



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA



**“SENSIBILIDAD DE CULTIVARES DE AVENA A HERBICIDAS
INHIBIDORES DE LA ALS/AHAS”**

*Tesis presentada para optar al título de Magister Scientiae en Protección Vegetal de la
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata*

Ing. Agr. Rubén Darío Bustos Painii

2019

Director

Dr., Ing. Agr. Marcos E. Yannicari

Codirector

Prof., Ing. Agr. Daniel O. Giménez

Miembros del jurado evaluador

Dra., Ing. Agr. Betina C. Kruk

Dr., Ing. Agr. Eduardo S. Leguizamón

Dr., M. Sc., Ing. Agr. Julio A. Scursoni

Fecha de defensa de la tesis

22 de noviembre de 2019

“Dedico este trabajo a mis padres, hermanos, abuelos y demás seres queridos que durante mi estadía en la Argentina supieron transmitirme su motivación y apoyo incondicional de manera oportuna, haciéndome sentir cerca de casa a pesar de la distancia, especialmente a mi madre María Elena y mi novia Karolina quienes día a día batallaron junto a mí por la consecución de mis estudios”.

Agradecimientos

Agradezco al Gobierno de la República del Ecuador, a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación y a la Universidad de Guayaquil, por otorgarme la beca de estudios con que realicé esta maestría.

A la Universidad Nacional de La Plata, mediante su Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, por cobijarme en sus aulas y darme la oportunidad de continuar mi preparación académica.

Al cuerpo docente de la maestría por sus valiosos aportes a mi formación profesional, a mis compañeros de estudios por las experiencias profesionales y vivencias compartidas dentro y fuera de clases.

A los responsables, investigadores y personal de labores del INFIVE y de la CEI Barrow por abrirme sus puertas y brindarme las facilidades necesarias para realizar los experimentos que componen esta investigación. De manera especial, agradezco eternamente a las siguientes personas:

- A mis directores, Dr. Ing. Agr. Marcos Yannicari y Prof. Ing. Agr. Daniel Giménez, por ofrecerme su confianza, su guía e inmensurable ayuda desde los inicios de este estudio, por brindarme sus sabios conocimientos y por transmitirme con entusiasmo su pasión por la investigación, demostrando la calidad humana que tienen de ayudar a los demás.
- A la Ing. Agr. Liliana Wehrhahne por cooperar en la formulación de este estudio, en el aporte de las semillas y en la siembra de los experimentos de campo.
- A la Dra. María Rosa Simón y la Sec. Administrativa Julieta Galvan, por la gentileza y excelente profesionalismo mostrado al gestionar cada una de mis solicitudes efectuadas en todos los acercamientos mantenidos desde antes de iniciar la maestría.
- A los miembros del jurado evaluador, Dra. Betina Kruk, Dr. Eduardo Leguizamón y Dr. Julio Scursoni, por compartir conmigo sus puntos de vista y sugerencias encaminadas a mejorar la calidad de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ABREVIATURAS	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problemática	2
1.2. Antecedentes	4
1.3. Efectos y degradación de los herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS	6
1.4. Comportamiento de los herbicidas en estudio	7
1.5. Sensibilidad de avena a herbicidas residuales inhibidores de la ALS/AHAS	10
1.6. Objetivo general	11
1.7. Objetivos específicos	11
1.8. Hipótesis	11
CAPÍTULO II	12
2. MATERIALES Y MÉTODOS	12
2.1. Localización	13
2.2. Material vegetal	13
2.3. Herbicidas	13
2.4. Experimentos	14
2.4.1. Experimentos de germinación en cámara de crecimiento con presencia de herbicida	14
2.4.2. Experimento de emergencia en macetas en invernáculo a diferentes dosis de herbicida	15
2.4.3. Experimentos del efecto de los herbicidas sobre la emergencia, crecimiento y desarrollo de las diferentes variedades de avena en macetas a la intemperie	15
2.4.4. Experimento del efecto de los herbicidas sobre el crecimiento de las diferentes variedades de avena en campo	17
2.5. Diseño experimental y análisis estadístico	18
CAPÍTULO III	20

3. COMPARACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE VARIEDADES DE AVENA A HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA ALS/AHAS	20
GERMINACIÓN DE LAS DIFERENTES VARIEDADES DE AVENA EN PRESENCIA DE HERBICIDAS	21
3.1. Efectos de los herbicidas sobre la energía germinativa y el poder germinativo	21
3.1.1. <i>Imazapir-imazamox</i>	21
3.1.2. <i>Diclosulam</i>	23
3.1.3. <i>Sulfometuron-clorimuron</i>	25
3.2. Efectos de los herbicidas sobre el crecimiento plumular	26
3.2.1. <i>Imazapir-imazamox</i>	26
3.2.2. <i>Diclosulam</i>	28
3.2.3. <i>Sulfometuron-clorimuron</i>	29
EMERGENCIA DE PLÁNTULAS DE AVENA EN PRESENCIA DE HERBICIDA	32
3.3. Efectos de los herbicidas sobre la energía y porcentaje de emergencia de plantas cultivadas en macetas en invernáculo	32
3.3.1. <i>Imazapir -imazamox</i>	32
3.3.2. <i>Diclosulam</i>	34
3.3.3. <i>Sulfometuron-clorimuron</i>	36
3.4. Efectos de los herbicidas sobre el crecimiento plumular de avena cultivada en macetas en invernáculo	37
3.4.1. <i>Imazapir-imazamox</i>	37
3.4.2. <i>Sulfometuron-clorimuron</i>	39
3.4.3. <i>Diclosulam</i>	41
3.5. Efectos de los herbicidas sobre la producción de biomasa aérea de avena cultivada en macetas en invernáculo	42
3.5.1. <i>Imazapir--imazamox</i>	42
3.5.2. <i>Diclosulam</i>	43
3.5.3. <i>Sulfometuron-clorimuron</i>	44
PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA DE VARIEDADES DE AVENA EN IMPLANTACIÓN CULTIVADAS A CAMPO BAJO DIFERENTES DOSIS DE HERBICIDAS	46
3.6. <i>Efecto de imazapir-imazamox sobre la producción de biomasa aérea relativa</i> 46	46
3.7. <i>Efecto de diclosulam sobre la producción de biomasa aérea relativa</i>	48
3.8. <i>Efecto de sulfometuron-clorimuron sobre la biomasa aérea relativa</i>	49
3.9. Discusión	51

CAPÍTULO IV	57
4. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO MÁS SENSIBLES A HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA ALS/AHAS EN AVENA	57
EXPERIMENTOS DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE VARIEDADES DE AVENA TRATADAS CON HERBICIDAS Y CULTIVADAS EN MACETAS A LA INTEMPERIE	58
4.1. <i>Imazapir-imazamox</i>	58
4.2. <i>Diclosulam</i>	59
4.3. <i>Sulfometuron-clorimuron</i>	60
4.4. Discusión	62
CAPÍTULO V	65
5. CONCLUSIONES	65
BIBLIOGRAFIA	69
ANEXOS	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los herbicidas comerciales evaluados.....	14
Tabla 2. Valores de probabilidad de los ANOVA realizados sobre los datos de <i>energía germinativa y poder germinativo</i> de nueve variedades de avena sometidas a diferentes dosis de herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS.....	21
Tabla 3. Valores de los parámetros del modelo de regresión no lineal de respuesta del <i>crecimiento plumular</i> a dosis crecientes de imazapir-imazamox de variedades de avena cultivadas en cámaras de crecimiento.....	27
Tabla 4. Valores de los parámetros del modelo de regresión no lineal de respuesta del <i>crecimiento plumular</i> a dosis crecientes de diclosulam de variedades de avena cultivadas en cámaras de crecimiento.....	28
Tabla 5. Valores de los parámetros del modelo de regresión no lineal de respuesta del <i>crecimiento plumular</i> a dosis crecientes de sulfometuron-clorimuron de variedades de avena cultivadas en cámaras de crecimiento.....	30
Tabla 6. Valores de probabilidad de los ANOVA realizados sobre los datos de <i>energía de emergencia y emergencia final</i> de nueve variedades de avena sometidas a diferentes dosis de herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS.....	32
Tabla 7. Valores de los parámetros del modelo de respuesta del <i>crecimiento plumular</i> a dosis decrecientes de imazapir-imazamox de variedades de avena cultivadas en macetas en invernáculo.....	38
Tabla 8. Valores de los parámetros del modelo de respuesta del <i>crecimiento plumular</i> a dosis decrecientes de sulfometuron-clorimuron de variedades de avena cultivadas en macetas en invernáculo.....	40
Tabla 9. Valores de probabilidad del ANOVA realizado a la determinación de <i>altura relativa</i> de nueve variedades de avena cultivadas en maceta en invernáculo expuestas a dosis decrecientes del herbicida diclosulam.....	41
Tabla 10. Valores de probabilidad de los ANOVA realizados en la determinación del <i>peso seco</i> y el <i>peso seco relativo</i> de nueve variedades de avena cultivadas en maceta en invernáculo expuestas a dosis decrecientes de herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS.....	42
Tabla 11. Valores de los parámetros del modelo de regresión no lineal de la respuesta de <i>biomasa aérea</i> de las variedades de avena en implantación, cultivadas a campo a dosis crecientes de imazapir-imazamox.....	47

