

“CARRYOVER” del herbicida fomesafen en una rotación de cultivos de la región semiárida pampeana central

Cazenave, M. L.¹; Montoya, J. C.²; Porfiri, C. C.²; Azcarate, M. P.²; y Yannicari, M. E.³

¹Asesora privada., ²INTA EEA Anguil., ³Chacra Experimental Integrada Barrow (MDA-INTA). CONICET. Facultad de Agronomía UNLPam.
mluzcazenave@gmail.com

Citar como: Cazenave et al. (2024) "Carryover" del herbicida fomesafen en una rotación de cultivos de la región semiárida pampeana central. Malezas 11, 64-79.

RESUMEN

Fomesafen es un herbicida residual que puede afectar a los cultivos de la rotación mediante el “carryover”, que se define como la persistencia de residuos fitotóxicos en el suelo que alteran el establecimiento y la producción de cultivos sensibles. Mediante bioensayos se evaluó el “carryover” sobre girasol, maíz, centeno y triticale y se estudió a campo sobre centeno y triticale. En un suelo franco arenoso se sembró soja y se aplicaron en preemergencia los tratamientos de fomesafen (Flex SL 25%; 0x: 0, 1x: 250 y 2x: 500 g i.a. ha⁻¹) en DBCA con cuatro repeticiones. Las macetas para los bioensayos se rellenaron con muestras de suelo tomadas a los 23 días desde aplicación (DDA), 127, 194 y 274 DDA y se llevaron a cámara de crecimiento. Se realizaron evaluaciones visuales de daño respecto al control (0x) según la escala de EWRC (“European Weed Research Council”) y se registró el porcentaje de emergencia, la altura de las plantas (cm) y el peso seco de la biomasa aérea (PSA, g). El ensayo de campo tuvo un diseño experimental de franjas en BCA en

arreglo factorial Cultivo x Dosis. El triticale fue el cultivo más tolerante con un requerimiento de 75 DDA y 180 mm acumulados. El centeno requirió 135 DDA y lluvias superiores a 267,25 mm. Para el caso de girasol y maíz, aplicación de 250 g i.a. ha⁻¹, 274 DDA y 288 mm acumulados resulta un escenario riesgoso para la siembra por posible manifestación de “carryover”.

Palabras clave. fitotoxicidad, herbicida, persistencia, bioensayos, cultivos de cobertura.

ABSTRACT

Fomesafen is a residual herbicide that can affect crops in the rotation through the carryover mechanism. It is defined as the persistence of phytotoxic residues that alter the establishment and production of sensitive crops. A bioassay was carried out to evaluate the effect of carryover, on sunflower, corn, rye, and triticale, and in a field experiment on rye and triticale. The trial was conducted in a sandy loam where soybean was sown. Fomesafen (Flex SL 25%) treatments were



applied in preemergence on 19/12/2018 (0x: 0; 1x: 250 g i.a ha⁻¹; and 2x: 500 g i.a ha⁻¹) in a randomized CBD with four replications. Soil samples were taken at 23 days after application (DDA); 127; 194; and 274. The bioassays were done with rye, triticale, sunflower and corn and conducted in a growth chamber. Visual damage was estimated according to the EWRC (European Weed Research Council); seedlings emergence percentage, plant height (cm) and dry weight of the aerial biomass (PSA, g) were registered. The field trial was sowed with rye and triticale. The experimental design was in strips in randomized CB with a Crop x Rates factorial arrangement. Triticale was the most tolerant crop with a minimum requirement of 75 DAA and approximately 180 mm accumulated. Rye required 135 DAA and accumulated rainfall greater than 267,25 mm. For sunflower and corn treated with 250 g a.i. ha⁻¹, 274 DAA and 288 mm accumulated, present a high risk of carryover.

Keywords: phytotoxicity, herbicide, persistence, bioassays, cover crop.

INTRODUCCIÓN

Fomesafen (5- [2-cloro-4- (trifluorometil) fenoxi] -N- [metilsulfonil]-2-nitrobenzamida) es un herbicida inhibidor de la protoporfirinogeno oxidasa (PPO), perteneciente a la familia química difeniléteres, que provoca un bloqueo en la síntesis de clorofila y acumulación de especies reactivas de oxígeno en las células vegetales. Puede tener dos tipos de uso, aplicación foliar o de contacto en postemergencia de la maleza y aplicación al suelo o sistémico, lo que le brinda residualidad en preemergencia de la maleza.

Este herbicida se encuentra registrado para los cultivos de soja, maní y poroto (SENASA 2023). Es selectivo para el control de malezas de hoja ancha, especialmente para el control de malezas de la familia Amaranáceas resistentes a glifosato (Bellinder *et al.*, 2003; Wilson, 2005). Está clasificado toxicológicamente en categoría III, moderadamente tóxico, del grupo E. Posee moderada solubilidad en agua (50 mg L⁻¹), baja presión de vapor (<10⁻⁴ Pa), y bajo coeficiente de partición octanol/ agua (log K_{ow} -1.2) (Oliveira Júnior *et al.*, 2009).

Existen antecedentes de daños en la rotación

de cultivos por “carryover” (Tuesca & Papa, 2016). Este fenómeno se refiere a la presencia de residuos bioactivos de herbicidas en el suelo en concentraciones fitotóxicas que afectan el establecimiento y producción de cultivos sensibles de la rotación. Cuando los residuos de herbicidas permanecen bioactivos un periodo más prolongado que la estación de crecimiento del cultivo de interés o luego de un barbecho químico, pueden producir daños en los cultivos de la rotación. El “carryover” depende de la susceptibilidad del cultivo y el potencial de producir daño se relaciona con la persistencia de los herbicidas en el suelo, las dosis, las propiedades del suelo como MO, textura, pH y las condiciones meteorológicas ocurridas luego de la aplicación (Mendes *et al.*, 2023). La actividad microbiana es generalmente la vía de degradación más importante para la mayoría de los herbicidas en el suelo, acentuándose con la humedad y la temperatura (Parte *et al.*, 2017). Siendo así, la degradación se acelera en regiones cálidas y húmedas, y se lentifica en condiciones secas y frías (Sur, 2014). Rector *et al.* (2019) explica que los herbicidas residuales aplicados en cultivos estivales tienen el potencial de dañar los cultivos de cobertura anuales subsiguientes, sin embargo, hay escasa información disponible. La guía de productos fitosanitarios de CASAFE (2023), señala la restricción de la siembra de sorgo a los 12 meses luego de aplicar el herbicida fomesafen e indica que, en rotaciones con girasol, maíz, o cereales de invierno puede presentarse fitotoxicidad en la fase inicial de los cultivos. Existen antecedentes de fitotoxicidad en sorgo luego de 100 días (Santos *et al.*, 2006). En la década del 90, aproximadamente 160 ha de maíz dulce resultaron dañadas por “carryover” de residuos de fomesafen en suelos de New York (Rauch *et al.*, 2007).

La persistencia del herbicida en el suelo está descrita por la vida media (DT₅₀), parámetro utilizado para medir el tiempo promedio que se tarda en perder la mitad del herbicida aplicado a través de todas las vías posibles que actúan en el suelo (Anderson *et al.*, 1989). Cuanto mayor sea la vida media, más tiempo permanecerá el herbicida en concentraciones lo suficientemente altas como para afectar el crecimiento de la planta y mayor será el riesgo potencial de afectar a los cultivos en rotación (Monaco *et al.*, 2002). Comparado con otros herbicidas del grupo qui-



Girasol bioensayos



Maices bioensayos



Triticale bioensayo

mico difenileter, fomesafen tiene la mayor persistencia en el suelo con un tiempo DT_{50} estimado en 100 días.

