densidad de maleza, se vieron reducciones en la producción de materia seca, número de silicuas y número de semillas por planta de nabón, mientras que estos parámetros se fueron incrementando cuando se expresaron en unidad de superficie. En cambio, la altura de planta, el número de ramas, el número de semillas por silicua y el peso de semillas del nabón no fueron afectados significativamente ante las variaciones en su densidad.

La interferencia de nabón generó pérdidas de rendimiento de girasol entre 5,4 y 12,2 % cuando la densidad de maleza estuvo entre 1,6 y 16 plantas m^{-2} . Estos resultados fueron diferentes a los encontrados por Pandolfo (2016b), que mostró pérdidas que fluctuaron entre 9 y 79 % a bajas y altas (>30 plantas m^{-2}) densidades de nabón en condiciones de campo a nivel comercial. Por otro lado, la interferencia de más de 40 plantas m^{-2} de *R. sativus* redujo hasta 25 % la altura y longitud de las ramas de soja, que consecuentemente disminuyó entre 12 y 15 % su rendimiento (Bianchi *et al.*, 2011). En otro estudio utilizando la misma accesión de nabón (RSBA10), se encontró que la interferencia de 2 a 16 plantas de nabón m^{-2} redujo 25 a 84 % el rendimiento de colza (Alonzi, 2019). La mayor interferencia provocada por la presencia de nabón sobre el cultivo de colza respecto al cultivo de girasol posiblemente sea debido a que el nabón es una maleza invernal (Snow & Campbell, 2005), y en consecuencia mostró menor materia seca aérea en nuestro experimento respecto al experimento sobre el cultivo de colza (Alonzi, 2019).

Por otro lado, también se han evaluado los efectos que puede causar el pariente silvestre *R. raphanistrum* sobre cultivos invernales. Blackshaw *et al.* (2002) mostraron que la interferencia de 4 a 64 plantas m^{-2} de rábano silvestre produce pérdidas de rendimiento de colza entre 9 y 91%. En trigo (*Triticum aestivum* L.) y lupino (*Lupinus spp.* L.), la interferencia de *R. raphanistrum* generó reducciones del rendimiento entre

7 y 56% y 28 y 92%, respectivamente, a medida que aumentó la densidad de 10 a 75 plantas m⁻² (Hashem & Wilkins, 2002).

La interferencia de nabón también puede resultar en pérdidas indirectas en la cosecha debido a que el nabón madura tarde en la estación de crecimiento y los agricultores pueden evitar completamente la cosecha de áreas densamente infectadas. La presencia de plantas maduras de nabón con similar altura que las inflorescencias de los cultivos durante la cosecha también pueden interferir con las operaciones de cosecha y comprometer la calidad de los granos cosechados al contaminarlos con sus semillas, lo que reduciría su valor (Varanasi et al., 2016). Sin embargo, ello no sería importante en girasol porque la altura de las plantas de nabón fue ampliamente inferior (>50 cm) al cultivo. Por otro lado, las semillas de nabón podrían reducir la calidad del aceite de girasol al incrementar el contenido de ácido erúcico del aceite y los niveles de glucosinolatos en la harina que se comercializa como alimento para ganado, como ha sido demostrado en colza con *R. raphanistrum* (Blackshaw et al., 2002). Sin embargo, las diferencias en tamaño entre las semillas de girasol y nabón resultarían en escasas posibilidades de que esto suceda por ser fácilmente aisladas unas de las otras.

Los resultados de este estudio mostraron que la producción de semillas de nabón en el cultivo de girasol oscilo aproximadamente entre 1.000 y 5.000 semillas m⁻² cuando las densidades de nabón fueron 1,6 a 16 plantas m⁻². En contraste, Alonzi (2019) observó que la producción de semillas de nabón fue de 5100 a 19800 semillas m⁻² con densidades de 2 a 16 plantas m⁻², creciendo junto a un cultivo invernal como es la colza. A pesar de que el presente estudio no se llevó a cabo en la temporada de crecimiento invernal, esta maleza logró producir una importante cantidad de semillas.