Tabla 12. Valores de los parámetros del modelo de regresión no lineal de la respuesta de <i>biomasa aérea</i> de las variedades de avena en implantación, cultivadas a campo a dosis crecientes de diclosulam.....	48
Tabla 13. Valores de los parámetros del modelo de regresión no lineal de la respuesta de <i>biomasa aérea</i> de variedades de avena en implantación, cultivadas a campo a dosis crecientes de sulfometuron-clorimuron.....	50
Tabla 14. Ranking de sensibilidad a herbicidas de diferentes variedades de avena evaluadas en los distintos experimentos de cámara de crecimiento, macetas en invernáculo y campo.....	53
Tabla 15. Valores promedio por dosis de las variables de los experimentos de crecimiento y desarrollo de variedades de avena tratadas con imazapir-imazamox y cultivadas en macetas a la intemperie.....	59
Tabla 16. Valores promedio por dosis de las variables de los experimentos de crecimiento y desarrollo de variedades de avena tratadas con diclosulam y cultivadas en macetas a la intemperie.....	60
Tabla 17. Valores promedio por dosis de las variables de los experimentos de crecimiento y desarrollo de variedades de avena tratadas con sulfometuron-clorimuron y cultivadas en macetas a la intemperie.....	61
Tabla 18. Valores promedio de las variables evaluadas a cada variedad de avena, en los experimentos de cámara de crecimiento, macetas en invernáculo, campo y macetas a la intemperie que fueron tratadas con imazapir-imazamox.....	80
Tabla 19. Valores promedio de las variables evaluadas a cada variedad de avena, en los experimentos de cámara de crecimiento, macetas en invernáculo, campo y macetas a la intemperie que fueron tratadas con diclosulam.....	81
Tabla 20. Valores promedio de las variables evaluadas a cada variedad de avena, en los experimentos de cámara de crecimiento, macetas en invernáculo, campo y macetas a la intemperie que fueron tratadas con sulfometuron-clorimuron.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Valores promedio de energía germinativa (horas) de cada variedad sometida a diferentes dosis de imazapir-imazamox (μM) (eje izquierdo) y energía germinativa promedio de cada variedad (línea continua; eje derecho).....	22
Figura 2. Crecimiento plumular de dos variedades de avena a) B.I. Sureña y b) B.I. Maná en una dosis de 1000 μM de imazapir-imazamox.....	22
Figura 3. Valores promedio del poder germinativo (%) de cada variedad sometida a diferentes dosis de imazapir-imazamox (μM) (eje izquierdo) y poder germinativo promedio de cada variedad (línea continua; eje derecho).....	23
Figura 4. Valores promedio de energía germinativa (horas) de cada variedad sometida a diferentes dosis de diclosulam (μM) (eje izquierdo) y energía germinativa promedio de cada variedad (línea continua; eje derecho).....	24
Figura 5. Valores promedio del poder germinativo (%) de cada variedad sometida a diferentes dosis de diclosulam (μM) (eje izquierdo) y poder germinativo promedio de cada variedad (línea continua; eje derecho)....	24
Figura 6. Valores promedio de energía germinativa (horas) de cada variedad sometida a diferentes dosis de sulfometuron-clorimuron (μM) (eje izquierdo) y energía germinativa promedio de cada variedad (línea continua; eje derecho)..	25
Figura 7. Valores promedio del poder germinativo (%) de cada variedad sometida a diferentes dosis de sulfometuron-clorimuron (μM) (eje izquierdo) y poder germinativo promedio de cada variedad (línea segmentada; eje derecho).....	26
Figura 8. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de imazapir-imazamox sobre la inhibición de altura en nueve variedades de avena cultivadas en cámaras de crecimiento.....	27
Figura 9. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de diclosulam sobre la inhibición de altura en nueve variedades de avena cultivadas en cámaras de crecimiento.....	29
Figura 10. Crecimiento del cultivar Bw 130 (a) y efectos horméticos en el cultivar B.I. Aikén (b) a dosis de 0,01 μM de sulfometuron-clorimuron.....	30
Figura 11. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de sulfometuron-clorimuron sobre la inhibición de altura en nueve variedades de avena cultivadas en cámaras de crecimiento.....	31
Figura 12. . Efectos sobre la energía de emergencia y porcentaje de emergencia: a) dosis 1x; b) dosis 1/5x de las variedades de avena tratadas con imazapir-imazamox....	33

Figura 13. Valores promedio de energía de emergencia de cada variedad a dosis decrecientes de imazapir-imazamox (eje izquierdo) y energía de emergencia promedio de cada variedad (línea punteada; eje derecho).....	33
Figura 14. Valores promedio del porcentaje de emergencia de cada variedad a dosis decrecientes de imazapir-imazamox (eje izquierdo) y emergencia promedio de cada variedad (línea punteada; eje derecho).....	34
Figura 15. Valores promedio de energía de emergencia de cada variedad a dosis decrecientes de diclosulam (eje izquierdo) y energía de emergencia promedio de cada variedad (línea punteada; eje derecho).....	35
Figura 16. Valores promedio del porcentaje de emergencia de cada variedad a dosis decrecientes de diclosulam (eje izquierdo) y emergencia promedio de cada variedad (línea punteada; eje derecho).....	35
Figura 17. Valores promedio de energía de emergencia de cada variedad a dosis decrecientes de sulfometuron-clorimuron (eje izquierdo) y energía de emergencia promedio de cada variedad (línea punteada; eje derecho).....	36
Figura 18. Valores promedio del porcentaje de emergencia de cada variedad a dosis decrecientes de sulfometuron-clorimuron (eje izquierdo) y emergencia promedio de cada variedad (línea punteada; eje derecho).....	37
Figura 19. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de imazapir-imazamox sobre la inhibición de altura en nueve variedades de avena cultivadas en macetas en invernáculo.....	38
Figura 20. Crecimiento en macetas en invernáculo de variedades de avena tratadas con imazapir-imazamox a dosis de 1x.....	39
Figura 21. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de sulfometuron-clorimuron sobre la inhibición de altura en nueve variedades de avena cultivadas en macetas en invernáculo.....	40
Figura 22. Valores de altura relativa de cada variedad de avena cultivadas en maceta en invernáculo a dosis decrecientes de diclosulam (eje izquierdo) y promedios de altura relativa por variedad (línea continua; eje derecho).....	41
Figura 23. Valores de peso seco relativo de cada variedad de avena cultivada en macetas en invernáculo a dosis decrecientes de imazapir-imazamox (eje izquierdo) y promedios de peso seco relativo por variedad (línea segmentada; eje derecho).....	43
Figura 24. Valores de peso seco relativo de cada variedad de avena cultivada en macetas en invernáculo a dosis decrecientes de diclosulam (eje izquierdo) y promedios de peso seco relativo por variedad (línea segmentada; eje derecho).....	44

Figura 25. Valores de peso seco relativo de cada variedad de avena cultivada en macetas en invernáculo a dosis decrecientes de sulfometuron-clorimuron (eje izquierdo) y peso seco relativo por variedad (línea segmentada; eje derecho).....	45
Figura 26. Biomasa aérea de las variedades de avena B.I. Yapa y Carlota I. en implantación, cultivadas a campo bajo la dosis 1x de imazapir-imazamox y testigo a los 60 días post-aplicación.....	46
Figura 27. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de imazapir-imazamox sobre la producción de biomasa aérea relativa de nueve variedades de avena en implantación, cultivadas a campo.....	47
Figura 28. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de diclosulam sobre la producción de biomasa aérea relativa de nueve variedades de avena en implantación, cultivadas a campo.....	49
Figura 29. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de sulfometuron-clorimuron sobre la inhibición de biomasa aérea de nueve variedades de avena en implantación, cultivadas a campo.....	50
Figura 30. Evaluaciones de actividad del ápice. Efecto de retraso en el desarrollo del meristema apical de las variedades de avena expuestas a imazapir-imazamox: a) testigo; b) tratamiento 1x.....	58
Figura 31. Tratamiento de diclosulam en dosis de 1x: efecto sobre el incremento de clorofila, número de macollos y disminución del crecimiento en avena: a) tratamiento 1x; b) testigo.....	60
Figura 32. . Sulfometuron-clorimuron en dosis de 1x: efecto sobre el crecimiento plumular y en la diferenciación de la sensibilidad al herbicida de las variedades de avena cultivadas en macetas a la intemperie: a) Bw 130; b) B.I. Maná; c) B.I. Aikén; d) Juana I.....	61

ABREVIATURAS

AHAS	Acetohidroxiácido sintasa.
ALS	Acetolactato sintetasa.
ANOVA	Análisis de la varianza.
b	Pendiente de la recta.
B.I.	Bonaerense INTA.
°C	Grado centígrado.
CEI	Chacra Experimental Integrada.
cm	Centímetro.
CO ₂	Dióxido de carbono.
com. pers.	Comunicación personal.
D	Asíntota superior total.
dds	Días después de la siembra.
EEA	Estación Experimental Agropecuaria.
F.	Fuente de variación.
g	Gramo.
ha	Hectárea.
HSD	Honestly significant difference.
<i>I</i> ₅₀	Dosis de inhibición media.
i.a	Ingrediente activo.
I.	INTA.
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
kg	Kilogramo.
l	Litro.
lb	Libra.
Log ₁₀	Logaritmo en base 10.
μM	Micromolar.
μmol	Micromol.
m	Metro.
mg	Miligramo.
ml	Mililitro.
mm	Milímetro.
ηm	Nanómetro.

<i>P</i>	Valor P.
PET	Tereftalato de polietileno.
pH	Potencial de hidrógeno.
p.c.	Producto comercial.
R ²	Porcentaje de variación de la variable.
RIAN	Red de Información Agropecuaria Nacional.
SPAD	Soil Plant Analysis Development.
STS®	Tolerancia a sulfonilureas.
tn	Tonelada.
x	Dosis recomendada.

RESUMEN

El cultivo de avena (*Avena sativa* L.), representa históricamente un pilar fundamental para la seguridad alimentaria mundial. En Argentina, cerca del 50% de la producción se concentra en la provincia de Buenos Aires, principalmente en su zona sur.

Debido a las condiciones edafoclimáticas de esa zona (materia orgánica edáfica, temperatura y pluviometría inferiores al resto de la región pampeana), se presentan con frecuencia problemas de fitotoxicidad en la implantación de avena asociados al prolongado efecto residual de herbicidas. La persistencia de inhibidores de la ALS/AHAS aplicados en los cultivos previos a la gramínea, se advierten como la principal causa de fitotoxicidad.

Ante esto, se estudió la sensibilidad de nueve variedades de avena a varias dosis de herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS. Se evaluaron distintos parámetros de germinación, crecimiento y desarrollo vegetativo, mediante experimentos en cámara de crecimiento, macetas en invernáculo, macetas a la intemperie y a campo.