El fomesafen es un ácido débil (Senseman, 2007) con un pK_a de 2,83 lo cual implica que se ioniza a medida que aumenta el pH. Posee un bajo coeficiente de adsorción normalizado con el carbono orgánico, $K_{oc} = 50$ (Lewis *et al.*, 2016) y una alta movilidad en el suelo, determinada por los tipos de suelo (Costa *et al.*, 2015). La adsorción de fomesafen al suelo es débil y se ve afectada por múltiples propiedades del suelo. Los antecedentes indican que el pH del sue-

lo tiene mayor importancia que la MO para la adsorción (Guo *et al.*, 2000). Los datos sugieren que los suelos con un pH más bajo y un mayor contenido de arcilla tienen menos probabilidades de producir daños en los cultivos debido a una mayor adsorción de fomesafen (Li *et al.*, 2019).

El fomesafen se degrada más lentamente en condiciones aeróbicas, en comparación con las condiciones anaeróbicas, por lo que una menor humedad del suelo puede aumentar la persistencia del herbicida (Cobucci *et al.*, 1998; Shaner, 2014). Por ejemplo, tiene una DT_{50} menor a tres semanas en condiciones

Cuadro 1. Índice de fitotoxicidad según la escala de evaluación europea, método EWRC (European Weed Research Council)

Índice	Fitotoxicidad causada por el herbicida sobre el cultivo
1	Sin efecto
2	Síntomas muy leves
3	Síntomas leves, efectos reversibles.
4	Síntomas moderados
5	Fuertes o marcados síntomas
6	Síntomas severos
7	Síntomas muy severos
8	Síntomas extremadamente severos
9	Muerte de las plantas

anaeróbicas y hasta 12 meses en condiciones aeróbicas (Vencill, 2002). La variabilidad del DT_{50} es el factor que preocupa a la hora de pensar en el “carryover”.

Las mediciones de contaminantes por métodos analíticos son importantes, sin embargo, suelen requerir metodologías sofisticadas. Para ello, se utilizan especies bioindicadoras que aportan información de los efectos de la contaminación sobre los organismos (Klump et al., 2002). Un bioensayo es un método biológico sencillo, preciso, rápido y económico que brinda información referida a residuos de herbicidas en el suelo. Los

bioensayos permiten detectar concentraciones de herbicidas que resultan fitotóxicas en el establecimiento de las plantas. La especie vegetal que se utilice será la planta bioindicadora y en una rotación es el cultivo de interés. Los herbicidas, dependiendo de sus efectos fisiológicos y modos de acción, se expresan con diferente sintomatología. La interpretación de los bioensayos requiere del conocimiento de los síntomas característicos de los herbicidas que los provocan.

El objetivo del trabajo fue estudiar el efecto del “carryover” de fomesafen mediante la metodología del bioensayo sobre girasol (*Helianthus annuus* L.), maíz (*Zea mays* L.), centeno (*Secale cereale*) y triticale (*xTriticosecale*) como posibles especies en una rotación de cultivos en la región semiárida pampeana y paralelamente mediante un ensayo a campo sobre centeno y triticale.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Estación Experimental Agropecuaria Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas” del INTA (36° 30' Lat. S; 63° 59' Long. O y a 165 m s.n.m.) se estableció un ensayo de campo. El suelo es Haplustol éntico con las siguientes características a 0-10 cm de profundidad: arcilla 8%, limo 40%, arena 52%, textura franco-arenosa con un contenido de

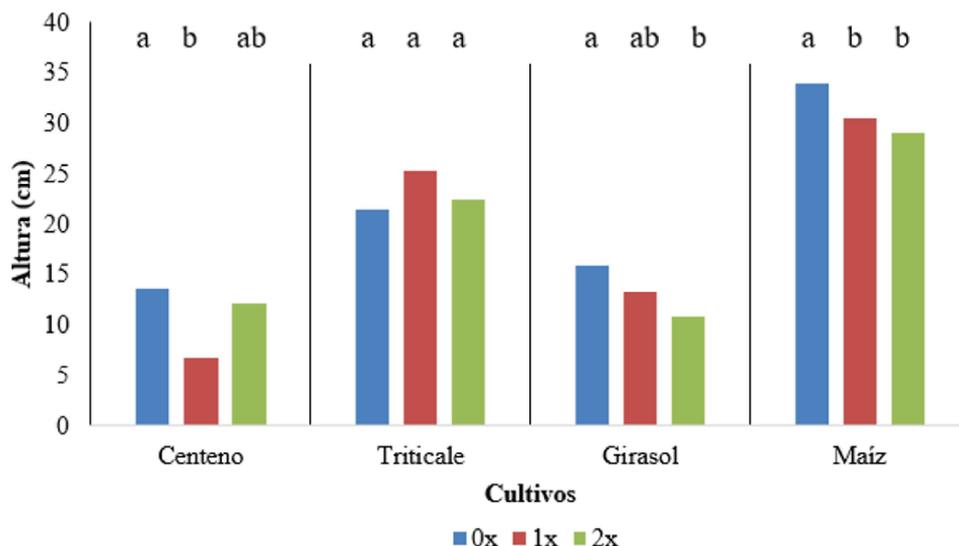


Figura 1. Altura de cada cultivo según las dosis de herbicida a los 127 DDA. Las letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamiento para cada uno de los cultivos ($p < 0,05$).

Cuadro 2. Registro fotográfico de los síntomas de fitotoxicidad manifestados por los cultivos para los valores 1, 3 y 8 de la escala EWRC.

Fitotoxicidad causada por el herbicida sobre el cultivo		
1. Sin efecto.		
		
Maíz	Girasol	Centeno/Triticale
3. Síntomas leves, efectos reversibles.		
		
Maíz	Girasol	Centeno/Triticale
8. Síntomas extremadamente severos.		
		
Maíz	Girasol	Centeno/Triticale

MO de 2%, pH 6,3, fósforo (Bray & Kurtz) 17,4 mg kg⁻¹ y la capacidad de intercambio catiónico 15,0 meq 100 g⁻¹. Los datos meteorológicos se originaron en el observatorio agrometeorológico de la EEA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas".

El 14/12/2018 se sembró soja (DM4309) y el 19/12/2018 en preemergencia del cultivo se aplicaron los tratamientos de herbicida. Se utilizó el herbicida fomesafen de marca comercial Flex SL (SYNGENTA AGRO) con una concentración de ingrediente activo (i.a.) de 25%. Las dosis de los tratamientos fueron las siguientes: 0x equivalente al tratamiento control sin herbicida, 1x equivalente a 250 g i.a. ha⁻¹ y 2x equivalente a 500 g i.a. ha⁻¹. La aplicación se realizó con una mochila manual, con pastillas deflectoras de abanico plano Teejet TK 2,5 con un volumen de caldo erogado de 59 L ha⁻¹ y tamaño de gota gruesa (ASAE S572). Cada unidad experimental fue de 2,8 m x 35 m en un diseño en bloques completos aleatorizados con cuatro repeticiones. Las condiciones meteorológicas al momento de la aplicación fueron: velocidad del viento 8,9 km h⁻¹, temperatura 28,6 °C y humedad relativa 64,1%.