Las semillas de nabón tienen requerimientos de oscuridad para germinar y se encuentran encerradas dentro de silicuas indehiscentes que imponen dormición fisiológica (Vercellino et al., 2019). Ello, junto con la disponibilidad de agua y la temperatura, tiene el potencial de prevenir, retrasar, escalonar y/o dispersar la germinación de una cohorte de semillas por un período de tiempo prolongado, y por lo tanto dificulta el control de nabón debido a la falta de sincronización en la germinación. En conjunto, esto dificultaría el control de la maleza y el manejo del

banco de semillas en el suelo por falta de sincronización en la germinación, convirtiéndola en una especie difícil de controlar (Norsworthy *et al.*, 2012).

Blackshaw *et al.* (2002) demostraron que a medida que el rábano silvestre emergía más tarde con respecto al cultivo de canola, la reducción en el rendimiento fue cada vez menor, incluso llegó a no afectar cuando emergió 10 semanas más tarde. A pesar de esto, las malezas que emergieron más tarde generaron un aporte de semillas al banco del suelo, lo que puede generar problemas en temporadas de crecimiento posteriores. El manejo del banco de semillas de estos tipos de especies se torna más complejo, y un banco de semillas inicial grande se asocia positivamente con el riesgo de aparición de resistencia (Norsworthy *et al.*, 2012). Para mantener o reducir el banco de semillas del suelo, es necesario un manejo a largo plazo que combine prácticas culturales, mecánicas y químicas con el objetivo de reducir infestaciones en los años siguientes (Norsworthy *et al.*, 2012).

Un manejo efectivo de la resistencia a herbicidas requiere de la combinación de tácticas de manejo químicas y no químicas para diversificar la presión de selección en las poblaciones de malezas y minimizar la dispersión de los genes de resistencia. Por ejemplo, la rotación de cultivos ha probado generar menores riesgos de aparición de malezas resistentes, así como también lo ha demostrado la rotación de herbicidas con diferentes modos de acción y la mezcla de diferentes modos de acción de herbicidas en la misma aplicación (Norsworthy *et al.*, 2012). Para el caso del presente ensayo, la rotación de girasol con cultivos de gramíneas (trigo o cebada en cultivos invernales, o maíz como cultivo estival) facilitaría el control de *R. sativus* al posibilitar el uso de herbicidas hormonales como 2,4-D o MCPA, o inhibidores del fotosistema II como Bromoxinil. Otra opción puede ser el uso de cultivos resistentes a herbicidas de diferente modo de acción que la inhibición de la enzima AHAS, como puede ser maíz o soja RR, resistentes a inhibidores de la enzima EPSPS. También sería aconsejable no incluir en la rotación cultivos pertenecientes a la familia Brassicaceae, como puede ser la colza, en lotes con presencia de nabón, debido a que no existen alternativas químicas para el control de esta maleza en post-emergencia de los cultivos. Esto sería válido siempre y cuando no se realice la rotación en todos los casos con el mismo cultivo, ya que se generaría resistencia a los nuevos herbicidas que se apliquen,

generando una dificultad aún mayor ya que no habría forma de controlar las poblaciones de malezas con resistencias acumuladas. En el caso de querer realizar el cultivo de girasol, una opción más a tener en cuenta sería el manejo de malezas en preemergencia o, de ser posible, la elección de un lote libre (o con escasa presencia) de malezas de la familia Brassicaceae y, especialmente, malezas que presenten resistencia a herbicidas que tengan como modo de acción la inhibición de la enzima AHAS para girasoles CL.

CONCLUSIONES

El cultivo de girasol se vio afectado por la interferencia del nabón. La interferencia de hasta 16 plantas de nabón m^{-2} redujo la altura de planta, el número de hojas verdes, el área foliar y el diámetro de los capítulos, resultando en mermas en el rendimiento del cultivo de girasol que superaron el 12 %.

Las densidades crecientes de nabón incrementaron la producción de materia seca m^{-2} y el número de silicuas y semillas m^{-2} , a pesar de que estos parámetros disminuyeron al ser expresados por planta.

La maleza produjo aproximadamente entre 1000 y 5000 semillas m^{-2} , que en su totalidad pasan a formar parte del banco de semillas del suelo, dificultando la erradicación de la especie del lote y pudiendo generar problemas en futuras campañas.

Por otro lado, la densidad del nabón no generó variaciones en su altura de planta, el número de ramas, el número de semillas por silicua y el peso de las semillas.

