

## EVALUACIÓN DE *Zea mays* L. Y *Phaseolus vulgaris* L. COMO BIOINDICADORES DE HERBICIDAS IMIDAZOLINONAS EN SUELO

Alvaro Anzalone<sup>1</sup>, Mágrit Ruíz<sup>1</sup>, Cástor Zambrano<sup>2</sup> y Aída Ortíz<sup>2</sup>

### RESUMEN

Se evaluaron las especies *Phaseolus vulgaris* y *Zea mays* como bioindicadoras de herbicidas imidazolinonas en suelo. Se condujeron dos ensayos bajo un diseño experimental completamente al azar con ocho tratamientos y diez repeticiones; el primero para determinar la especie que mejor se comportaba como bioindicadora y el segundo para validar el uso de la especie seleccionada, caracterizándola a través del uso de curvas dosis-respuesta utilizando un modelo log-logístico. Las plantas fueron cultivadas en potes con suelo enriquecido con ocho diferentes concentraciones de una mezcla de imidazolinonas (imazethapyr e imazapyr). En el segundo ensayo se adicionó una concentración control para corroborar el modelo y evaluar su capacidad predictiva. En ambos ensayos la variable evaluada fue la biomasa aérea seca de las plantas. El maíz fue la especie que mejor se comportó como bioindicadora. Las curvas dosis-respuesta obtenidas tienen forma asimétrica y asintótica con un rápido decrecimiento de la biomasa a medida que se incrementan las concentraciones del herbicida en el suelo. La concentración que redujo en un 10 % la biomasa del maíz estimada por los modelos correspondió al 8,3 y 13,6 % de la dosis comercial aplicada (200 g.ha<sup>-1</sup>) para el ensayo 1 y 2, respectivamente, lo que supone una alta sensibilidad de la especie al herbicida. En cuanto a la capacidad predictiva del modelo, el valor estimado de concentración del herbicida en el suelo se desvió sólo 10,9 % del valor real.

**Palabras clave adicionales:** Imazapyr, imazethapyr, bioensayo

### ABSTRACT

#### Evaluation of *Zea mays* L. and *Phaseolus vulgaris* L. as bioindicators of imidazolinone herbicide in soil

This research was conducted to evaluate the behavior of species *Phaseolus vulgaris* and *Zea mays* as bioindicators of the presence of imidazolinone herbicides in the soil. Two experiments were conducted under a completely randomized design with eight treatments and ten replications. The objectives were to identify the species that best behaved as an indicator (experiment 1), and to validate the use of selected species, characterized through the use of dose curves-response using a log-logistic model (experiment 2). The plants were grown in pots with soil supplemented with eight different concentrations of a mixture of imidazolinone (imazethapyr and imazapyr). In the second experiment, a concentration control was added to corroborate the model and to evaluate its predictive capacity. In both experiments, the aerial dry biomass of plants was determined. Corn was the species that best behaved as bioindicator. The obtained dose-response curves were asymptotic and asymmetric with a rapid decrease of biomass with the increase of herbicide concentration in soil. The concentration estimated by models that reduced by 10 % corn biomass corresponded to 8.3 and 13.6 % of the applied commercial rate (200 g.ha<sup>-1</sup>) for experiments 1 and 2, respectively, thus suggesting a high sensitivity of the species to the herbicide. As for the predictive ability of the model, the estimated herbicide concentration in soil deviated only 10.9 % of real value.

**Additional key words:** Imazapyr, imazethapyr, bioassay

### INTRODUCCIÓN

Las imidazolinonas, aunque químicamente diferentes de las sulfonilureas, comparten el mismo mecanismo de acción y muchas

propiedades, como es el comportamiento en el suelo y muy baja toxicidad en los mamíferos. Estos herbicidas se absorben foliarmente y a través de las raíces; además poseen actividad residual (Caseley, 1996). Zimdahl (1999) señala

---

Recibido: Abril 21, 2010

Aceptado: Marzo 7, 2011

<sup>1</sup> Dpto. de Fitotecnia, Decanato de Agronomía, Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado". Apdo. 400. Barquisimeto, Venezuela. e-mail: aanzalone@ucla.edu.ve

<sup>2</sup> Instituto de Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Apdo. 4579. Maracay, Venezuela

que las imidazolinonas fueron desarrolladas en la década de los 80 y que su principal mecanismo de acción es la inhibición de la síntesis de aminoácidos. Los síntomas de las plantas tratadas incluyen clorosis, necrosis y muerte de la yema terminal. Las imidazolinonas han creado problemas de persistencia no controlada y el rápido desarrollo de malezas resistentes.