Se determinó que los cultivares de avena estudiados difirieron en cuanto a la sensibilidad a los herbicidas, siendo las variedades Bonaerense INTA Calén y Bonaerense INTA Aikén las más tolerantes a imazapir-imazamox, por el contrario, Carlota INTA y Marita INTA fueron las más sensibles. Para diclosulam, el cultivar más tolerante fue Bonaerense INTA Calén y los más sensibles Juana INTA y Bonaerense INTA Maná. Las variedades más tolerantes a sulfometuron-clorimuron fueron Bonaerense INTA Calén y Bonaerense INTA Aikén, mientras que las más sensibles resultaron Bw 130 y Carlota INTA.

La inhibición de altura y de la biomasa aérea fueron las variables más sensibles a los herbicidas estudiados. Además, se estableció que la dosis mínima de imazapir-imazamox que provoca fitotoxicidad en los cultivares de avena oscila entre 400 y 1000 ml de producto comercial (p.c.) ha⁻¹, para diclosulam los valores mínimos de fitotoxicidad se ubicaron entre 3 y 13 g p.c. ha⁻¹ y para sulfometuron-clorimuron estuvieron entre 10 y 65 g p.c. ha⁻¹.

En base a los resultados, se recomienda tener precaución en el uso de determinadas variedades de avena que resultan sensibles a la residualidad de herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS empleados comúnmente en la rotación. Por el contrario, el uso de variedades con mayor tolerancia a estos herbicidas permite reducir los riesgos de daño por *carryover* dentro de ciertos rangos de herbicida en suelo.

Palabras clave: herbicidas en suelo, tolerancia, carryover, diclosulam, imazapir-imazamox, sulfometuron-clorimuron.

ABSTRACT

The oat (*Avena sativa* L.) production has historically played a key role in global food security. In Argentina, 50% of the oat production is concentrated in Buenos Aires province and oat crops are mainly located in the south of this province.

Due to the edaphoclimatic conditions of this area (lower temperature and lower levels of soil organic matter and rainfall than the rest of the Pampean region), plant damages are commonly detected during the implantation of oat crops and these injuries are associated with herbicide carryover. ALS/AHAS inhibitors applied in the previous crops can persist and cause phytotoxicity in oat.

The current research has as main purpose to find alternatives to tackle the problem previously described. It compares the sensitivity of nine varieties of oats to ALS/AHAS inhibitor herbicides. Different variables of germination, growth and vegetative development were evaluated carrying out experiments in growth chambers, pots in greenhouses and outdoors and in the field.

The oat cultivars differed in their sensitivity to ALS/AHAS inhibitor herbicides. Bonaerense INTA Calén and Bonaerense INTA Aikén were the most tolerant to imazapyr-imazamox, while Carlota INTA and Marita INTA were the most sensitive to that herbicide. The most tolerant to diclosulam was Bonaerense INTA Calén and the most sensitive were Juana INTA and Bonaerense INTA Maná. The varieties most tolerant to sulfometuron-chlorimuron were Bonaerense INTA Calén and Bonaerense INTA Aiken, while the most sensitive were Bw 130 and Carlota INTA.

Plant height and aerial biomass were the variables most sensitive to the herbicides studied. In addition, the minimum dose of herbicide that caused phytotoxicity in oat ranges from 400 to 1000 ml of commercial product (c.p). ha⁻¹ for imazapyr-imazamox, 3 to 13 g c.p. ha⁻¹ for diclosulam and 10 to 65 g c.p. ha⁻¹ for sulfometuron-chlorimuron.

Based on the current results, caution is recommended in the use of certain varieties of oats that are highly sensitive to ALS/AHAS inhibitor herbicides commonly applied in previous crops. On the other hand, the choice of varieties with the lowest

sensitivity to these herbicides allows reducing the risk of damages caused by carryover, within certain ranges of herbicide in the soil.

Keywords: soil herbicides, tolerance, carryover, diclosulam, imazapyr-imazamox, sulfometuron-chlorimuron.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática

La importancia de la avena (*Avena sativa* L.) radica en la versatilidad de su uso. Grano, verdeo de invierno y silaje conforman una trilogía por demás interesante a nivel de los cereales de invierno. La industrialización del grano abarca desde la avena arrollada (quaker®) hasta el mundo de la cosmetología (Corradi *et al.*, 2005). A nivel mundial, la Unión Europea encabeza el ranking productivo (Maich, 2012) mientras que Argentina, anualmente, alcanza una producción cercana a las 785000 toneladas, cosechadas en una superficie aproximada de 321000 hectáreas. El rendimiento promedio se aproxima a los 2500 kilos por hectárea (FAOSTAT, 2017). Alrededor de la mitad del volumen nacional de avena se produce en la provincia de Buenos Aires (Corradi *et al.*, 2005).

La Chacra Experimental Integrada Barrow, a través de su programa de mejoramiento, ha obtenido cultivares de alta producción de forraje, con buen rebrote, sanidad y alta producción de grano con calidad para la industria alimenticia (Wehrhahne, 2015). En el área de influencia de esta experimental (Partidos de Tres Arroyos, G. Chaves, San Cayetano y Cnel. Dorrego) ubicada en el centro sur bonaerense, el cultivo de avena ya sea para la producción de grano o forraje, representa casi el 20% de la superficie destinada a cultivos de invierno (Forján y Manso, 2017). Los principales materiales sembrados son aquellos obtenidos por el programa de mejoramiento de avena de esa experimental y de la EEA INTA Bordenave.

La inclusión de avena como parte de la rotación de cultivos apareja ciertos beneficios al ser considerado el cultivo de invierno que más residuos de cosecha deja (5 - 6 tn de materia seca ha⁻¹), de alta relación carbono/nitrógeno (100/1) determinando una lenta descomposición y favoreciendo la formación edáfica de materia orgánica estabilizada (Andriulo y Cardone, 1998; Forján y Manso, 2016). Además, la avena alcanza la madurez de cosecha, aproximadamente 10 días antes respecto al cultivo de trigo, brindando la oportunidad de adelantar la siembra de soja en aquellos planteos de doble cultivo. Esto, sumado a diferencias coyunturales en la cadena de comercialización de ambos cereales, explica por qué la avena ha llegado a alcanzar tal importancia en el sur bonaerense (Forján y Manso, 2018).

Habitualmente, se registran consultas de productores y asesores técnicos respecto a efectos fitotóxicos de herbicidas residuales que persisten en el suelo (producto de su

empleo para el control de ciertas malezas en barbechos ó cultivos estivales, 6-8 meses antes de la siembra de avena). Con diferentes niveles de daño que pueden llegar hasta la pérdida del cultivo, estos herbicidas residuales frecuentemente afectan al cultivo de avena que se implanta en la rotación (Wehrhahne, com. pers.). A diferencia del trigo, este cereal se siembra con antelación y, a su vez, presenta mayor sensibilidad que el trigo a los herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS (Alister y Kogan, 2005; Scursoni *et al.*, 2017).

Dentro de las principales malezas de la región pampeana se encuentran *Conyza bonariensis* (L.) Cronquist y *C. sumatrensis* (Retz.) E. Walker (ambas denominadas vulgarmente como “rama negra”) que interfieren con cultivos de verano, principalmente. Varios estudios en la Argentina demuestran que los dos periodos de mayor emergencia de *C. bonariensis* y *C. sumatrensis*, son a principios de otoño e inicios de primavera, siendo en otoño el pico de mayor germinación (Metzler *et al.*, 2013; Montoya, 2013; Ustarroz y Cerutti, 2015). Estas especies son tolerantes a glifosato y sólo resultan eficazmente controladas en el estadio de roseta (a fin de invierno o inicio de la primavera) (Puricelli y Tuesca, 2005). A lo largo de la primavera, la planta elonga su escapo floral y coincidentemente, la sensibilidad a glifosato decae (Metzler, 2011). En tal situación, herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS como diclosulam ó clorimuron son incorporados en combinación con glifosato y herbicidas hormonales para mejorar los controles. Estos principios activos resultan ser selectivos para soja y de variable residualidad que va desde los 60 días hasta un año, dependiendo de las condiciones edafoclimáticas (Bedmar y Gianelli, 2014). Por lo tanto, sus residuos en el suelo pueden permanecer y por "arrastre" o *carryover* afectar al cultivo de invierno siguiente en la rotación, siendo los más sensibles cebada y avena (Scursoni *et al.*, 2017).

Se han difundido materiales de soja resistentes a sulfometuron-clorimuron (variedades STS®) para manejar las malezas problemáticas. Estos principios activos tienen variable residualidad de 60 a 65 días, aproximadamente, en el caso de clorimuron (Montoya y Cervellini, 2017) hasta más de 200 días para sulfometuron, puesto en evidencia a partir de la sensibilidad del cultivo siguiente (Ledda *et al.*, 2009; Bedmar y Gianelli, 2014). Sobre soja resistente a glifosato pero no STS®, se suelen manejar las especies de *Conyza spp.*, *Portulaca oleracea* L., Amarantaceas susceptibles a inhibidores de la ALS/AHAS y Chenopodiaceas empleando una triazolopirimidina, diclosulam, en pre-emergencia del cultivo (Dow AgroSciences, 2018). La elevada

residualidad de este herbicida hace que se condicione la secuencia de cultivos a realizar ante condiciones edafoclimáticas que promuevan su persistencia (Bedmar y Gianelli, 2014).

En forma análoga, imidazolinonas como imazapir e imazamox se emplean en materiales resistentes de girasol *Clearfield*® para el manejo de malezas en post-emergencia. Al igual que se indicó antes, existen antecedentes sobre el efecto de *carryover* de residuos de esos principios activos sobre cultivos anuales invernales sucesores en la rotación como avena, cebada y trigo (Montoya, 2016).

Al sur de la provincia de Buenos Aires, las lluvias y las temperaturas son menores a las del resto de la región pampeana (Borda, 2003; Ballari *et al.*, 2009), en consecuencia, son más comunes los problemas de fitotoxicidad por persistencia de herbicidas al sembrar avena o cebada. Ambos cereales de invierno son más sensibles que el trigo, como se citó previamente, y además se siembran al menos un mes antes.