Bioensayos

Para la realización de los bioensayos se tomaron muestras compuestas (30 submuestras)

de 1,5 kg de suelo por cada parcela con muestreador a 0-10 cm de profundidad. Las muestras de suelo se conservaron en cámaras de frío a -17 °C hasta el armado de las macetas.

Los muestreos se realizaron a los 23 días desde aplicación (DDA) (11/01/2019), 127 DDA (25/04/2019), 194 DDA (1/07/2019) y 274 DDA (19/09/2019). Las lluvias diarias acumuladas desde aplicación hasta cada fecha de muestreo fueron: 35,25 mm; 190,75 mm; 267,25 mm y 288,25 mm, respectivamente. Los bioensayos incluyeron las siguientes especies como posibles cultivos en la rotación: girasol (*Helianthus annuus*), maíz (*Zea mays*), centeno (*Secale cereale*) y triticale (*xTriticosecale*).

Se utilizaron como macetas, potes plásticos de 11 cm de diámetro x 11 cm de altura con una capacidad aproximada de 750 ml, perforados en la base para favorecer el drenaje. Las macetas se rellenaron con 700 gr de suelo tamizado con una malla de 1 cm de forma de homogeneizar la muestra. Según la especie a evaluar se sembraron 8 semillas de centeno Don Norberto, 8 semillas de triticale Don Santiago, 6 semillas de girasol Argensol 54, 6 semillas de maíz SRM 6600 VT3P, a una profundidad de 2 cm. Luego de la emergencia se registró el número de plantas, posteriormente se raleó y se ajustó

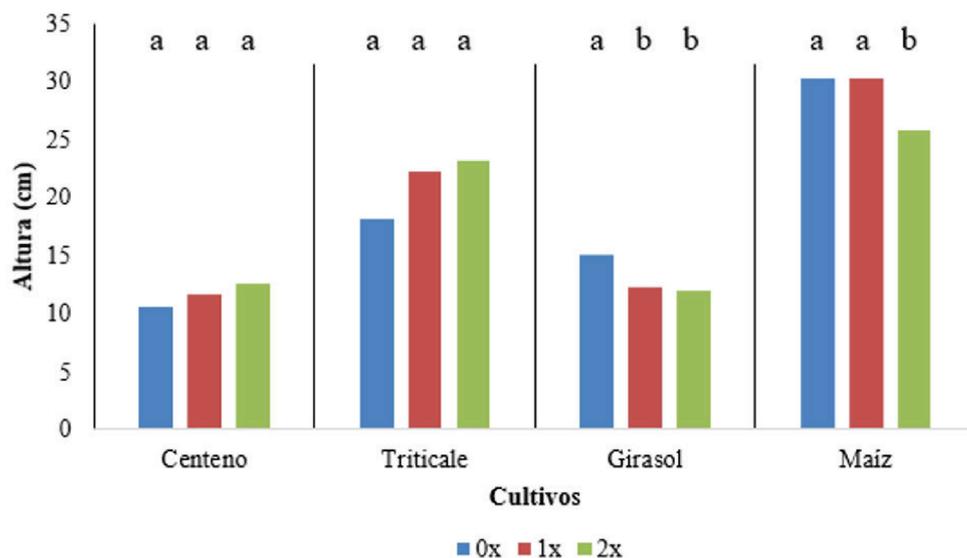


Figura 2. Altura de cada cultivo según las dosis de herbicida a los 274 DDA. Las letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamiento para cada uno de los cultivos ($p < 0,05$).

la densidad a 2 plántulas por maceta en el caso de girasol y maíz, y 3 plantas para centeno y triticale.

Los bioensayos se condujeron en cámara de crecimiento, en condiciones de luz y temperatura controlada (12 h de luz y una alternancia de temperatura nocturna de 18 °C y diurna de 25 °C). La humedad del suelo se

mantuvo cercana a capacidad de campo con riegos periódicos.

Aproximadamente entre los 10 y 15 días de armadas las macetas, las gramíneas contaban con dos hojas desplegadas y el girasol con sus cotiledones desplegados, por lo tanto, se procedió a realizar evaluaciones visuales para la estimación del daño res-

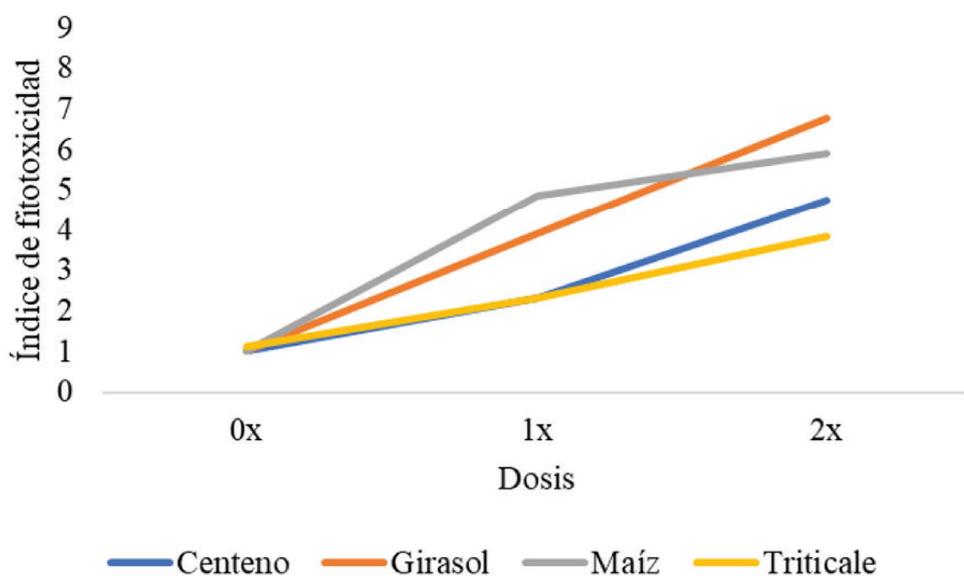


Figura 3. Índice de fitotoxidad para los diferentes cultivos y las dosis utilizadas.

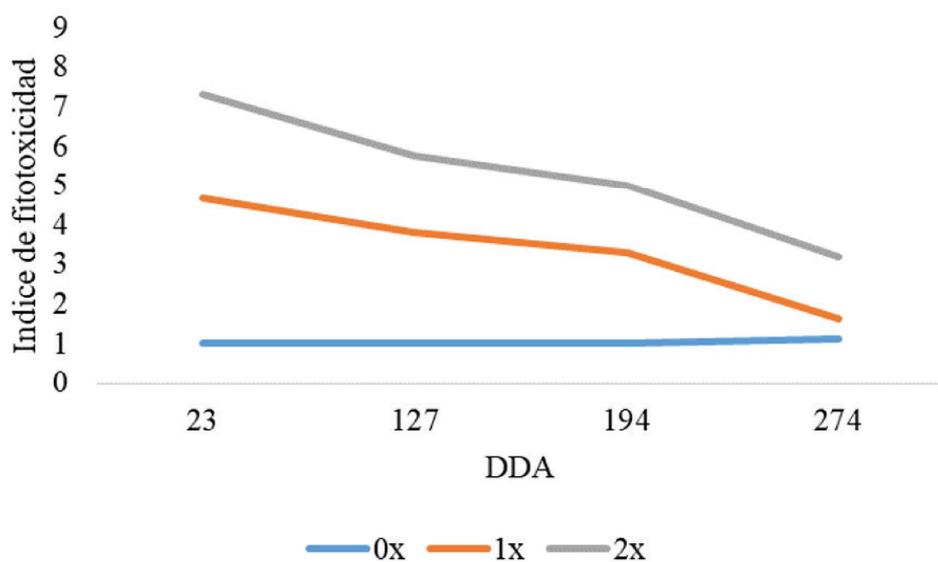


Figura 4. Evolución de los índices de fitotoxidad de las dosis para las especies bioindicadoras, según los días desde aplicación (DDA).

pecto al tratamiento control (0x) según la escala de evaluación del método propuesto por EWRC (“European Weed Research Council”). Esta variable se expresa según el índice de fitotoxicidad que se describe en el Cuadro 1. Se tomaron registros fotográficos de los síntomas de fitotoxicidad desarrollados para cada cultivo (Cuadro 2). Luego se desarmaron las macetas para determinar altura de las plantas (cm) y peso seco de la biomasa aérea (PSA, g).