La larga persistencia de este grupo de herbicidas se debe a la fuerte adsorción a los coloides del suelo, consecuencia de la baja solubilidad y a la influencia de condiciones como pH bajo del suelo y alto contenido de materia orgánica (Monaco et al., 2002). Otras condiciones como el tipo de arcilla, la existencia de hidróxidos de Fe y Al, y el contenido de humedad también juegan un papel importante en la inmovilización de las imidazolinonas por adsorción en el suelo. Aunado a esto, las imidazolinonas tienen baja presión de vapor, lo que impide que se volatilicen del suelo en condiciones normales; la hidrólisis química no es un mecanismo de degradación importante en el suelo y son muy estables a la luz ultravioleta si no se encuentran en solución acuosa (Nisensohn, 2002), por lo que la persistencia de este grupo de herbicidas puede producir efectos no deseados en cultivos de rotación.

Estas características exigen que el uso de las imidazolinonas se realice considerando las precauciones para controlar el tiempo de su actividad biológica en el suelo y hacen necesario el poder contar con las herramientas apropiadas para determinar este período de tiempo, tal como los son las plantas indicadoras o los análisis de química analítica validados.

Un bioensayo se define como un ensayo donde se mide una respuesta específica de un ser vivo ante una variable cambiante del ambiente. En el caso de los bioensayos con xenobióticos, se evalúa la respuesta de ciertas especies de plantas, animales, bacterias y hongos ante la presencia del compuesto en diferentes concentraciones y bajo distintas condiciones de suelo, agua, temperatura, etc. Los bioensayos aplicados para las investigaciones de herbicidas no son más que métodos de respuesta biológica por organismos vivos (bioindicadores), para determinar la presencia y/o concentración de un químico en un sustrato (Santelmann, 1977).

En los bioensayos para detectar la presencia de

herbicidas generalmente se utilizan especies vegetales sensibles. Se comparan las respuestas de las plantas que se desarrollan en un suelo tratado (que contiene concentraciones conocidas de herbicidas) con las plantas que crecen en el suelo sin tratar. La especie utilizada debe ser lo suficientemente sensible para detectar concentraciones muy bajas de herbicidas y debe mostrar un aumento gradual en la susceptibilidad con el aumento de la concentración del herbicida (Valverde, 2009).

Hay dos supuestos básicos cuando se realizan bioensayos: a) que las especies muestran una lesión en respuesta proporcional a la concentración de herbicidas, y b) que las respuestas obtenidas son reproducibles. Los bioensayos se pueden utilizar para estudiar la actividad, la persistencia, y el movimiento de los herbicidas en los suelos, los efectos de diferentes propiedades del suelo y las condiciones ambientales en la fitotoxicidad de los herbicidas, y la absorción, circulación y degradación de los herbicidas en las plantas. Muchos investigadores prefieren utilizar especies cultivadas como plantas indicadoras por la baja variabilidad genética y la disponibilidad del material vegetal para posteriores aplicaciones del método (Valverde, 2009). Es una técnica muy útil por su sencillez, bajo costo, precisión y sentido biológico.

Hager et al. (1999) realizaron pruebas mediante bioensayos y análisis químicos para detectar residuos de herbicidas en el suelo. Recomiendan que al realizar rotaciones de cultivos previamente se realice un bioensayo en campo con diversas especies susceptibles para evitar que los restos de herbicidas presentes en el suelo afecten el cultivo. Para detectar residuos de imazethapyr, imazaquin y clorimuron recomendaron realizar bioensayos con sorgo o maíz, dado que los resultados con estas especies fueron favorables.