A partir de la implementación del presente trabajo, se comparó el comportamiento de la sensibilidad de nueve variedades de avena, a tres herbicidas (diclosulam, sulfometuron-clorimuron e imazapir-imazamox) inhibidores de la enzima acetolactato sintetasa (ALS) también llamada acetohidroxiácido sintasa (AHAS); el cultivar de avena que resulta menos afectado por el herbicida residual, se comportaría como más tolerante a la presencia de ese herbicida en el suelo. Teniendo en cuenta que entre los principales factores a considerar al momento de la planificación del cultivo se encuentran la elección del lote y la ausencia de herbicidas residuales que puedan afectar su implantación (Wehrhahne, com. pers.), los resultados del presente trabajo cobran importancia.

1.2. Antecedentes

La interferencia de malezas desde los inicios de la agricultura fue uno de los principales problemas que enfrentó el hombre para hacer producir las tierras. Desde la revolución verde, el método de control químico de malezas es el más usado; sin embargo, la creciente evolución de especies resistentes a herbicidas produce cuantiosas pérdidas que comprometen la sostenibilidad de los sistemas de producción (Ortiz *et al.*, 2015). A pesar de la continua generación y sustitución de herbicidas en las últimas dos

décadas, no fue posible erradicar a las malezas sino que por el contrario, se seleccionaron genotipos tolerantes y/o resistentes a los principios activos más utilizados (Papa y Tuesca, 2014).

El uso de herbicidas está totalmente aceptado y extendido en la agricultura de los países desarrollados y en áreas de medio-alto nivel de producción donde es la tecnología dominante (Peterson *et al.*, 2001). El empleo de otras tecnologías o métodos alternativos de control de malezas (control biológico), son prácticamente insignificantes (Torres, 2001). En la Argentina, el patrón de control de malezas en los cultivos extensivos para la producción de granos está casi exclusivamente dominado por los métodos químicos debido a la elevada superficie involucrada en siembra directa que sobrepasa los 26 millones de hectáreas (Ustarroz *et al.*, 2016). No obstante, si no son aplicados correctamente, los herbicidas pueden causar daños a las plantas cultivadas, al medio ambiente e incluso a las personas que los aplican. Los herbicidas han sido una herramienta importante para el manejo de malezas desde hace muchos años, puesto que han sido cada vez más sofisticados en el espectro de control de malezas, duración del período de control (residualidad) y selectividad a los cultivos (Baumann *et al.*, 1998). Sin el control químico, los cultivos serían diezmados y sin duda se registraría una fuerte disminución en la producción mundial de alimentos (Magdalena *et al.*, 2012).

Sin embargo, para reducir la interferencia de malezas y limitar su propagación, es indispensable la integración de prácticas de manejo de malezas como la rotación de cultivos, monitoreo de malezas, rotación de herbicidas con distintos sitios de acción, aplicación correcta de herbicidas, siembra de semilla libre de malezas, siembra de cultivos de cobertura, uso de variedades de alta habilidad competitiva, manejo de la fertilización, arreglo espacial, densidad de siembra, labranza en momentos oportunos, limpieza de equipos y todas las estrategias que reduzcan la disponibilidad de recursos para el crecimiento de las malezas. Para contribuir a la sustentabilidad y productividad de los agroecosistemas, es fundamental el conocimiento e integración de estas prácticas, debido a que herbicidas con nuevos modos o sitios de acción no han aparecido en el mercado desde finales de 1980 (Ustarroz *et al.*, 2016; Sánchez y Sarandón, 2014).

La rotación de cultivos es una práctica muy utilizada en Argentina, pero poco se ha hecho para evaluar el efecto residual de los herbicidas utilizados en cultivos de soja, maíz y girasol sobre los cultivos sucesores de la secuencia como la avena. Se sabe que

la actividad residual de esas moléculas presenta gran complejidad y que los efectos negativos de los herbicidas residuales aplicados en cultivos de verano recaen sobre otros en su sucesión (Gazziero *et al.*, 1997; Cassino *et al.*, 2017).

1.3. Efectos y degradación de los herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS

Los herbicidas de este grupo inhiben la enzima ALS/AHAS, clave para la biosíntesis de aminoácidos de cadena corta ramificada como son valina, leucina e isoleucina (Duggleby y Pang, 2000). Estos aminoácidos son requeridos comúnmente por las plantas para su crecimiento (Nissen *et al.*, 2004). Los herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS incluyen las familias químicas: sulfonilureas, imidazolinonas, triazolopirimidinas, pirimidiniltiobenzoatos y sulfonil-amino carboniltriaolinona (Peterson *et al.*, 2001). En conjunto, representan la mayor proporción de principios activos registrados como herbicidas (Senseman, 2007).

Los síntomas de su efecto se observan luego de 10 días después de la aplicación, y se manifiestan principalmente en los órganos jóvenes. Las plantas tratadas detienen su crecimiento, se marchitan y adquieren un color rojizo debido a la acumulación de antocianinas inducidas por el estrés. En gramíneas se observa clorosis o amarillamiento internerval y coloraciones rojizas en hojas nuevas mientras que en dicotiledóneas se observa clorosis, acortamiento de entrenudos y coloraciones moradas en las nervaduras (Senseman, 2007; Diez de Ulzurrun, 2013).

Cuando un herbicida es liberado en el medio ambiente, interactúa con los componentes bióticos y abióticos de éste, sufriendo transformaciones en su estructura (Boxall *et al.*, 2004). La degradación del plaguicida dará lugar a nuevos compuestos que pueden resultar más tóxicos, más o menos persistentes y más móviles que la sustancia original. De esta manera, cuando el producto de degradación resulta menos tóxico que el compuesto original se trata de una inactivación o destoxificación; si por el contrario, el producto de degradación resulta con mayor toxicidad, se trata de una activación (Bedmar y Gianelli, 2014).

Considerando la secuencia de especies incluidas en la rotación después del cultivo de girasol imi-tolerante y soja, las imidazolinonas, sulfonilureas y diclosulam podrían ocasionar problemas de fitotoxicidad debido a que algunos principios activos poseen prolongada persistencia en el suelo (Istilart, 2005; Bedmar y Gianelli, 2014;

Scursoni *et al.*, 2017). Esta residualidad está condicionada por varios factores que afectan la descomposición de diferente manera dependiendo del principio activo en cuestión.

1.4. Comportamiento de los herbicidas en estudio

Diclosulam es un herbicida del grupo químico triazolopirimidinas indicado para control de dicotiledóneas en pre-siembra incorporada o en pre-emergencia en el cultivo de soja (Rodrigues y Almeida, 2011). Este principio activo presenta una vida media de 67 días en áreas con sistema de siembra directa y de 87 días en suelos cultivados convencionalmente (Lavorenti *et al.*, 2003). De acuerdo con Yoder *et al.*, (2000) en suelos brasileños, argentinos, y estadounidenses, la vida media de ese herbicida va de 16 a 54 días. Sin embargo, una dosis de diclosulam equivalente a 33,6 g ha⁻¹ fue suficiente para reducir el rendimiento del cultivo de girasol sembrado a los 75 y 90 días después de su aplicación en el cultivo de la soja (Brighenti *et al.*, 2002).

La metabolización microbiana ha sido hallada como la principal vía de degradación de diclosulam en el suelo, por tanto, los factores que afectan la actividad de los microorganismos condicionará su residualidad (Senseman, 2007). Si bien los pocos trabajos de estimación de la vida media indican que es inferior a los 60 días desde la aplicación, como se citó previamente (Yoder *et al.*, 2000), cultivos altamente sensibles como girasol requieren que no se haya aplicado diclosulam dentro del año previo a la siembra para evitar problemas de fitotoxicidad (Bedmar y Gianelli, 2014).

En el caso de soja resistente a glifosato como STS®, el empleo de sulfonilureas para el control de aquellas malezas difícilmente controladas con glifosato, se basa en el empleo de diferentes principios activos de variable persistencia en el suelo. En este sentido, clorimuron-etil es un herbicida sistémico, selectivo y residual para el control de un amplio espectro de malezas dicotiledóneas en post-emergencia del cultivo de soja. En tal caso, en la planta de soja este herbicida es metabolizado en un proceso de declorinación y conjugación con glutatión otorgando selectividad (Cobb y Reade, 2010). En cuanto a la persistencia en el suelo, el pH condiciona la residualidad de clorimuron (Bedmar y Gianelli, 2014). Si bien la vida media ronda los 40 días (Wauchope *et al.*, 1992), la degradación en función del tiempo post-aplicación varía según las características edafoclimáticas; en algunas condiciones, la siembra de cultivos

susceptibles como sorgo y girasol debe realizarse luego de 40 días a nueve meses (Ledda *et al.*, 2009; Bedmar y Gianelli, 2014). Los cereales de invierno resultan susceptibles a clorimuron, sin embargo los casos de fitotoxicidad se hacen más evidentes cuando se encuentran en lotes o zonas de pH superiores a 7 (Senseman, 2007).

Otra sulfonilurea empleada es sulfometuron-metil, un herbicida de amplio espectro, sistémico y residual para el control de malezas dicotiledóneas como gramíneas en los cultivos de soja STS®. A tal fin, se encuentra formulado en combinación con clorimuron. Una vez aplicado, la degradación microbiana resulta ser lenta y, al igual que la sulfonilurea mencionada, la descomposición por hidrólisis química es la principal vía de degradación. Como se indicó antes, a pH levemente ácido el proceso de hidrólisis es relativamente rápido mostrando una vida media de 20-28 días (Wauchope *et al.*, 1992). Sin embargo, a pH 8 se vuelve extremadamente lento y el herbicida puede profundizar en el perfil del suelo (Senseman, 2007). No obstante esto, en las condiciones del sudeste bonaerense, cultivos susceptibles como girasol y maíz, requieren que no se haya aplicado sulfometuron 330 días antes de la siembra, en tanto soja no STS® presenta un periodo de espera para su siembra de alrededor de 200 días (Bedmar y Gianelli, 2014).