La capacidad de la cámara de crecimiento impuso un límite al diseño experimental. Por ese motivo, cada fecha de muestreo de los bioensayos se preparó en forma independiente. Por otra parte, el período de crecimiento en días de los bioensayos varió resultando en plantas de diferente tamaño (peso y altura) limitando hacer comparaciones de estas variables entre fechas.

Se calculó el porcentaje de plántulas emergidas. Junto con las variables PSA, índice de fitotoxicidad y altura se analizaron con ANOVA y test de diferencia de medias (LSD de Fisher) empleando el programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2020). Los datos del porcentaje de emergencia y el índice de fitotoxicidad se analizaron según un arreglo factorial evaluando posibles interacciones de los factores Cultivos x Dosis x DDA. En

este caso, se empleó el procedimiento GLM y se analizaron las interacciones triples y dobles mediante la sentencia “slice” (SAS Institute Inc., 2015).

Por otra parte, se ajustó una curva basada en un modelo log-logístico de cuatro parámetros propuesto por Streibig (1988) para determinar el tiempo mínimo requerido para la siembra de cada cultivo y dosis evaluada. La ecuación 1 es la expresión matemática que explica el índice de fitotoxicidad observado según los DDA (x) para cada una de las dosis estudiadas. Se ajustaron los parámetros, donde C = límite inferior, D = límite superior, b = pendiente, y I3= es el tiempo expresado en DDA. Un índice de fitotoxicidad igual a 3 caracteriza síntomas leves y efectos reversibles. El ajuste se realizó en Excel por aproximaciones sucesivas hasta lograr la menor suma de cuadrado y el estadístico utilizado para evaluar el grado de ajuste fue el coeficiente de determinación (CD, Ecuación 2) para el cual el valor 1 indica un ajuste perfecto (Loague & Green, 1991).

$$= C + \frac{D - C}{1 + \exp[b(\log(x) - \log(I_3))]} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$CD = \frac{\sum(O_i - \bar{O})^2}{\sum(P_i - \bar{O})^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

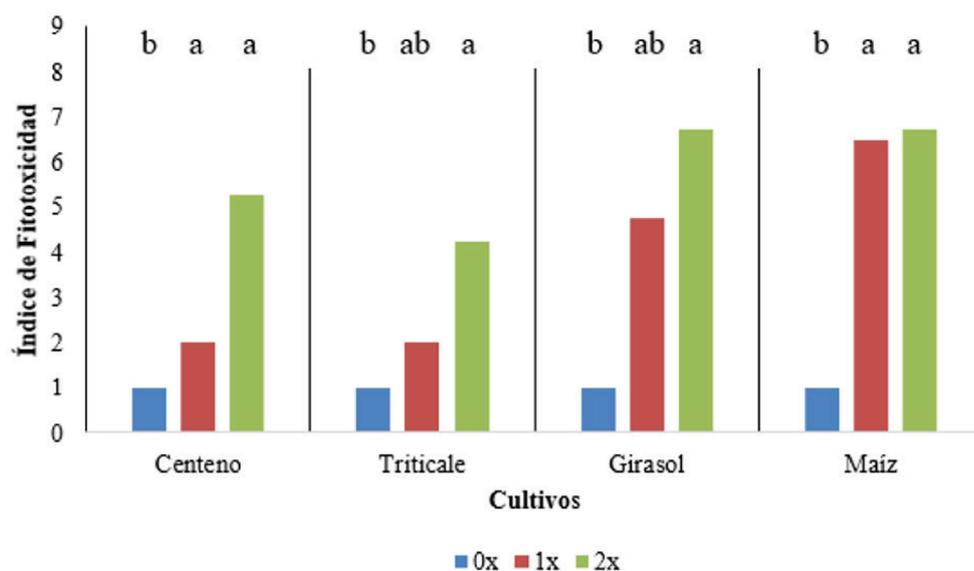


Figura 5. Índice de fitotoxicidad de cada cultivo según las dosis de herbicida a los 127 DDA. Las letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamiento para cada uno de los cultivos ($p < 0,05$).

Ensayo de campo

Luego de la cosecha de la soja (25/03/2019), se sembraron centeno Don Norberto y triticale Don Santiago (3/04/2019, 105 DDA). El diseño experimental fue en franjas en bloques completos aleatorizados con cuatro repeticiones donde la unidad experimental fue de 2,8 m x 4,70 m con arreglo factorial Cultivo x Dosis. La densidad de siembra fue de 126 plantas m⁻² en centeno, y de 91 plantas m⁻² en triticale. Las precipitaciones acumuladas desde la aplicación de los tratamientos de herbicidas en la soja hasta la siembra de los cereales fueron 179,6 mm y hasta la cosecha 421,2 mm.

Cuando el centeno y el triticale tenían desarrollado un macollo, correspondiente al estadio fenológico de Z2 (28/05/2019), se registró la densidad (plantas m⁻²) y se realizó una primera estimación visual según la escala de evaluación europea que sigue el método EWRC (Cuadro 1). El día 7/06/2019 se realizó una aplicación de 2,4-D Advance 400 cc ha⁻¹ + Dicamba 100 cc ha⁻¹ para el control de malezas de hoja ancha emergidas, antes del estado de doble arruga, correspondiente a Z3 según la escala de Zadoks *et al.* (1974), que puede utilizarse en los cultivos analizados por su analogía con trigo, respecto a los estadios fenológicos. El día 8/10/2019 se realizó una segunda esti-

mación visual de fitotoxicidad, cuando el centeno se encontraba en antesis (Z6), y el triticale en encañazón (Z5). El día 2/1/2020 se cosecharon tres m de largo por tres surcos de siembra a 17,5 cm (equivalente a 1,75 m²) por parcela y se estimó el rendimiento en kg ha⁻¹ correspondiente a cada cultivo.

Para el análisis de las variables densidad (pl m⁻²), índice de fitotoxicidad y rendimiento (kg ha⁻¹) se empleó el procedimiento GLM, test de diferencias de medias Duncan, y las interacciones mediante la sentencia "slice" (SAS Institute Inc., 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bioensayos

El porcentaje de emergencia mostró efectos significativos Cultivos x DDA ($p=0.06$) y Tratamientos ($p<0.05$). Solo el porcentaje de emergencia del cultivo de centeno se vio afectado negativamente en las cuatro fechas de muestreo: 23 DDA = 45,14%, 127 DDA = 26,74%, 194 DDA = 28,82% y 274 DDA = 35,07%. Respecto a los tratamientos 0x (80,29%) y 1x (81,20%) que no se diferenciaron entre sí, mientras que 2x disminuyó el porcentaje de plántulas emergidas (76,24%).