Van Wyk y Reinhardt (2001) mediante la técnica de bioensayos detectaron la lixiviación de imazethapyr en el suelo, y señalaron que la persistencia de este producto ha sido responsable de lesiones en maíz cultivado después de soya y que el imazethapyr puede filtrarse fácilmente en suelos de textura de gruesa y bajo contenido de materia orgánica. Por su parte, Istilart (2002)

evaluó la residualidad de imidazolinonas y encontraron que el herbicida imazapyr solo y en mezcla con imazapic registró efectos fitotóxicos sobre cereales de invierno al siguiente año de la aplicación. También Ulbrich et al. (2005) evaluaron la persistencia de imazapic e imazapyr en el suelo y encontraron que el maíz fue una de las especies más sensibles a los restos de imidazolinonas; estos autores indican que los bioensayos son un medio eficaz para señalar que cultivo se puede plantar después de la aplicación de herbicidas imidazolinonas.

El objetivo de esta investigación fue valorar la capacidad de las especies *Phaseolus vulgaris* y *Zea mays* como bioindicadoras de herbicidas imidazolinonas en suelo, así como construir la curva de dosis-respuesta que defina la relación entre la biomasa aérea seca y las concentraciones de imidazolinonas en suelo de la especie que se comporte como mejor bioindicadora.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se condujeron dos ensayos en las instalaciones de la Unidad de Investigación en Fitotecnia y el Laboratorio de Control de Malezas de la Universidad Centroccidental “Lisandro Alvarado”, en el Decanato de Agronomía, en Tarabana, municipio Palavecino, estado Lara, Venezuela. En el primero, se evaluaron la caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) y el maíz (*Zea mays* L.) como bioindicadoras de herbicidas imidazolinonas en el suelo, y se escogió la especie con mejor comportamiento como bioindicadora. Posteriormente, en un segundo ensayo se elaboró la curva dosis respuesta para la especie seleccionada en el primer ensayo. El primer ensayo se condujo a cielo abierto porque correspondió con la época de sequía, mientras que el segundo fue realizado en la época de lluvias, bajo cobertizo para evitar el efecto de la precipitación sobre los ensayos. La altitud es de 510 msnm, precipitación media de 812 mm, temperatura media de 25 °C y humedad relativa media de 74,6 %.

En ambos ensayos se empleó la misma metodología, la cual consistió en evaluar el crecimiento de las especies al desarrollarse en un suelo con diferentes concentraciones de los herbicidas imazethapyr e imazapyr. El diseño

experimental utilizado fue completamente al azar con 8 tratamientos y 10 repeticiones. La unidad experimental consistió en tres plantas bioindicadoras, para un total de 240 plantas evaluadas por especie y ensayo. La fuente de los herbicidas evaluados fue el herbicida comercial Lightning, el cual es una mezcla de imidazolinonas (imazethapyr 52,5 % + imazapyr 17,5 %) y se usa en arroz y maíz resistentes a estos herbicidas.

Se utilizó un suelo de textura arcillosa y pH 7,4 recolectado de parcelas para la producción de arroz en el estado Guárico. Una vez traído el suelo a las instalaciones del laboratorio, se colocó a secar en un área techada y se desterronó. Simultáneamente se tamizó arena lavada de río y se lavó 15 veces para eliminar la arcilla presente y cualquier tipo de impureza, con la finalidad de que la misma fuera lo más inerte posible; posteriormente se colocó a secar junto con el suelo. Una vez secos, el suelo y la arena se mezclaron a razón de 75% suelo y 25% de arena, para así mejorar la estructura del suelo, el cual, por su textura arcillosa y fuerte tendencia al encostramiento, podía impedir la emergencia de las plántulas bioindicadoras. La relación suelo:arena más apropiada se determinó en una serie de ensayos preliminares de germinación y emergencia.

Se determinó la densidad aparente de la mezcla de suelo y arena para calcular las cantidades de herbicida necesarias para alcanzar las diferentes concentraciones de herbicida en el suelo que serían evaluadas como tratamientos; para ello se empleó el método del cilindro de volumen conocido (Pla, 1983). Se obtuvo un valor de densidad promedio de 1,80 g·mL<sup>-1</sup>.