La degradación química es el proceso por el cual el herbicida es alterado en el suelo y transformado en compuestos inactivos a través de reacciones de oxidación, reducción o hidrólisis de la molécula (Fuentes, 2005). Considerando las sulfonilureas, la molécula de agua reacciona con el herbicida, se libera CO₂ a la vez que se forman compuestos no fitotóxicos como sulfonamida y una amina heterocíclica; esta hidrólisis es más rápida en condiciones de pH ácido (Brown, 1990; Pizzigallo *et al.*, 2001). Es por ello que, como se mencionó antes, en suelos de pH alcalino los riesgos de fitotoxicidad por persistencia de sulfonilureas se incrementa.

Por otra parte, tanto imazapir como imazamox, son herbicidas de amplio espectro y persistentes en el suelo. Se aplican en post-emergencia temprana del cultivo de girasol Clearfield® controlando malezas gramíneas y dicotiledóneas en pre-emergencia ó post-emergencia temprana. Existen antecedentes sobre efecto de *carryover* de residuos de imazapir e imazamox sobre cultivos anuales invernales sucesores en la rotación como avena, cebada y trigo (Montoya, 2016). Si bien avena fue la especie menos afectada, se registraron severos efectos fitotóxicos causados por imazapir e imazamox aplicados seis meses antes de la siembra del cultivo. Los efectos

se reflejaron en el rendimiento y en las observaciones visuales de fitotoxicidad que incluso causaron la muerte de plantas a los 75 días después de la siembra (Istilart, 2005).

Según los antecedentes, imazapir no es fácilmente degradado en el suelo y puede ser muy persistente dependiendo del tipo de suelo, condiciones ambientales y de la dosis de aplicación (Mangels *et al.*, 1991). El rango de vida media en el suelo (tiempo requerido para que el 50% del plaguicida original aplicado se descomponga en otros productos) oscila entre 25 y 142 días, siendo más corta en suelos arenosos y con temperaturas elevadas (Vencill, 2002; Tu *et al.*, 2004).

En tanto, la vida media de imazamox en el suelo oscila entre 20 y 30 días (Shaner, 2014). En este sentido, Rani (2015) determinó una degradación de primer orden con valores de vida media de 19 a 29 días en un suelo franco arenoso y franco arcilloso, respectivamente. En otro estudio sobre la adsorción, desorción y degradación de imazamox, imazetapir e imazaquin, el porcentaje del herbicida aplicado encontrado en la solución del suelo fue mayor para imazamox respecto a otras imidazolinonas, siendo superior a pH 7 que a pH 5 para los tres herbicidas en estudio (Aichele y Penner, 2005). A pH 7, la vida media para imazamox fue de alrededor de 11 días. Con pH mayores a 6, estos herbicidas existen en forma de iones negativos, siendo de esta forma débilmente adsorbidos, quedando por lo tanto en la solución del suelo, lo cual explica la menor residualidad en los suelos comparado a imazapir (Mangels *et al.*, 1991).

Por ello, si bien ambos herbicidas son similares en cuanto a estructura molecular, presentan diferentes potenciales de producir daños por *carryover* a los cultivos subsiguientes. Evaluando el efecto de *carryover* de imazapir e imazamox aplicados en post-emergencia temprana del cultivo de girasol sobre trigo, avena y cebada en experimentos de campo y laboratorio, se concluyó que el experimento de campo demostró que la cebada es una especie sumamente sensible a los residuos de imazamox en suelo, no así la avena y el trigo (Dipiano y Waiman, 2017). Sin embargo, la posible variabilidad intra-específica no fue tenida en cuenta. A partir del estudio de trigo y avena cultivados sobre muestras de suelo previamente tratados con imazapir e imazapir-imazamox se detectó alteración de la diferenciación de macollos de trigo y avena por efecto de imazapir (Giménez *et al.*, 2012).

A diferencia de las sulfonilureas, las imidazolinonas y diclosulam se descomponen en el suelo por acción microbiana (Fuentes, 2005). Esta metabolización ocurre predominantemente en la capa superficial del suelo donde los microorganismos aeróbicos usan tales herbicidas como fuente de energía y eventualmente como fuente de nitrógeno y azufre (Frioni, 1999; Jabusch y Tjeerdema, 2008). La velocidad de descomposición es variable y depende fuertemente del tipo de herbicida agregado, de la densidad de los microorganismos y de las condiciones ambientales imperantes en el suelo (temperatura, humedad, aireación, contenido de materia orgánica, pH, fertilidad, etc.) (Bedmar y Gianelli, 2014). No obstante, en líneas generales, se puede indicar que todas las condiciones que favorecen la actividad microbiana, donde se destaca la humedad y temperatura, propicia la metabolización de herbicidas y reduce los riesgos de persistencia extrema (Frioni, 1999).

En el sur de la Provincia de Buenos Aires, periódicamente se registran fenómenos de déficit hídricos debido a precipitaciones significativamente inferiores a la media histórica y con diferente duración (Borda, 2003; Ballari *et al.*, 2009). Sumado a las menores temperaturas medias del suelo, comparado al resto de la región pampeana, esto incrementa la probabilidad de fitotoxicidad en cultivos de invierno susceptibles por la elevada residualidad de herbicidas aplicados en la primavera-verano precedente (Istilart, 2005; Istilart, 2009).

1.5. Sensibilidad de avena a herbicidas residuales inhibidores de la ALS/AHAS

El cultivo de avena ha mostrado menor tolerancia a herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS comparado con trigo, incluso a principios activos registrados para el empleo en ambos cereales (Hartwig *et al.*, 2008). Desde que comenzó el desarrollo de tales herbicidas, la metabolización en la planta ha sido propuesta como la vía más común por la cual se explica la baja sensibilidad de ciertos cultivos (Sweetser *et al.*, 1982). La metabolización ocurre por diferentes procesos de distinta eficacia de detoxificación en trigo y avena (Cobb y Reade, 2010).

A pesar que en avena no son comunes los estudios de variación intra-específica de sensibilidad a herbicidas, existe algún antecedente donde la variabilidad genética general hallada entre variedades se refleja en variación en cuanto a la sensibilidad a herbicidas (Georgieva y Dimitrova, 2001). Sin excepción, en Argentina se desconoce si

existe variación en cuanto a la sensibilidad a herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS en los cultivares de avena comercialmente disponibles. Esta incertidumbre haría que en ciertos casos los riesgos de fitotoxicidad podrían ser potenciados por el empleo de materiales altamente sensibles. Del mismo modo, conocer aquellos materiales más tolerantes sería una estrategia de manejo más al momento de reducir los riesgos de fitotoxicidad. Ante este contexto se planteó el presente trabajo.

1.6. Objetivo general

Evaluar comparativamente la sensibilidad de cultivares de avena (*Avena sativa* L.) a diferentes herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS (diclosulam, sulfometuron-clorimuron e imazapir-imazamox), frecuentemente empleados en cultivos de verano antecesores en la rotación.

1.7. Objetivos específicos

1. Comparar la sensibilidad de cada cultivar a fin de establecer un *ranking* de variedades en cuanto a la tolerancia a herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS.
2. Determinar aquellos parámetros de crecimiento más sensibles a los herbicidas.
3. Establecer la mínima dosis de herbicida que provoque fitotoxicidad evidente en cada uno de los cultivares.

1.8. Hipótesis

Las variedades de avena difieren en cuanto a la sensibilidad a herbicidas residuales inhibidores de la ALS/AHAS.

CAPÍTULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Localización

Los experimentos se realizaron en las instalaciones del Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas) y en la Chacra Experimental Integrada Barrow (Ministerio de Agroindustria de la Pcia. de Buenos Aires - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) entre los años 2018 y 2019.

2.2. Material vegetal

Fueron nueve las variedades comerciales o líneas avanzadas de avena, que se evaluaron de forma preliminar mediante pruebas de dosis-respuesta de germinación. Estos materiales se desarrollaron en los programas de mejoramiento genético de avena de la Chacra Experimental Integrada Barrow y de la EEA INTA Bordenave. A continuación se describen las nueve variedades evaluadas:

- I. Bonaerense INTA Aikén
- II. Bonaerense INTA Calén
- III. Bonaerense INTA Maná
- IV. Bonaerense INTA Sureña
- V. Bonaerense INTA Yapa
- VI. Bw 130
- VII. Carlota INTA
- VIII. Juana INTA
- IX. Marita INTA

2.3. Herbicidas

Se utilizaron tres herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS en esta investigación, cada uno perteneciente a una de las tres familias químicas más empleadas dentro de este modo de acción, tal como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los herbicidas comerciales evaluados.

Familia	Ingrediente activo (i.a.)	Concentración (g i.a. kg⁻¹ o l⁻¹)	Producto comercial (p.c.)	Dosis (p.c. ha⁻¹)
Imidazolinonas	imazapir-imazamox	33 + 15	Clearsol® plus	2 l
Triazolopirimidinas	diclosulam	840	Spider®	30 g
Sulfonilureas	sulfometuron-clorimuron	150 + 200	Ligate®	100 g

2.4. Experimentos

Se realizaron cuatro distintos tipos de experimentos en cámara de crecimiento, macetas en invernáculo, macetas a la intemperie y en campo. A continuación se detalla la forma de ejecución de cada uno:

2.4.1. Experimentos de germinación en cámara de crecimiento con presencia de herbicida

Se evaluó cada cultivar a diferentes dosis de herbicida con el fin de construir curvas de dosis-respuesta en germinación. Se midió el número de semillas germinadas y el crecimiento plumular en cada caso. Se determinaron las dosis de inhibición media para cada herbicida y cada cultivar, y se compararon.

Para ello, 100 semillas de avena se pusieron a prueba en cajas de tereftalato de polietileno o plástico PET (23 cm largo x 15 cm ancho x 12cm alto), conteniendo una doble hoja de papel tissue y 25 ml de dilución en agua destilada para cada herbicida, a una concentración de 0; 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100 y 1000 μM . Para cada cultivar se determinó la respuesta a las dosis de imazapir-imazamox, diclosulam y sulfometuron-clorimuron, empleando los resultados promediados de las 100 semillas o plántulas evaluadas.