El centeno y el triticale no mostraron dife-

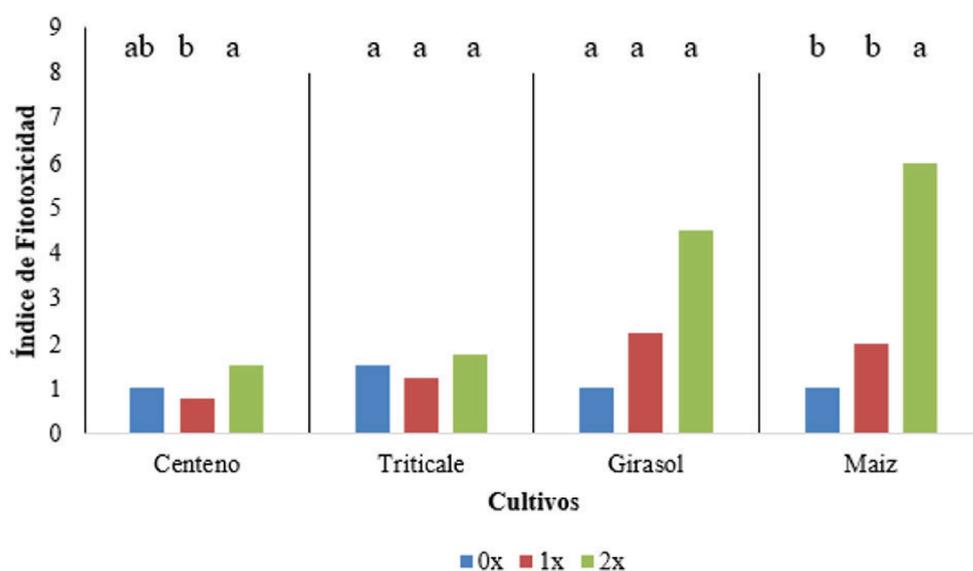


Figura 6. Índice de fitotoxicidad de cada cultivo según las dosis de herbicida a los 274 DDA. Las letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamiento para cada uno de los cultivos ($p<0,05$).

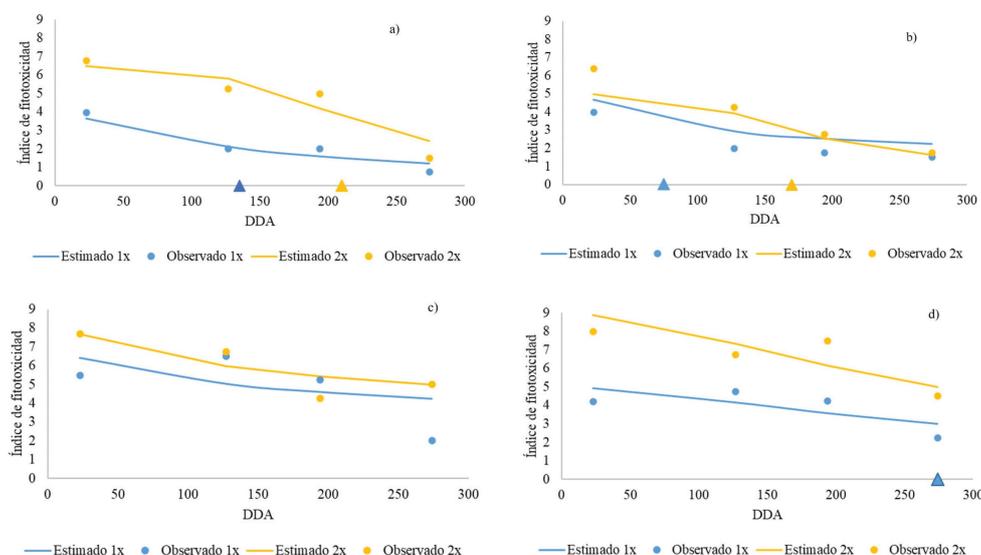


Figura 7. Ajuste del modelo log-logístico del índice de fitotoxicidad en función de DDA para determinar el tiempo mínimo requerido para la siembra. Los triángulos representan el tiempo mínimo requerido para la siembra a 1x (celestes) y a 2x (amarillos) para un índice de fitotoxicidad de valor 3. a) centeno; b) triticale, c) maíz; d) girasol.

rencias significativas en el PSA según las dosis en ninguno de los muestreos. Girasol y maíz a los 23 DDA tampoco mostraron diferencias. A 127 DDA se observó que el PSA del girasol tuvo diferencias significativas entre 0x y 2x ($p < 0,05$). El maíz tuvo diferencias significativas resultando en menor PSA de 2x ($p < 0,05$). A los 194 DDA el PSA del girasol y maíz tuvo diferencias significativas entre los tratamientos 1x y 2x respecto a 0x ($p < 0,05$). A 274 DDA no hubo diferencias del PSA de ninguno de los cultivos.

Con respecto a la altura, a los 23 DDA, el centeno mostró diferencias entre los tratamientos 1x y 2x ($p < 0,05$) y girasol tuvo diferencias entre el tratamiento 1x y 2x respecto a 0x ($p < 0,05$). El maíz y el triticale tuvieron diferencias significativas para el tratamiento 2x, resultando en una altura menor que los tratamientos 0x y 1x. A los 127 DDA, el centeno tuvo diferencias significativas con respecto a la altura entre el tratamiento 1x y 0x ($p < 0,05$). Para el caso de girasol, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos 2x y 0x ($p < 0,05$). En maíz, 1x y 2x se diferenciaron del control 0x. En triticale no se observaron diferencias entre los tratamientos (Figura 1). A los 194 DDA girasol y maíz tuvieron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre 0x y los tratamientos

1x y 2x. A los 274 DDA el girasol mostró diferencias significativas entre el tratamiento 1x y 2x respecto al control 0x ($p < 0,05$) y el maíz, tuvo diferencias significativas respecto al tratamiento 2x ($p < 0,05$) (Figura 2). Centeno y triticale no tuvieron diferencias entre los tratamientos en ninguna de las dos últimas fechas de muestreo.

De acuerdo con la estimación visual de daño por cultivo según la escala EWRC (Cuadro 1) y en función de los síntomas observados, el girasol y el maíz expresaron clorosis de las nervaduras, bronceado hasta necrosis y menor crecimiento. El girasol manifestó además retorcimiento del tallo. El triticale y el centeno expresaron clorosis, adelgazamiento del tallo hasta necrosis, y menor crecimiento. A modo de ejemplo se muestran fotos asociadas a tres niveles de índice de fitotoxicidad: 1) sin efecto; 3) síntomas leves y efectos reversibles, y 8) síntomas extremadamente severos (Cuadro 2).

Los índices de fitotoxicidad resultantes de la evaluación visual del daño no mostraron interacción significativa triple (Cultivos x DDA x Dosis). Mientras que sí hubo interacción significativa DDA x Dosis y Cultivos x Dosis ($p < 0,05$). Independientemente de los DDA, el comportamiento de los cul-

tivos muestra que, al aumentar la dosis utilizada, aumentan los niveles de fitotoxicidad. Los cereales de invierno muestran el mismo comportamiento entre sí, ofreciendo mayor tolerancia que girasol y maíz (Figura 3).

Independientemente de los cultivos, los índices de fitotoxicidad decrecen según los DDA. Para cada fecha de muestreo, los índices de fitotoxicidad de 2x fueron mayores y se diferenciaron significativamente de 1x (Figura 4).