La dosis recomendada del herbicida es de 200 g·ha<sup>-1</sup>; a partir de allí se realizaron los cálculos para determinar las concentraciones que serían utilizadas en cada tratamiento. Se consideró que en una situación real de uso del herbicida, el perfil de suelo tratado sería de 3 cm (0,03 m), ello debido a que el herbicida es poco móvil en el suelo y su tendencia a adherirse fuertemente a las micelas coloidales del suelo. En el Cuadro 1 se presentan los tratamientos que se aplicaron en los ensayos en base a la dosis aplicada y a la concentración alcanzada por los herbicidas en el suelo.

**Cuadro 1.** Dosis del herbicida imazethapyr + imazapyr y concentración equivalente en un estrato de 3 cm de suelo

Tratamiento	Dosis aplicada ( $\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}$ )			Concentración en el suelo ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )		
	Producto comercial*	Imazethapyr	Imazapyr	Producto comercial*	Imazethapyr	Imazapyr
T1	0	0	0	0	0	0
T2	10,0	5,25	1,75	0,0188	0,009	0,003
T3	20,0	10,50	3,50	0,0366	0,019	0,006
T4	25,0	13,13	4,38	0,0466	0,024	0,008
T5	40,0	21,00	7,00	0,0733	0,038	0,012
T6	66,6	34,97	11,66	0,1233	0,064	0,021
T7	100,0	52,50	17,50	0,1844	0,096	0,032
T8	200,0	105,00	35,00	0,3688	0,193	0,064

\* Lightning (imazethapyr 52,5 % + imazapyr 17,5 %)

En el segundo ensayo, se incluyó un tratamiento de referencia (con 10 repeticiones) empleándose una concentración de herbicida diferente a las usadas en los tratamientos anteriores, es decir, los utilizados para la construcción de la curva de dosis-respuesta; los datos obtenidos allí no se incluyeron en la construcción de la curva y se utilizaron para evaluar la capacidad de predicción de la concentración de herbicidas imidazolinas en el suelo por los modelos que definen la curva dosis-respuesta. La concentración de herbicida aplicada en el tratamiento de referencia fue de  $0,11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $0,058 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de imazethapyr +  $0,019 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de imazapyr), es decir, un valor intermedio entre los tratamientos T5 y T6.

Se preparó una solución madre que contenía  $0,05 \text{ mg}$  del producto comercial por cada mL, equivalente a  $0,02625 \text{ mg}$  de imazethapyr y  $0,00875 \text{ mg}$  de imazapyr por mL. En base a esta concentración se aplicaron diferentes volúmenes de la solución madre para alcanzar las concentraciones de herbicidas en el suelo descritas en el Cuadro 1.

Por cada tratamiento se enriquecieron  $9 \text{ kg}$  de suelo que se dividieron en lotes de  $3 \text{ kg}$  para aplicar  $1/3$  de la solución y así garantizar que el herbicida aplicado quedara bien distribuido en todo el suelo. Previamente se agregaron  $200 \text{ mL}$  de agua por cada  $3 \text{ kg}$  de suelo para humedecerlo; a su vez la porción de la solución con el herbicida se diluyó en  $150 \text{ mL}$  de agua destilada, de manera que existiera un volumen suficiente para distribuir apropiadamente el herbicida en el suelo. El suelo

se mezcló bien y se realizó el mismo proceso para los  $6 \text{ kg}$  restantes en cada tratamiento; en el caso del testigo sólo se humedeció con  $350 \text{ mL}$  de agua por cada  $3 \text{ kg}$  de suelo.

Las semillas de maíz cv. Himeca 3005 y caraota cv. Tacarigua fueron sembradas en vasos plásticos de  $476 \text{ mL}$  de capacidad; a cada vaso se le agregaron  $450 \text{ g}$  de suelo enriquecido con el herbicida y 3 semillas dispuestas en forma triangular. De ser necesario se regaba diariamente para mantener la humedad del suelo y así garantizar una buena germinación de la semilla y la emergencia de las plántulas. No se aplicaron fertilizantes ni otro tipo de producto fitosanitario. Los vasos y los tratamientos se distribuyeron aleatoriamente.