Las primeras 24 horas estuvieron en oscuridad a 28°C y luego el experimento se llevó a cabo en una cámara de crecimiento con 75 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de radiación fotosintéticamente activa con un período de luz/oscuridad de 12 horas/12 horas y temperatura constante de 25°C. Se determinó el tiempo de germinación del 50% de las

semillas (energía germinativa) y después de 6 días, se registró el porcentaje final de germinación (poder germinativo). Además, sobre aquellas que germinaron se midió el crecimiento de la plúmula en longitud (mm) comprendido desde el punto de unión del coleoptile a la semilla hasta la punta de la plúmula.

2.4.2. Experimento de emergencia en macetas en invernáculo a diferentes dosis de herbicida

Para corroborar los resultados del anterior experimento, se evaluó la emergencia de cada cultivar en diferentes dosis de herbicidas, asperjados en suelo húmedo 24 horas posterior a la siembra. El experimento se llevó a cabo dentro de un invernáculo de condiciones controladas de crecimiento (entre 10°C - 25°C). Las diferentes dosis evaluadas fueron: 1x (x= dosis recomendada), 1/5x, 1/10x, 1/20x, 1/40x y 0x (testigo absoluto) para cada herbicida. Los principios activos y las dosis recomendadas son las que se especifican en la Tabla 1.

Los cultivares fueron sembrados en macetas plásticas (45 cm largo, 15 cm ancho, 15 cm alto) rellenas con suelo tamizado. Se colocaron 50 semillas de cada una de las nueve variedades y se cubrieron con una capa de 3 cm de suelo, luego de 24 horas se asperjaron los diferentes tratamientos de herbicida y se humedeció el suelo hasta capacidad de campo. Se evaluó el tiempo (días) en emerger el 50% de las plantas (energía de emergencias), determinado mediante la observación del porcentaje de plantas emergidas a los 6, 14 y 21 (emergencia final) días después de la siembra (dds); además se midió la altura de las plantas (mm) y el peso seco de la biomasa aérea por planta (mg) de cada tratamiento a los 21 dds.

2.4.3. Experimentos del efecto de los herbicidas sobre la emergencia, crecimiento y desarrollo de las diferentes variedades de avena en macetas a la intemperie

Al igual que el experimento anterior, este constó de cinco concentraciones decrecientes de imazapir-imazamox, diclosulam, sulfometuron-clorimuron y un testigo, simulando de esta manera la degradación de los ingredientes activos en el suelo,

mediante la incorporación de las distintas diluciones equivalentes a las siguientes dosis: 1x (x= dosis recomendada), 1/5x, 1/10x, 1/20x, 1/40x y 0x (testigo absoluto); los herbicidas y las dosis recomendadas se especifican la Tabla 1.

Los experimentos se realizaron a la intemperie, donde se emplearon cajones de poliestireno expandido o telgopor (82 cm largo x 34 cm ancho x 20 cm alto) rellenos con suelo tamizado. En cada cajón se sembraron las cuatro variedades contrastantes que se seleccionaron para cada herbicida, colocando 100 semillas de cada variedad de avena y cubriéndolas con una capa de 3 cm de suelo. Luego de 24 horas se asperjaron las dosis decrecientes de cada herbicida y se humedeció el suelo hasta llevarlo a capacidad de campo. Posteriormente a la aplicación, en cada tratamiento se evaluaron los parámetros descritos a continuación:

Porcentaje de emergencia: Se efectuaron observaciones periódicas a los 5, 8, 10 y 15 días después de la siembra, determinando así el tiempo (días) en emerger el 50% de las plantas y el porcentaje final de emergencia en cada tratamiento. Esto se realizó a partir de la visualización del coleoptile al romper la capa superficial del suelo, contando como emergidas aquellas plántulas que superaban el centímetro por encima de la superficie.

Altura de planta: Se determinó la altura de las plantas expresada en centímetros a los 12, 15 y 20 días después de siembra. La evaluación se realizó empleando una regla graduada, midiendo desde la superficie del suelo hasta el ápice de la hoja más sobresaliente, tomando como repeticiones diez plantas al azar dentro de las hileras centrales de cada tratamiento.

Actividad del ápice a partir del seguimiento de diferenciación foliar: Esta determinación se realizó a los 25 y 35 días después de la siembra (dds), empleando una lupa binocular estereoscópica Leica, modelo Wild M3B. Para estas mediciones se emplearon los aumentos 6x, 12x, 25x y 50x, además se usó fuente de iluminación externa. Se utilizaron como repeticiones cinco plantas por cada tratamiento. Se estimó la actividad del ápice a partir de las observaciones de los siguientes parámetros:

1. Filocrono (tiempo en expandirse una hoja). Número de hojas expandidas.
2. Plastocrono (tiempo en formarse un primordio de hoja en el ápice). Número de primordios de hojas o espiguillas.
3. Número de hojas sin expandir.

4. Actividad del ápice. Fue el equivalente de la sumatoria de las observaciones anteriores (1+2+3).

Evaluación del número de macollos: El número de macollos por planta se determinó por recuento visual a ojo desnudo (no destructivo), a los 25 y 35 días después de siembra (dds). Se tomaron diez plantas por tratamiento como repeticiones.

Contenido relativo de clorofila: Se evaluó el contenido relativo de clorofila empleando mediciones no destructivas, con el instrumental portátil Minolta SPAD® 502 a los 35 días después de la siembra, repitiendo lecturas sobre el centro de la lámina de la tercera hoja expandida en diez plantas por tratamiento.

Los valores de SPAD (Soil Plant Analysis Development) son medidas relativas del contenido de clorofila en la hoja, las cuales derivan de mediciones de absorbancia a longitudes de onda de 650 nm (rojo) y 940 nm (infrarrojo). El SPAD emite energía radiante que atraviesa la hoja y es detectada por un receptor que la convierte en señales eléctricas y las expresa como señales digitales a través de un modelo, ajustado por el fabricante, transforma los valores de absorbancia en valores SPAD (Socorro, 2011).

Biomasa aérea por tratamiento a partir del peso seco: Se determinó por medio de la recolección de diez plantas por tratamiento colocadas en bolsas de papel y llevadas a una estufa a 65°C para su desecación hasta peso constante y posterior determinación del peso seco; esto se realizó a los 25 y 55 días después de siembra (dds) y los valores se establecieron en gramos con la ayuda de una balanza digital de 1 mg de precisión.

2.4.4. Experimento del efecto de los herbicidas sobre el crecimiento de las diferentes variedades de avena en campo

Se realizaron pruebas por cada uno de los tres herbicidas para evaluar la sensibilidad y fitotoxicidad de las nueve variedades de avena en condiciones de campo, y comparar los resultados con los obtenidos para las dosis más sensibles en las pruebas bajo condiciones controladas.

En la Chacra Experimental Integrada Barrow (sur de la provincia de Buenos Aires), sobre un suelo Argiudol petrocalcico laboreado, se sembraron 135 parcelas de 7 surcos distanciados a 0,2 m cada uno y 4 m de largo. A tal fin se empleó una

sembradora experimental, calibrada para una densidad de siembra de 250 plantas m⁻² con una profundidad de 3 cm.

La mitad de cada parcela fue tratada en forma perpendicular con diferentes dosis de herbicidas en pre-emergencia a los 7 días después de la siembra (dds) siguiendo los siguientes tratamientos: 2x (x= dosis recomendada), 1x, 1/2x, 1/4x y 1/8x; la otra mitad de la parcela se empleó como testigo apareado. Las aplicaciones se realizaron empleando un equipo pulverizador de precisión con presión constante de 35 lb mediante CO₂ y calibrado para erogar un volumen de aplicación de 145 l ha⁻¹.

Los herbicidas y las dosis recomendadas empleadas son las que se especifican en la Tabla 1. La variable evaluada para este experimento fue la determinación de biomasa aérea de planta a los 110 dds. Para ello, se muestrearon cinco plantas tomadas al azar de cada subparcela (tratada y sin tratar -testigo apareado-) y cortadas a la altura del cuello. Las muestras se llevaron a peso constante mediante secado en estufa a 60°C y se pesaron empleando una balanza de precisión de 1 mg. Se estimó la producción de biomasa aérea relativa como el peso de cada planta respecto al peso promedio de plantas del testigo apareado para cada uno de los nueve cultivares evaluados y cada una de las cinco dosis de los tres herbicidas.

Según los registros climáticos de la zona (RIAN, 2019), el total de precipitaciones acumuladas fue de 24,8 mm los 20 días previos a la aplicación y de 106,8 mm los 60 días posteriores a la aplicación; en cuanto a las temperaturas mínimas y máximas, los 20 días previos a la aplicación oscilaron entre 7°C y 24°C, para los 60 días posteriores a la aplicación fluctuaron entre 4,7°C y 17,7°C.

2.5. Diseño experimental y análisis estadístico

En cada experimento y para cada herbicida se utilizó un Diseño Completamente al Azar con arreglo factorial AxB (A=variedades de avena, B=dosis de herbicida).

Para determinar las dosis de inhibición media mediante los datos de crecimiento plumular y biomasa aérea relativa, los parámetros evaluados se analizaron con un modelo log-logístico de regresión no lineal (Seefeldt *et al.*, 1995) a fin de construir las

curvas de dosis respuesta y establecer en cada parámetro evaluado la dosis de inhibición media de cada herbicida para cada variedad.

$$y = (D)/(1 + (x/I_{50})^b)$$

En la anterior ecuación, y expresa el porcentaje de respuesta a determinada dosis de herbicida x , D representa la asíntota superior total o respuesta media cuando la dosis de herbicida es cero, b es la pendiente de la recta en el punto I_{50} (dosis de inhibición media).