BIBLIOGRAFÍA

AAPRESID (2017). Mapa de malezas. Disponible en www.aapresid.org.ar/rem/mapas-rem/

Agrow (2018). Top 20 Global Agrochemical Companies. Disponible en www.agrow.agribusinessintelligence.informa.com/-/media/agri/agrow/ag-market-reviews-pdfs/supplements/agrow_top20_2018_online.pdf

Aguirrezábal LA, Orioli GA, Hernández LF, Pereyra VR & Miravé JP (1996). Girasol: Aspectos fisiológicos que determinan el rendimiento. Unidad Integrada Balcarce. Buenos Aires.

Alonzi L (2019). Interferencia de *Raphanus sativus* en un cultivo de colza. Tesina de grado en Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Argentina.

Bajwa AA (2014). Sustainable weed management in conservation agriculture. *Crop Protection* **65**: 105–113.

Bedmar F (2010). Capítulo 7: Malezas del cultivo de girasol y su manejo, en: Producción de girasol. Dir. Balsategui J, Coord. Satorre E, Ed. Suárez M. Argentina. 53-58.

Bianchi M, Fleck N, Agostinetto D & Rizzardi M (2011). Interference of *Raphanus sativus* in soybean cultivars yield. *Planta daninha*, **20**: 783-792.

Blackshaw RE, Lemerle D, Mailer R & Young KR (2002). Influence of wild radish on yield and quality of canola. *Weed Science*, **50**: 344-349.

Cousens R (1985). An empirical model relating crop yield to weed and crop density and a statistical comparison with other models. *The Journal of Agricultural Science*, **105**: 513-521.

Curtis H, & Schnek A (2008). *Curtis. Biología*. Ed. Médica Panamericana.

- Duggleby R, McCurt J & Guddart LW (2008). Structure and mechanism of inhibition of plant acetohydroxyacid synthase. *Plant Physiology and Biochemistry*, **46**: 309-324.
- Eslami S, Gill G, Belloti B & McDonald G (2006). Wild radish (*Raphanus raphanistrum*) interference in wheat. *Weed Science*, **54**: 749-756.
- Esperbent C (2015). Malezas: el desafío para el agro que viene. *Revista de Investigaciones Agropecuarias, INTA* **41**, 235-240.
- Faccini D, Nisensohn L & Tuesca D (2012). Manual de reconocimiento y manejo de malezas. 34-35.
- FAOSTAT (2019). [Online]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en www.faostat.fao.org
- Hancock JF (2012). *Plant Evolution and the Origin of Crop Species*. 3th edn. Michigan State University, USA.
- Hashem A & Wilkins N (2002). Competitiveness and persistence of wild radish (*Raphanus raphanistrum* L.) in a wheat-lupin rotation. In *Proceedings 13th Australian weeds conference*. (Eds J Dodd, J Moore, H Spafford Jacob), 712-715.
- Heap, I (2019). The international Survey of Herbicide Resistant Weeds. Online. Internet. Disponible en www.weedscience.org
- Kraehmer H, Van Almsick A, Beffa R, Dietrich H, Eckes P, Hacker E *et al.* (2014). Herbicides as weed control agents: state of the art: II. Recent achievements. *Plant physiology*, **166**: 1132-1148.
- Labrada R, Caseley JC & Parker C (1996). Manejo de malezas para países en desarrollo (Vol. 120). *Food & Agriculture Org.*
- Marzocca A, Mársico OJ & Del puerto O (1976). Manual de Malezas. Editorial Hemisferio Sur. 8-11.

Norsworthy JK, Ward SM, Shaw DR, Llewellyn RS, Nichols RL, Webster TM *et al* (2012). Reducing the risks of herbicide resistance: best management practices and recommendations. *Weed Science*, **60**: 31-62.

Pandolfo CE, Presotto A, Poverene M & Cantamutto M (2013). Limited occurrence of resistant radish (*Raphanus sativus*) to AHAS-inhibiting herbicides in Argentina. *Planta Daninha*, **31**: 657-666.

Pandolfo CE, Presotto A, Moreno F, Dossou I, Migasso JP, Sakima E & Cantamutto M. (2016a). Broad resistance to acetohydroxyacid-synthase-inhibiting herbicides in feral radish (*Raphanus sativus* L.) populations from Argentina. *Pest management science*, **72**: 354-361.