La variable evaluada en ambos ensayos fue la biomasa aérea seca de las plantas. Éstas se cortaron a nivel del suelo a los 17 días después de la siembra y las plantas de caraota a los 22 días, luego se introdujeron en bolsas de papel y se llevaron a estufa a  $70^\circ\text{C}$  hasta peso constante, momento en que se determinó la biomasa seca.

Una vez seleccionada la especie que tuvo mejor comportamiento como bioindicadora, se procedió a determinar las curvas de dosis-respuesta empleando la metodología propuesta por Seefeldt et al. (1995). La curva-dosis respuesta describe el efecto de diferentes dosis de un xenobiótico sobre el crecimiento de plantas u otros organismos, como es el caso del efecto de herbicidas sobre las plantas; dosis lo suficientemente altas detienen el crecimiento u

ocasionan la muerte de las plantas (Streibig et al., 1993). Se utilizó el siguiente modelo log-logístico de tres parámetros dado que el límite inferior de la respuesta tendió a cero:

$$f(x, (b, d, e)) = \frac{d}{1 + \exp\{b(\log(x) - \log(e))\}}$$

donde  $b$  denota la pendiente relativa alrededor de  $e$ ,  $d$  representa el límite superior de la respuesta y  $e$  es la dosis que produce 50% de la respuesta (también denominada como  $I_{50}$ ):

Las curvas dosis-respuesta se construyeron para el primer y segundo ensayo en el caso de la especie que resultó como mejor bioindicadora de acuerdo a su comportamiento, utilizando para ello los valores de la biomasa seca. Para elaborar las curvas dosis-respuesta se utilizó el modelo logístico que tuvo el mejor ajuste a los datos.

Los resultados se evaluaron mediante análisis de varianza, una vez comprobados los supuestos del análisis, y prueba de medias según la mínima diferencia significativa (LSD) utilizando el programa Statistix 8.0. Adicionalmente, se obtuvieron los modelos de las curvas dosis-respuesta utilizando el paquete DRC (dose-response curve) diseñado Ritz y Streibig (2005) para el programa R y se ajustaron al modelo log-logístico según Seefeldt et al. (1995).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Ensayo 1

En el primer ensayo, la biomasa seca tanto del maíz como de la caraota mostraron diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 2). El menor valor para el caso de la caraota se obtuvo al aplicar la máxima dosis de herbicida (T8), evidenciando una relación inversamente proporcional entre las dosis y la biomasa de la planta. Si bien este comportamiento ocurrió de forma general, existen variaciones importantes que se deben considerar, ya que la respuesta para algunos tratamientos fue errática y con alta variabilidad, debido a que en tratamientos con altas dosis ocurrió eventualmente un aumento del peso de la biomasa. Además, la respuesta a la presencia del herbicida sólo se evidenció a la más alta concentración del herbicida, lo que indica la baja sensibilidad de esta especie al herbicida en sus dosis más bajas. Esto puede deberse a su

condición de planta dicotiledónea que en las primeras etapas de desarrollo depende más de las reservas cotiledonales que de los procesos metabólicos, por lo que en ese período el herbicida no expresaría su daño. Este tipo de plantas sólo expresan de forma clara los daños por herbicidas cuando desarrollan totalmente las primeras dos a cuatro hojas verdaderas, proceso que puede tardar hasta 21 días (CIAT, 1983). En base a los resultados obtenidos en el primer ensayo, la caraota se descartó como bioindicadora de herbicidas imidazolinonas en suelo por no tener un buen comportamiento con respecto a las variables evaluadas a las dosis utilizadas, en especial por necesitar de mayor tiempo para expresar apropiadamente la respuesta ante el herbicida.

**Cuadro 2.** Biomasa aérea seca por planta de caraota y maíz utilizadas como bioindicadoras del herbicida imazethapyr + imazapyr en suelo.

Ensayo 1			
Tratamiento	Dosis de herbicida (mg·kg <sup>-1</sup> )	Biomasa (g)	
		Caraota	Maíz
T1	0	0,23 a	0,26 a
T2	0,0188	0,20 a	0,23 b
T3	0,0366	0,22 a	0,22 b
T4	0,0466	0,25 a	0,20 c
T5	0,0733	0,21 a	0,14 d
T6	0,1233	0,27 a	0,09 e
T7	0,1844	0,19 a	0,03 f
T8	0,3688	0,08 b	0,01 g
CV (%)**		31,8	16,3

Letras diferentes significan diferencias significativas según la prueba LSD ( $P \leq 0,05$ ).