Para el resto de variables se realizaron análisis de la varianza (ANOVA) y pruebas de comparación múltiple de Tukey HSD al 5%. En el caso de la variable “número de macollos”, fue necesario transformar los datos previamente a su análisis en “raíz cuadrada de $x+1$ ” (x = valor real de la variable). El análisis estadístico de los datos se realizó mediante la ayuda de los programas informático GraphPad Prism® v8.00 (Graphpad Software, Inc.) y Statistix 9.

Los experimentos de germinación en cámara de crecimiento y los de emergencia, crecimiento y desarrollo en macetas a la intemperie se repitieron dos veces; los experimentos de desarrollo en campo y de emergencia en macetas en invernáculo, se hicieron una vez para corroborar los resultados de los experimentos en cámara de crecimiento y macetas a la intemperie.

CAPÍTULO III

3. COMPARACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE VARIEDADES DE AVENA A HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA ALS/AHAS

GERMINACIÓN DE LAS DIFERENTES VARIEDADES DE AVENA EN PRESENCIA DE HERBICIDAS

3.1. *Efectos de los herbicidas sobre la energía germinativa y el poder germinativo*

3.1.1. *Imazapir-imazamox*

Según los resultados del análisis de varianza, al considerar los efectos sobre la *energía germinativa* no se observaron diferencias significativas ($P > 0,05$) entre las variedades de avena, pero sí entre las dosis de herbicidas ($P < 0,01$) (Tabla 2). En la comparación de medias entre variedades, los valores rondaron entre 12,4 horas y 13,4 horas. La dosis con mayor *energía germinativa* fue 0,1 μM con 12,6 horas y la de menor *energía germinativa* fue 1000 μM con 14,0 horas (Figura 1).

Tabla 2. Valores de probabilidad de los ANOVA realizados sobre los datos de *energía germinativa* y *poder germinativo* de nueve variedades de avena sometidas a diferentes dosis de herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS.

Fuente de Variación	imazapir-imazamox	diclosulam	sulfometuron-clorimuron
Energía germinativa			
Variedad	0,163	0,002	<0,001
Dosis	0,008	0,291	<0,001
Poder germinativo			
Variedad	<0,001	<0,001	<0,001
Dosis	0,017	0,012	<0,001

En cuanto a la variable *poder germinativo*, el análisis de varianza indicó que hubo diferencias altamente significativas entre las variedades de avena ($P < 0,01$) y diferencias significativas ($P < 0,05$) entre las dosis de herbicida evaluadas (Tabla 2, Figura 2). La variedad con mayor *poder germinativo* fue Juana I., con el 95,1%, seguida de B.I. Sureña con 94,9%, mientras que la variedad que mostró menor *poder germinativo* fue B.I. Maná con 87,1% (Figura 3). En la comparación de medias, las dosis que se asociaron a un mayor *poder germinativo* fueron de 0 μM con 94,0% y 1 μM con 94,1%, mientras que la única dosis que difirió significativamente del

tratamiento testigo (0 μM) fue aquella de 10 μM conduciendo a un *poder germinativo* de 89,4%.

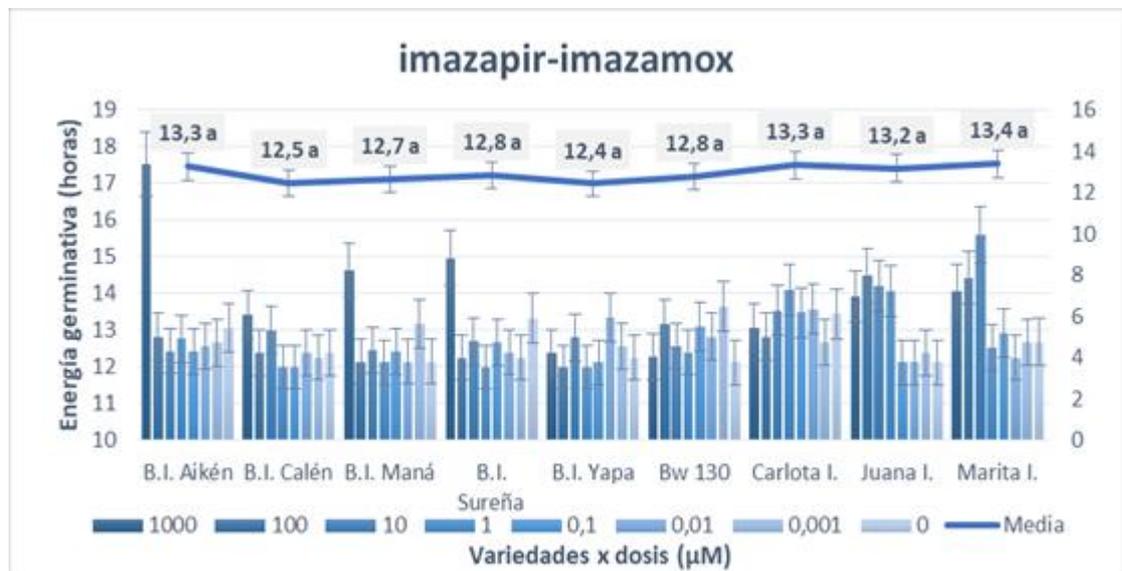


Figura 1. Valores promedio de *energía germinativa* (horas) de cada variedad sometida a diferentes dosis de imazapir-imazamox (μM) (eje izquierdo) y *energía germinativa* promedio de cada variedad (línea continua; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

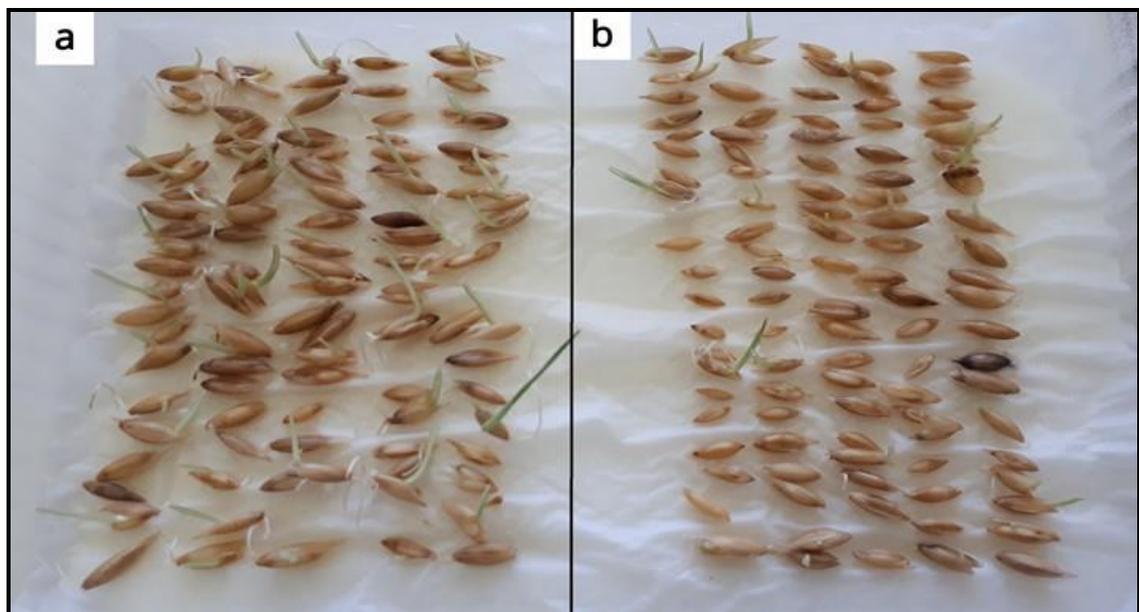


Figura 2. Crecimiento plumular de dos variedades de avena a) B.I. Sureña y b) B.I. Maná en una dosis de 1000 μM de imazapir-imazamox.

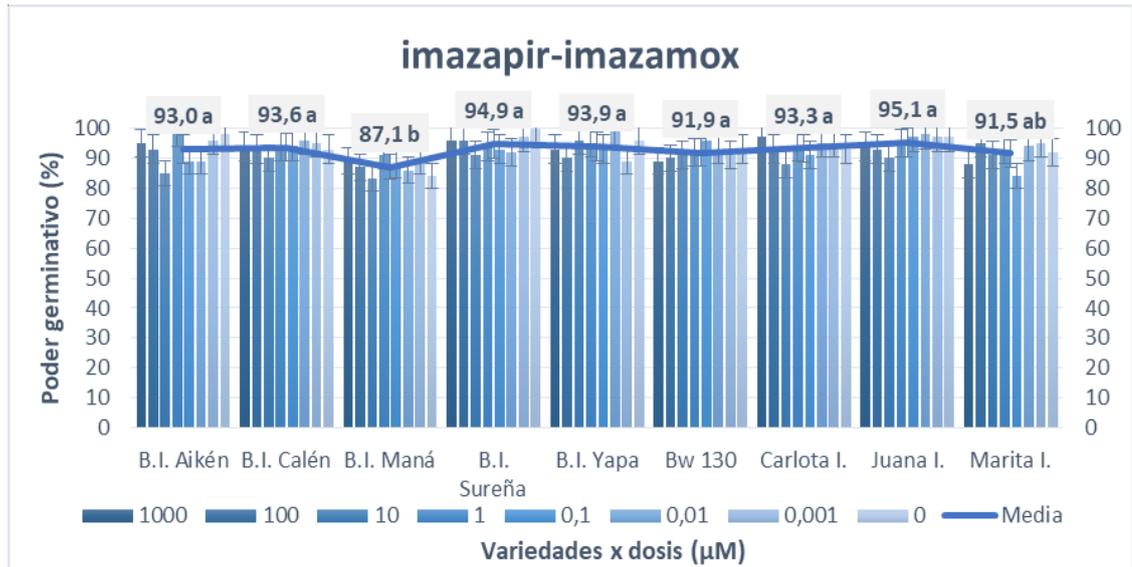


Figura 3. Valores promedio del *poder germinativo* (%) de cada variedad sometida a diferentes dosis de imazapir-imazamox (μM) (eje izquierdo) y *poder germinativo* promedio de cada variedad (línea continua; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.1.2. Diclosulam

Las variedades de avena mostraron diferencias significativas en la *energía germinativa* ($P < 0,01$) mientras que entre las dosis del herbicida no se observaron diferencias significativas ($P > 0,05$) (Tabla 2). La variedad con mayor *energía germinativa* fue B.I. Yapa con 12,2 horas y la de menor *energía germinativa* fue Marita I., con 13,2 horas. Las variedades Juana I., Carlota I., Bw 130 y B.I. Aikén no difirieron significativamente de Marita I., y esas tres últimas variedades junto a B.I. Calén, B.I. Maná y B.I. Sureña no mostraron diferencias significativas con la de mayor *energía germinativa* (B.I. Yapa) (Figura 4). Con respecto a la comparación de medias entre dosis, los valores oscilaron entre 12,3 horas (1 μM) y 12,9 horas (100 μM).