Pandolfo CE (2016b). Caracterización agroecológica de poblaciones ferales brasicáceas con resistencia a herbicidas. Tesis de Doctor en Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Argentina.

Pandolfo C, Presotto A & Cantamutto M (2018). *Raphanus sativus* L., *Raphanus raphanistrum* L. En Malezas e invasoras de la Argentina. III. 625-636. Editado por Osvaldo A. Fernández, Eduardo Leguizamón & Horacio A. Acciaresi. Bahía Blanca: Editorial de la Universidad Nacional del Sur. EdiUNS.

Putnam DH, Oplinger ES, Hicks DR, Durgan BR, Noetzel DM, Meronuck RA, Doll JD & Schulte EE (1990). Sunflower. Alternative field crops manual. University of Minnesota and University of Wisconsin. St. Paul, MN.

Sala CA, Bulos M, Altieri E & Ramos ML (2012). Genetics and breeding of herbicide tolerance in sunflower. *Helia*, **35**: 57-70.

Schneider AA & Miller JF (1981). Description of sunflower growth stages. *Crop Science*, **21**: 901-903.

Scursoni JA, Gigón R, Martín AN, Vigna M, Leguizamón ES, Istilart C & López R (2014). Changes in weed communities of spring wheat crops of Buenos Aires province of Argentina. *Weed Science*, **62**: 51-62.

Snow AA & Campbell LG (2005). Can feral radishes become weeds. *Crop ferality and volunteerism*, 193-208.

Swanton CJ, Nkoa R & Blackshaw RE (2015). Experimental methods for crop–weed competition studies. *Weed Science*, **63**: 2-11.

Tan S, Evans RR, Dahmer ML, Singh BK & Shaner DL (2005). Imidazolinone-tolerant crops: history, current status and future. *Pest Management Science*, **61**: 246-257.

USDA (2007). Annual sunflower *Helianthus annuus* L. Plant Symbol = HEAN3. Disponible en www.plants.usda.gov/plantguide/pdf/cs_hean3.pdf

Varanasi A, Prasad PV & Jugulam M (2016). Impact of climate change factors on weeds and herbicide efficacy. In *Advances in agronomy*, **135**: 107-146. Academic Press.

Vercellino RB, Pandolfo CE, Breccia G, Cantamutto M & Presotto A (2018). AHAS Trp574Leu substitution in *Raphanus sativus* L.: screening, enzyme activity and fitness cost. *Pest management science*, **74**: 1600-1607.

Vercellino RB, Pandolfo CE, Cerrota A, Cantamutto M & Presotto A (2019). The roles of light and pericarp on seed dormancy and germination in feral *Raphanus sativus* (Brassicaceae). *Weed Research*, **59**: 396–406.

WSSA (2016). Do you have a weed, noxious weed, invasive weed or “superweed”? Simple distinctions make all the difference. Disponible en www.wssa.net/wp-content/uploads/WSSA-Weed-Science-Definitions.pdf

Yu Q & Powles SB (2014). Resistance to AHAS inhibitor herbicides: current understanding. *Pest Management Science*, **70**: 1340-1350.

Zimdahl RL (2007). *Fundamentals of weed science*, 3° ed. Elsevier Inc, USA.

ANEXO



Imagen 1. Sitio experimental. La imagen fue tomada una vez finalizada la siembra del cultivo y la maleza.



Imagen 2. Emergencia del girasol.



Imagen 3. Estadio V4 del girasol. La imagen fue tomada luego de realizar el raleo de plantas, tanto del cultivo como del nabón.



Imagen 4. Floración de nabón (izquierda) y R1 de girasol (derecha).



Imagen 5. Estadio R3 en girasol y fructificación de nabón.



Imagen 6. Estadio R5 de girasol y maduración de frutos de nabón.



Imagen 7. Estadio R6 de girasol. La imagen fue tomada el día que se midió la altura de plantas, el ancho foliar de las tres hojas centrales y el número de hojas verdes de tres plantas vecinas dentro de la línea central de cada unidad experimental.



Imagen 8. Estadio R8 del girasol (izquierda) y frutos maduros de nabón (derecha).