En las concentraciones evaluadas el maíz mostró un excelente comportamiento como bioindicadora de imidazolinonas en el suelo a diferencia de la caraota, con una tendencia clara y continua hacia la disminución de la biomasa a medida que aumentó la dosis del herbicida en el suelo. Esta respuesta se hizo evidente desde la menor concentración del herbicida en el suelo. El maíz ya ha sido reportado como un buen indicador de herbicidas imidazolinonas por diversos autores como O'Brayan et al. (1994), Castro et al. (2002) y Ulbrich et al. (2005), inclusive cuando se utilizan variables distintas a la biomasa de la planta.

### Ensayo 2

En el segundo ensayo las diferencias entre tratamientos surgieron a partir del T4, ya que no hubo diferencias entre los tratamientos comprendidos del T1 al T3 (Cuadro 3). A pesar de ello, el maíz siguió mostrando una fuerte relación entre la concentración del herbicida en el suelo y la biomasa seca de la parte aérea, y esto quedó mejor evidenciado en la curvas de dosis-respuesta.

### Curvas Dosis-Respuesta

Los modelos de las curvas dosis-respuestas para la biomasa seca del maíz presentaron los tres parámetros reflejados en el Cuadro 4. Se observa que la concentración del herbicida en el suelo que redujo la biomasa en un 50 % ( $I_{50}$ ) fue de 0,0875 y 0,0965  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  para los

ensayos 1 y 2, respectivamente.

**Cuadro 3.** Biomasa aérea seca de plantas de maíz utilizado como bioindicador del herbicida imazethapyr + imazapyr en suelo. Ensayo 2

Tratamiento	Dosis de herbicida ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Biomasa seca (g)
T1	0	0,18 ab
T2	0,0188	0,20 a
T3	0,0366	0,20 a
T4	0,0466	0,17 b
T5	0,0733	0,12 c
T6	0,1233	0,06 d
T7	0,1844	0,02 ef
T8	0,3688	0,003 f
CV (%)		27,8

Letras diferentes significan diferencias significativas según la prueba LSD ( $P \leq 0,05$ )

**Cuadro 4.** Parámetros de los modelos logístico obtenidos de la biomasa seca del maíz como indicador del herbicida imazethapyr + imazapyr en el suelo

Parámetro del modelo	Ensayo 1		Ensayo 2	
	Valores estimados			
d = Asíntota superior (g)	0,25**		0,19**	
b= Pendiente	2,08**		3,36**	
e = Punto inflexión = $I_{50}$ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0,0875**		0,0965**	
Estimación ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$I_{10}$	0,0305	$I_{10}$	0,0502
	$I_{30}$	0,0582	$I_{30}$	0,0749
	$I_{70}$	0,1313	$I_{70}$	0,1241
	$I_{90}$	0,2506	$I_{90}$	0,1855

\*\* significativo para  $P \leq 0,01$

Al comparar los valores de  $I_{50}$  para cada modelo entre ambos ensayos la diferencia es de sólo 10,3 % con respecto al menor valor estimado, lo que ratifica la estabilidad de los resultados en el uso del maíz como bioindicadora de herbicidas imidazolinonas en el suelo, incluso considerando las diferencias en las condiciones en los que se desarrollaron los dos ensayos. Los valores de  $I_{10}$  estimado por los modelos correspondieron a 8,3 y 13,6 % de la dosis comercial aplicada ( $200 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) para el ensayo 1 y 2, respectivamente, lo que evidencia que el maíz es una especie sensible, capaz de detectar, a través del método utilizado, bajas concentraciones de los herbicidas imidazolinonas aplicados en el suelo.