En relación con los índices de fitotoxicidad, a los 23 DDA el centeno presentó diferencias significativas de los tratamientos 0x y 1x respecto a 2x ($p<0,05$). El triticale tuvo diferencias entre cada uno de los tratamientos ($p<0,05$). El girasol en el tratamiento 2x mostró síntomas extremadamente severos presentando diferencias respecto a 0x ($p<0,05$); y el maíz mostró diferencias significativas para 1x y 2x respecto al control 0x ($p<0,05$). En general, cada uno de los cultivos mostró aumento de la fitotoxicidad conforme aumentaron las dosis.

A 127 DDA, el centeno presentó diferencias significativas entre 0x y los tratamientos 1x y 2x ($p<0,05$). El triticale y el girasol tuvieron diferencias significativas ($p<0,05$) entre

0x y 2x. El maíz tuvo diferencias significativas de 0x con respecto a 1x y 2x ($p<0,05$) (Figura 5).

A los 194 DDA, el índice de fitotoxicidad de centeno en la dosis de 2x se diferenció significativamente de 0x y 1x, alcanzando un índice de valor 5 asociado a fuertes o marcados síntomas. Girasol y triticale mostraron diferencias significativas entre los tres tratamientos, alcanzando un valor máximo para girasol de 7,5 en 2x, y para triticale de 2,75 ($p<0,05$). Maíz tuvo diferencias entre 0x y 1x ($p<0,05$).

A 274 DDA, se observó que el centeno no mostró diferencias entre tratamientos. Maíz tuvo diferencias entre 2x respecto a 0x y 1x ($p<0,05$). Girasol y triticale no tuvieron diferencias significativas entre los tratamientos. Sin embargo, en girasol, los valores promedio crecieron conforme aumentaron las dosis. El tratamiento 1x tuvo un valor promedio de 2,25 y un desvío estándar de 1,5. Por su parte, el tratamiento 2x alcanzó un valor promedio de 4,5 y un desvío de 3 (Figura 6). Este tipo de comportamiento, en cuanto a la expresión de la sintomatología debido a “carryover”, es común en lotes comerciales, pudiendo observarse, cultivos sumamente desuniformes en su expresión sintomatológica y en su estado de crecimiento y desarrollo. Esto puede estar relacionado con la diferente bioactividad de los residuos de herbicidas a nivel de micrositios, dado que, están sujetos a diferentes procesos fisicoquímicos de adsorción, desorción y degradación.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el triticale fue el cultivo más tolerante a los residuos de fomesafen en el suelo, presentando efectos negativos sobre la altura sólo



Autores del trabajo



a los 23 DDA en la dosis 2x. El centeno tuvo disminuciones en la altura con 1x y 2x hasta los 127 DDA. Por otro lado, el girasol a los 274 DDA aún mostraba efectos negativos de 1x y 2x sobre la altura, mientras que maíz sólo de 2x.

En síntesis, se observó “carryover” de fomesafen sobre los cultivos estudiados en un suelo franco-arenoso con 2% de MO y 288 mm acumulados hasta el último muestreo, variando su severidad de acuerdo con las dosis. Whalen *et al.* (2019) también verificaron que fomesafen solo o en mezclas provocó diferentes niveles de daño en la rotación de cultivos al ser comparado con otros herbicidas residuales usados en el cultivo de soja.

En el presente trabajo, la sensibilidad de los cultivos, en orden creciente fue: triticale < centeno < maíz = girasol. A la última fecha de muestreo (274 DDA) no se alcanzó a discriminar claramente cual, de los dos cultivos, maíz o girasol, es el más sensible o tolerante. En otros estudios, Cornelius *et al.* (2017) y Rector *et al.* (2019) encontraron que fomesafen provocó una severa reducción de la biomasa de los cultivos, afectando principalmente al *Raphanus sativus*, aunque, contrario a los resultados de este estudio, el cultivo de centeno no se vio afectado negativamente. Cobucci *et al.* (1998) describieron la sensibilidad de diferentes cultivos según el siguiente orden: arroz < mijo < maíz < sorgo. El período mínimo requerido, para la dosis de 250 g i.a. ha⁻¹, a fin de que no se manifiesten daños, fue de 69 a 132 días para el caso de maíz y 114 a 179 días para sorgo. En ese caso, la menor persistencia se relacionó con el suelo de mayor contenido de MO (2,1% vs 0,7%), menor contenido de arcilla (43 vs 10%), y las diferencias en el registro de las precipitaciones. Por ejemplo, para esas localidades el sorgo se siembra a los 75 días de la cosecha de soja, por lo tanto, existe riesgo de “carryover”. Mientras que para maíz el riesgo resulta menor, por su menor sensibilidad y por la fecha postergada de siembra, aunque se vería relacionada con las precipitaciones registradas. Cabe destacar que las mínimas precipitaciones registradas a los 75 DDA fueron de 289 mm. Un trabajo previo de Cobucci & Prates (1997), demostró que, si bien a los 10 días de emergido, el maíz mostró síntomas de fitotoxicidad, el cultivo sembrado 65 DDA tuvo la

posibilidad de recuperarse sin ser afectado el rendimiento. Estos ensayos fueron realizados en suelos con un contenido de arcilla entre 61 y 71% y 3 % de MO. Otro trabajo (Grint *et al.*, 2022), indica que utilizando las dosis de marbete no se presentarían riegos de “carryover” sobre maíz y centeno en suelos caracterizados por 2,5 y 3,1 % de MO, 18 y 36% de arcilla, y con precipitaciones durante la estación de crecimiento entre 479,8 y 1165 mm.

Ajuste de curvas para determinar el tiempo mínimo requerido para la siembra

La estimación visual de daño a través del índice de fitotoxicidad fue la variable más sensible frente a los residuos de herbicida en el suelo en comparación con la altura y el PSA. En este sentido, el índice de fitotoxicidad de valor 3, que representa síntomas leves y efectos reversibles podría definirse como un umbral para la toma de decisión de la siembra de los cultivos. Esta variable se utilizó para estimar el período mínimo requerido para la siembra de los cultivos en estudio según el modelo log-logístico. Este modelo logró un buen ajuste en general para cada cultivo y dosis. En el caso de centeno se obtuvieron valores CD de 1,56 para 1x y 1,50 para 2x; en el caso de triticale se obtuvieron valores de CD de 0,65 y 1,61; para maíz de 1,75 y 0,85 y para girasol valores de CD de 1,46 y 0,82 para cada dosis, respectivamente (Figuras 7 a, b, c y d).

Tal como se mencionó anteriormente, el triticale fue el cultivo más tolerante. En tal sentido, el tiempo mínimo requerido para la siembra a fin de no manifestar daños irreversibles, fue el menor de los cuatro cultivos. Para la dosis de 1x fueron necesarios 75 DDA y para 2x, 170 DDA. Entonces, la dosis de 1x se adaptaría a una fecha de siembra temprana hacia mediados de marzo, destinada a cultivos de cobertura o verdeo invernal. Mientras que con 2x debería destinarse el lote a siembras más tardías para la producción de grano.

La información obtenida cobra relevancia al momento de seleccionar un cultivo para la rotación, no sólo para garantizar el éxito de éste en términos productivos, sino también porque es importante implementar las prácticas agrícolas que promueven la disipación de los residuos de herbicidas en el suelo. De

esta manera, el establecimiento de cultivos propiciará la tasa de degradación del herbicida en el suelo (Gehrke *et al.*, 2021). Son vastos los ejemplos que demuestran las interacciones fructíferas entre las raíces y la comunidad microbiana de la rizosfera (Mercado-Blanco *et al.*, 2018) y su influencia en la disipación de los residuos de herbicidas en el suelo (Merini *et al.*, 2007).