La Figura 1, construida a partir de los parámetros de los modelos señalados en el Cuadro 4, muestra la disminución de la biomasa seca del

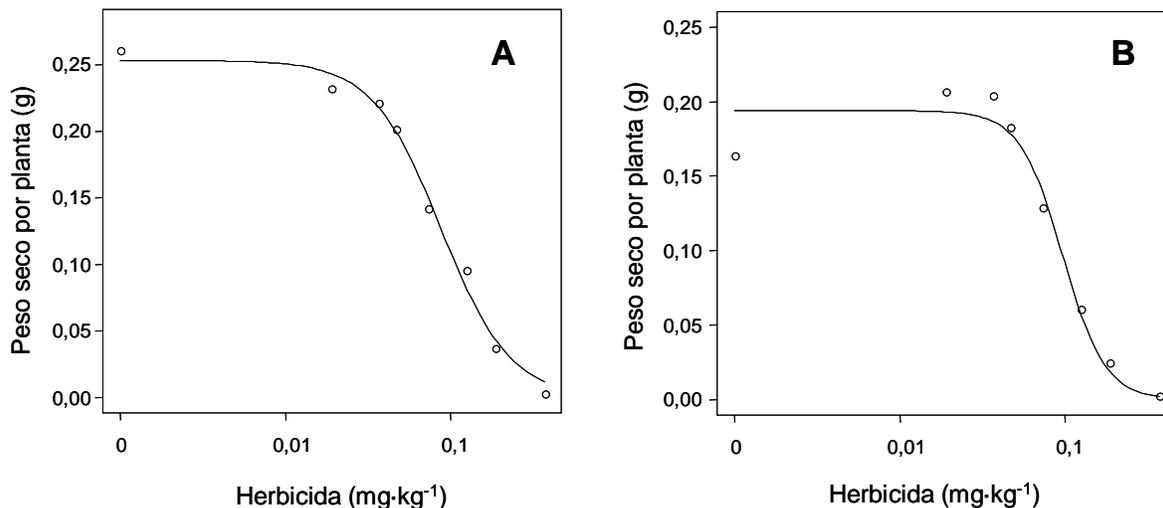
maíz a medida que se incrementó la dosis del herbicida en el suelo para los ensayos 1 y 2. En ambos casos las curvas tienen forma asimétrica y asíntótica, indicando que existe un rápido decrecimiento de la biomasa a medida que se incrementan las concentraciones del herbicida y que en las menores dosis la respuesta es baja. La curvatura de las líneas sugiere que la capacidad mínima de detección de un bioensayo, al utilizar el maíz (*Zea mays*) como especie indicadora de herbicidas imidazolinonas (imazethapyr + imazapyr) en suelo, estuvo alrededor de  $0,038 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

### Capacidad de predicción de la concentración de herbicidas imidazolinonas en el suelo

Tal como se comentó en el marco metodológico, en el segundo ensayo se agregó una concentración de herbicida en el suelo que era

ajena a las concentraciones que se utilizaron para la construcción de las curvas. La biomasa obtenida se utilizó para estimar la capacidad predictiva de la concentración del herbicida en el suelo que poseía la curva, y se obtuvo un valor de 0,121 ( $\pm 0,013$ )  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . El valor real de la concentración del herbicida utilizada en el suelo fue de 0,110

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , por lo que el estimado por el modelo se desvió sólo el 10,9 % del valor real. Este resultado indica que los modelos generados son capaces de estimar las concentraciones de herbicida en el suelo con bastante precisión, observándose desviaciones que pueden considerarse normales para ensayos biológicos de este tipo.



**Figura 1.** Modelos de dosis-respuesta para la biomasa seca aérea (peso seco) del maíz como indicador del herbicida imazethapyr + imazapyr en suelo. A=ensayo 1; B=ensayo 2

### Capacidad de predicción de la concentración de herbicidas imidazolinonas en el suelo

Tal como se comentó en el marco metodológico, en el segundo ensayo se agregó una concentración de herbicida en el suelo que era ajena a las concentraciones que se utilizaron para la construcción de las curvas. La biomasa obtenida se utilizó para estimar la capacidad predictiva de la concentración del herbicida en el suelo que poseía la curva, y se obtuvo un valor de 0,121 ( $\pm 0,013$ )  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . El valor real de la concentración del herbicida utilizada en el suelo fue de 0,110  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , por lo que el estimado por el modelo se desvió sólo el 10,9 % del valor real. Este resultado indica que los modelos generados son capaces de estimar las concentraciones de herbicida en el suelo con bastante precisión, observándose desviaciones que pueden considerarse normales para ensayos biológicos de este tipo.