El centeno requirió mínimamente 135 DDA para 1x y 210 DDA para 2x, por lo cual, la fecha probable de siembra se acerca a finales de mayo si es destinado a la producción de grano. Si se presentara un caso de doble dosis, la recomendación sería descartar la siembra de centeno. En el caso de sembrar el cultivo de girasol, para la dosis de 1x, la estimación de fecha de siembra se correspondió con la última fecha de muestreo, 274 DDA. En cambio, para el maíz no se alcanzó a estimar el período mínimo requerido para siembra con umbrales de fitotoxicidad correspondientes al valor 3. Los bioensayos correspondientes a los 274 DDA, mostraban afectación de la altura de las plantas de girasol, pero no así para maíz. Al analizar la información conjunta, resulta dificultoso aseverar que el girasol pueda sembrarse en las condiciones descritas sin riesgo de “carryover”.

Dado que la última fecha de muestreo fue a mediados de septiembre, con lluvias acumuladas de 288,5 mm, la realización de bioensayos como herramienta de diagnóstico, permitió describir el nivel de fitotoxicidad de los cultivos. Por lo tanto, en caso de manifestar niveles de fitotoxicidad inferiores a 3, podría decidirse una siembra temprana para ambos cultivos de verano. Sin embargo, con niveles de fitotoxicidad de 3, debería postergarse la fecha de siembra a la espera de acumular precipitaciones mayores a 300 mm de forma de reducir el riesgo de “carryover”.

En regiones semiáridas, donde los déficits hídricos son frecuentes, el fenómeno de “carryover” de fomesafen cobra relevancia siendo que la degradación de este herbicida se ve favorecida en condiciones de anaerobiosis (Cobucci *et al.*, 1998; Shaner, 2014; Vencill, 2002).

Ensayo de campo

Los ensayos de campo se realizaron solo con centeno y triticale. La densidad de plantas establecidas mostró interacción significativa Cultivo x Dosis ($p < 0,05$). Para centeno el tratamiento 0x (118 plantas m^{-2}) se diferenció de 1x (98,13 plantas m^{-2}) y 2x (86 plantas m^{-2}) ($p < 0,05$). El porcentaje de pérdida de plantas en el tratamiento 1x y 2x respecto a 0x fue del 17% y 27%, respectivamente. Mientras que para el caso del triticale la densidad de plantas logradas no se vio afectada (0x: 83,33; 1x: 100 y 2x: 103 plantas m^{-2}). Respecto a los índices de fitotoxicidad obtenidos en cada una de las evaluaciones visuales, hubo efecto de tratamiento conforme aumentaron las dosis. Para la evaluación visual de 28/05/2019 se obtuvieron valores de 1,53 y 2,74 para 1x y 2x, respectivamente, mientras que, para la evaluación del 8/10/2019, se alcanzaron valores de 1,59 y 2,67 para 1x y 2x, respectivamente.

Con respecto al rendimiento, no hubo efectos estadísticamente negativos de los tratamientos evaluados. Sin embargo, en centeno los rendimientos obtenidos fueron: 0x 1207; 1x 927 y 2x 1108 $kg\ ha^{-1}$ observando mermas del 23% y 8% para 1x y 2x respecto a 0x, respectivamente. El triticale mostró mínimas variaciones según los tratamientos; 0x 393; 1x 337 y 2x 456 $kg\ ha^{-1}$.

Los resultados del ensayo de campo confirman la sensibilidad del centeno y la tolerancia de triticale a los residuos de fomesafen en el suelo. Es de destacar que, a la fecha de siembra del ensayo de campo (105 DDA), las precipitaciones acumuladas alcanzaban 176,6 mm. Analizando conjuntamente los resultados obtenidos, los bioensayos no mostraron efectos negativos de los tratamientos sobre las variables evaluadas a partir de los 127 DDA y 190 mm de lluvias acumuladas. Por su parte, el ajuste de las curvas determinó un mínimo de 75 DDA para la siembra de triticale y 135 DDA para centeno, cual se corresponde con aproximadamente 180 mm acumulados para triticale y 267,3 mm para centeno si hacemos un paralelismo con los datos de los bioensayos.

Contar con la información de los registros pluviométricos en términos de probabilidad, es importante ya que se presentan riesgos



de ocurrencia favorable o desfavorable, de gran incidencia en la gestión de la actividad agropecuaria (Casagrande *et al.*, 2014). Vergara *et al.* (2008) caracterizaron las sequías de la localidad de Santa Rosa, cercana a Anguil y concluyeron que, sobre un total de 432 meses, ocurrieron sequías con diferente grado de intensidad en el 36,1% de los casos. Los registros de las precipitaciones de los últimos 12 años (2011 – 2023) muestran que al igual que el periodo en estudio, durante el ciclo 2017-2018 el riesgo de “carryover” fue alto. Las precipitaciones acumuladas correspondientes a cada fecha de muestreo, como posibles fechas de siembra, fueron 101, 194, 229,4 mm; y para la fecha de siembra del ensayo de campo serían 58 mm. Todas ellas hubiesen generado condiciones propicias para la manifestación del fenómeno de “carryover”.

CONCLUSIONES

Los cuatro cultivos estudiados manifestaron síntomas de fitotoxicidad durante el período estudiado y además se observaron algunos efectos sobre la emergencia, el PSA y la altura de plantas, pero no sobre el rendimiento a campo de los cultivos triticale y centeno.

La metodología de bioensayo permitió describir adecuadamente la evolución de los

síntomas expresados por los cultivos considerados respecto de los residuos de fomesafen en el suelo. De esta manera, los bioensayos sirven como herramienta de diagnóstico para la toma de decisión de siembra de un cultivo sensible a los residuos de fomesafen.

El triticale fue el cultivo más tolerante tanto en los bioensayos como a campo; requirió los menores períodos entre la aplicación del herbicida y la siembra en comparación con los otros cultivos. Fueron necesarios para 1x un período mínimo de 75 DDA y 180 mm acumulados y para 2x un período mínimo de 170 DDA y 267,3 mm acumulados. El centeno fue el cultivo más sensible, requirió como mínimo 135 DDA y lluvias acumuladas superiores a 267,3 mm. Para el caso de girasol y maíz, cuando el lote ha sido tratado con 250 g i.a. ha⁻¹ de fomesafen, un período de 274 DDA y 288 mm de lluvia acumulados resulta un escenario poco certero respecto al riesgo de carryover. Por lo tanto, se recomienda postergar las fechas de siembra esperando acumular un mayor registro de precipitaciones. Por lo tanto, se recomienda postergar las fechas de siembra esperando acumular precipitaciones. Para estos cultivos, resulta necesario verificar los resultados de los bioensayos con información generada a campo de forma de evaluar el impacto sobre el rendimiento. «

Bibliografía

- ANDERSON TH & DOMSCH KH (1989) Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biol Biochem* 21, 471-479.
- BELLINDER R, ARSENOVIC M, SHAH D & RAUCH B (2003) Effect of weed growth stage and adjuvant on the efficacy of fomesafen and bentazon. *Weed Science* 51, 1016-1021. <https://doi.org/10.1614/P2002-047>
- CÁMARA DE SANIDAD Y FERTILIZANTES AGROPECUARIOS, CASAFE (2023) Guía de productos fitosanitarios. <https://guiaonline.casafe.org/>
- CASAGRANDE G, VERGARA GT & BABINEC FJ (2014) Probabilidades de las precipitaciones en el área de Santa Rosa, provincia de la pampa (Argentina). *Semiárida: Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa* 24, 31-38
- COBUCCI T, PRATES H, FALCÃO C & REZENDE M (1998) Effect of imazamox, fomesafen, and acifluorfen soil residue on rotational crops. *Weed Science* 46, 258-263. <https://doi.org/10.1017/S0043174500090500>
- COBUCCI T & PRATES H (1997) Carryover effect of fomesafen, applied on edible bean, on sucesional maize. *Planta Daninha* 15, 10.1590/S0100-83581997000200011.
- CORNELIUS C & BRADLEY K (2017) Carryover of common corn and soybean herbicides to various cover crop species. *Weed Technology* 31, 21-31. <https://doi.org/10.1614/WT-D-16-00062.1>
- COSTA AIG, QUEIROZ MELR, NEVES AA et al. (2015) Mobility and persistence of the herbicide fomesafen in soils cultivated with bean plants using SLE/LTP and HPLC/DAD. *Environ Sci Pollut Res.* 22, 3457-3466. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3557-5>
- DI RIENZO JA, CASANOVES F, BALZARINI MG, GONZALEZ L, TABLADA M & ROBLEDO CW (2020) InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- GEHRKE VR, FIPKE MV, AVILA LAD & CAMARGO ER (2021) Understanding the opportunities to mitigate carryover of imidazolinone herbicides in lowland rice. *Agriculture* 11, 299. <https://doi.org/10.3390/agriculture1104029>.
- GRINT KR, PROCTOR C, DEWERFF R, SMITH DH, ARNESON NJ, ARRIAGA F, et al. (2022). Low carryover risk of corn and soybean herbicides across soil management practices and environments. *Weed Technology* 36, 160-167 doi: 10.1017/wet.2021.97
- GUO JF, LU YT & SUN JH (2000) Residue dynamics of fomesafen in peanut and soybean fields. *Chinese Journal of Agricultural Environmental Protection* 19, 82-84.
- KLUMPP A, KLUMPP G, ANSEL W & FOMIN A (2002) European network for the assessment of air quality by the use of bioindicator plants – the first year of EuroBio-net. In: *Bioindication and air quality in European cities – Research, application, communication.* (eds A KLUMPP, A FOMIN, G KLUMPP & W ANSEL) 37-55. Heimbach Verlag, Stuttgart.
- LEWIS K, TZILIVAKIS J, WARNER DJ & GREEN A (2016) An international database for pesticide risk assessments and management, Human and Ecological Risk Assessment. *An International Journal*, 22(4), 1050-1064, DOI: 10.1080/10807039.2015.1133242
- LI X, GREY T, PRICE K, VENCILL W & WEBSTER T (2019) Adsorption, desorption and persistence of fomesafen in soil. *Pest Management Science* 75, 270-278. <https://doi.org/10.1002/ps.5112>
- LOAGUE K, GREEN RE (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Hydrol.* 7, 51-73.
- MENDES K, DE SOUSA R, GODOI JUNIOR MA, PORFIRI C & MONTTOYA J (2023) Chapter 3. Environmental Behavior of Herbicides in Soil. In: *Agricultural Soils: Impacts on the Environment* (eds R NOGUEIRA DE SOUSA, T NASCIMENTO PESSOA & K FERREIRA MENDES). 53-155. Nova Science Publishers.
- MERCADO-BLANCO J, ABRANTES I, BARRA CARACIOLO A, BEVIVINO A, CIANCIO A, GRENNI P et al. (2018) Belowground microbiota and the health of tree crops. *Frontiers in Microbiology* 9,1006.
- MERINI LJ, CUADRADO V, FLOCCO CG & GIULIETTI AM (2007) Dissipation of 2,4-D in soils of the Humid Pampa region, Argentina: A microcosm study. *Chemosphere* 68, 259-265.
- MONACO TJ, WELLER SC & ASHTON FM (2002) *Weed science: principles and practices.* John Wiley & Sons.
- OLIVEIRA JÚNIOR RS, REGITANO JB et al. (2009) Dinâmica de pesticidas no solo. *Química e mineralogia do solo* 2, 187-248 Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- PARTE SG, MOHEKAR AD & KHARAT AS (2017) Microbial degradation of pesticide: A review. *Journal of Microbiology Research* 11, 992-1012.
- RAUCH BJ, BELLINDER RR & BRAINARD DC (2007) Dissipation of fomesafen in New York State soils and potential to cause carryover injury to sweet corn. *Weed Technology* 21, 206-212
- RECTOR L, PITTMAN K, BEAM S, BAMBER K, CAHOON C, FRAME W & FLESSNER M (2019) Herbicide carryover to various fall-planted cover crop species. *Weed Technology* 34, 25-34. <https://doi.org/10.1017/wet.2019.79>
- SANTOS JB, SILVA AA, COSTA MD, et al. (2006) Ação de herbicidas sobre o crescimento de estirpes de *Rhizobium tropici*. *Planta Daninha* 24, 457-465.
- SAS INSTITUTE INC (2015) SAS/IML® 14.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- SENASA (2023) Registro Nacional de Terapéutica Vegetal. Límites máximos de residuos permitidos. Lmr Junio 2023.
- SENSEMAN SA (2007) *Herbicide Handbook.* 9th (ed. LAWRENCE) Weed Sci Society of America. 458 p.
- SHANER DL (2014) *Herbicide Handbook* 10th (ed KS LAWRENCE) Weed Science Society of America 54-464 pp.
- SUR R (2014) Terrestrial field degradation based on soil, climatic, and geographic factors. In *Non-First Order Degradation and Time-Dependent Sorption of Organic Chemicals in Soil* 39-56. American Chemical Society.
- STREIBIG JC (1988) Herbicide bioassay. *Weed Research* 28, 479-484
- TUESCA C & PAPA JC (2016) Evaluación de herbicidas para el manejo de *Amaranthus palmeri* S. Watson en post-emergencia de un cultivo de soja (*Glycine max* L. Merr). Para mejorar la producción 54. <https://www.aapresid.org.ar/rem/wp-content/uploads/sites/3/2017/12/Tuesca-y-Papa-Evaluacionherbicidas-para-manejo-amaranthus-palmeri.pdf>.
- VENCILL WK (2002) *Herbicide Handbook.* 8th (ed KS LAWRENCE) Weed Sci. Society of America. 493 pp.
- VERGARA GT, CASAGRANDE GA & ARNAIZ JP (2008) Caracterización agroclimática de las sequías (1970/2005) en tres localidades de la provincia de la Pampa, Argentina. *Agronomía Tropical* 58, 77-80
- WHALEN DM, BISH MD, YOUNG BG, HAGER AG, CONLEY SP, REYNOLDS DB et al. (2019) Evaluation of cover crop sensitivity to residual herbicides applied in the previous soybean [*Glycine max* (L.) Merr] crop. *Weed Technology* 33, 1-9.
- WILSON R (2005) Response of dry bean and weeds to fomesafen and fomesafen tank mixtures. *Weed Technology* 19, 201-206. <https://doi.org/10.1614/WT-04-166R>
- ZADOKS JC, CHANG TT & KONZACK CE (1974) A decimal code for the growth stage of cereals. *Weed Research* 14, 415-421.



SIGMA
AGRO



SUMITOMO CHEMICAL

syngenta

TROPFEN