### CONCLUSIONES

Se puede concluir que el maíz se comportó

como mejor bioindicador de herbicidas imidazolinonas en suelo que la caraota y que su alta sensibilidad a estos herbicidas dentro de los rangos de concentración ensayados, permite su uso para la estimación de residuos de herbicidas imidazolinonas en el suelo.

### AGRADECIMIENTO

A los participantes en el proyecto “Impacto ambiental de la adopción del arroz resistente a las imidazolinonas en sistemas productivos contrastantes de América Latina”, financiado por el Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO), y al cual se asoció esta investigación.

### LITERATURA CITADA

1. Caseley, J. 1996. Herbicidas. *In*: R. Labrada, J. Caseley y C. Parker (eds.). Manejo de Malezas para Países en Desarrollo. Estudio FAO de Producción y Protección Vegetal N° 120. FAO,

- Roma. pp. 193-238.
2. Castro, M., F. Bedmar, M. Monterubbianesi, A. Paretti y C. Barassi. 2002. Determination of chlorimuron and metsulfuron residues in two soils of Argentina using a rapid seed-bioassay. *Journal of Environmental Biology* 23(4): 353-358.
  3. CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1983. Una escala de desarrollo para el frijol propone el CIAT. *Hojas de Frijol* 5(2): 1-2.
  4. Hager, A., M. McGlamery y D. Pike. 1999. Testing for herbicide residues in soils. *In*: K. Steffey (ed.). *Illinois Agricultural Pest Management Handbook*. University of Illinois. Urbana-Champaign, IL. pp. 317-321.
  5. Istilart, C. 2002. Residualidad de imidazolinonas sobre cereales de invierno. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. INTA, Argentina. <http://www.inta.gov.ar/barrow> (consulta del 19/11/2008).
  6. Monaco, T., S. Weller y F. Ashton. 2002. *Weed Science: Principles and practices*. Wiley. New York.
  7. Nisensohn, L. 2002. Imidazolinonas. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. <http://www.fcagr.unr.edu.ar> (consulta del 21/12/2008).
  8. O'Brayan, K., B. Brecke, D. Shilling y D. Colvin. 1994. Comparison of bioassay techniques for detecting imazaquin in soil. *Weed Technology* 8: 203-206.
  9. Pla, S. 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Revista Alcance* N° 32 (UCV). 32 p.
  10. Ritz, C. y J. Streibig. 2005. Bioassay analysis using R. *Journal of Statistical Software* 12: 1-22.
  11. Santelmann, P. 1977. Herbicide bioassay. *In*: B. Truelove (ed.). *Research Methods in Weed Science*. Southern Weed Science Society. Auburn, Alabama. pp. 79-87.
  12. Seefeldt, S., J. Jensen y P. Fuerst. 1995. Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationship. *Weed Technology* 9: 218-227.
  13. Streibig, J., M. Rudemo y J. Jensen. 1993. Dose-response curves and statistical models. *In*: J. Streibig y P. Kudsk (eds.). *Herbicide Bioassays*. CRC Press. Boca Ratón, FL. pp. 29-55.
  14. Ulbrich, A., R. Souza y D. Shaner. 2005. Persistence and carryover effect of imazapic and imazapyr in brazilian cropping systems. *Weed Technology* 19: 986-991.
  15. Valverde, B. 2009. Bioanálisis en la ciencia de las malezas: Conceptos importantes y experiencia práctica. *El Malezólogo* (edición especial). Sociedad Venezolana para el Combate de Malezas. Barquisimeto, Venezuela. pp. 52-76.
  16. Van Wyk, L. y C. Reinhardt. 2001. A bioassay technique detects imazethapyr leaching and liming-dependent activity. *Weed Technology* 15(1): 1-6.
  17. Zimdahl, R. 1999. *Fundamentals of Weed Science*. Academic Press, San Diego, CA.