Al considerar el *poder germinativo*, el análisis de la varianza indicó que hubo diferencias significativas entre las variedades de avena ($P < 0,01$) y entre las dosis de herbicida que se evaluaron ($P < 0,05$) (Tabla 2).

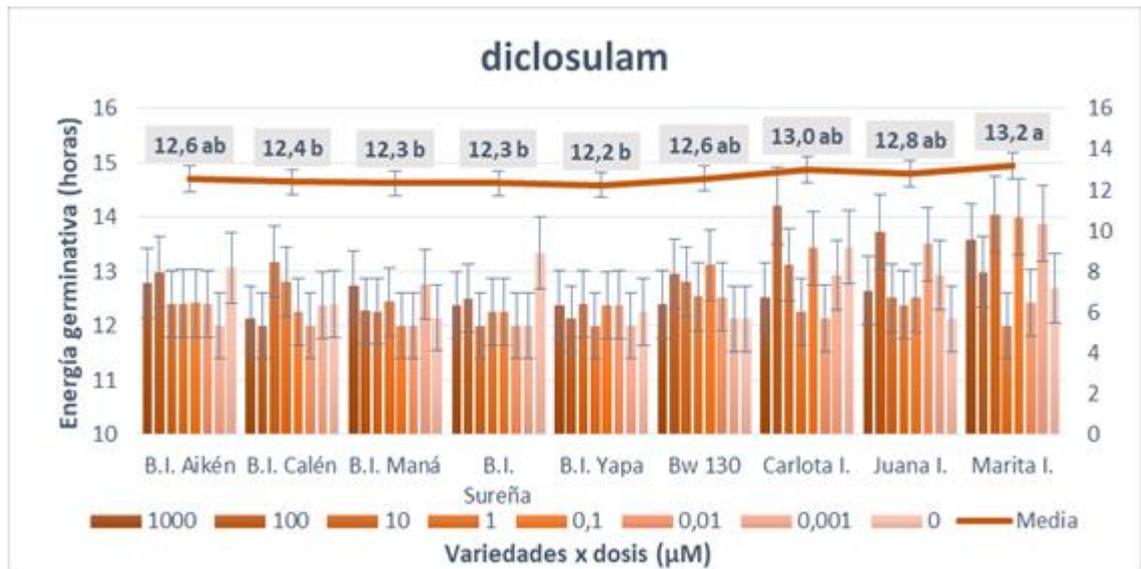


Figura 4. Valores promedio de *energía germinativa* (horas) de cada variedad sometida a diferentes dosis de diclosulam (μM) (eje izquierdo) y *energía germinativa* promedio de cada variedad (línea continua; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

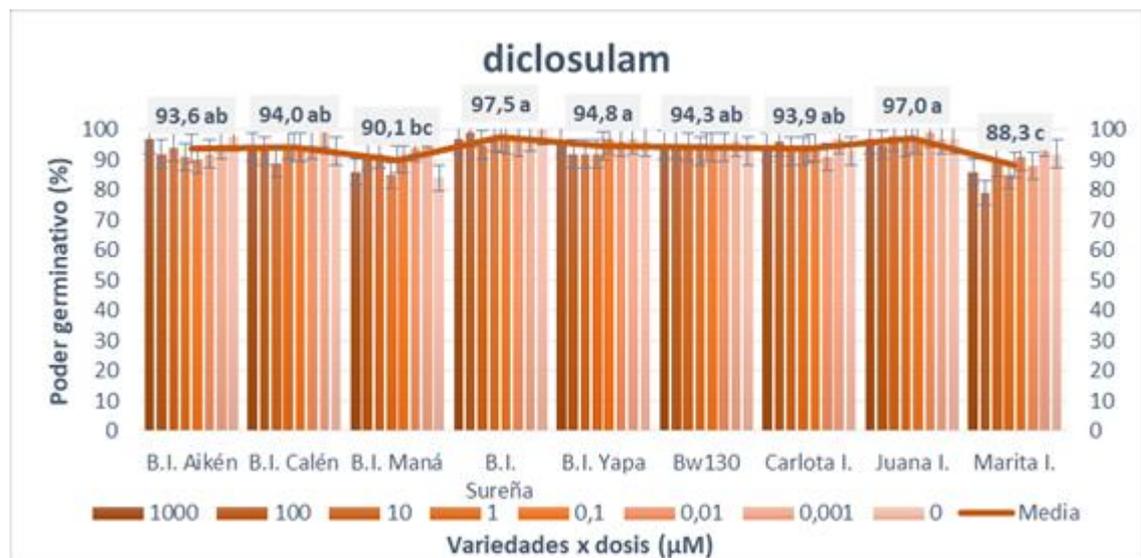


Figura 5. Valores promedio del *poder germinativo* (%) de cada variedad sometida a diferentes dosis de diclosulam (μM) (eje izquierdo) y *poder germinativo* promedio de cada variedad (línea continua; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

La variedad con mayor *poder germinativo* fue B.I. Sureña con el 97,5%, mientras que la variedad de menor *poder germinativo* fue Marita I. con 88,3%. Las variedades Juana I., B.I. Yapa, Bw 130, B.I. Calén, Carlota I., y B.I. Aikén no difirieron significativamente de B.I. Sureña y la variedad B.I. Maná no mostró diferencias significativas con la de menor *poder germinativo* (Figura 5). En la comparación de

medias entre dosis, aquella asociada a un mayor *poder germinativo* fue la concentración de 0,001 μM con 97,1%; ninguna de las dosis estudiadas difirió significativamente del tratamiento testigo (0 μM) cuyo *poder germinativo* fue del 94,0%.

3.1.3. Sulfometuron-clorimuron

Por medio de los resultados del análisis de varianza de la *energía germinativa*, se observaron diferencias significativas ($P < 0,01$) entre las variedades de avena y entre las dosis aplicadas del herbicida (Tabla 2). La variedad que registró mayor *energía germinativa* fue B.I. Sureña con 12,5 horas y la de menor *energía germinativa* fue Carlota I., con 16,5 horas. Las variedades B.I. Aikén, B.I. Calén, B.I. Yapa, Bw 130 y Juana I., no difirieron significativamente de Sureña I., mientras que B.I. Maná y Marita I., no mostraron diferencias significativas con la de menor *energía germinativa* (Carlota I.) (Figura 6). En cuanto a la comparación de medias entre dosis, aquella asociada a una mayor *energía germinativa* fue 0 μM con 12,6 horas; las dosis que difirieron significativamente del tratamiento testigo (0 μM) fueron 100 μM y 1000 μM con valores de 15,7 y 15,6 horas, respectivamente.

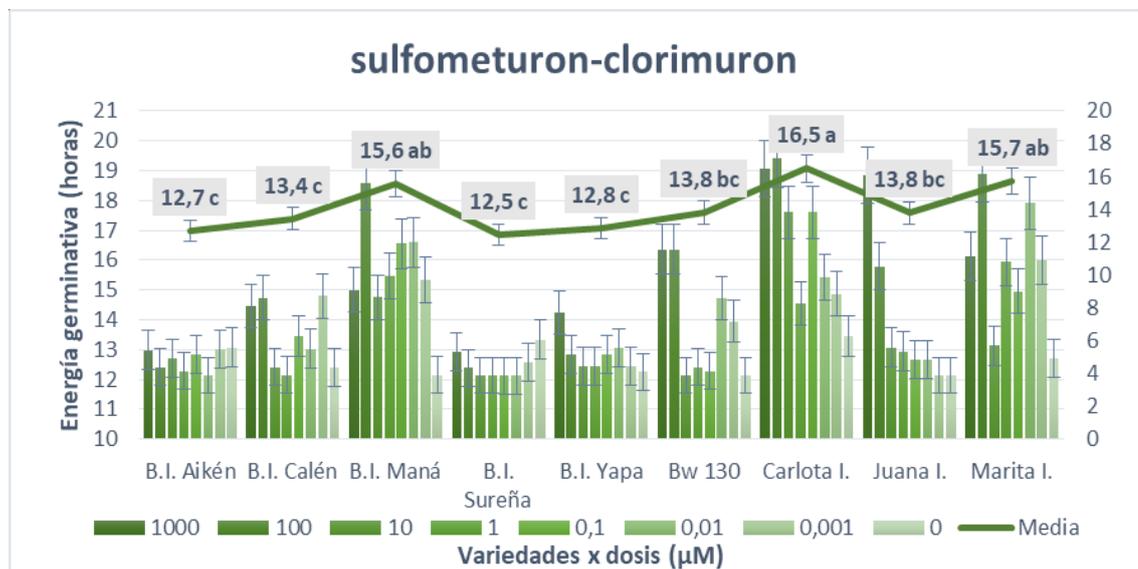


Figura 6. Valores promedio de *energía germinativa* (horas) de cada variedad sometida a diferentes dosis de sulfometuron-clorimuron (μM) (eje izquierdo) y *energía germinativa* promedio de cada variedad (línea continua; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

En lo concerniente al *poder germinativo*, el análisis de varianza mostró diferencias significativas ($P < 0,01$) entre las variedades de avena y las dosis de herbicida estudiadas (Tabla 2). La variedad con mayor *poder germinativo* fue Juana I.,

con el 97,9% y la de menor *poder germinativo* fue Marita I., con 83,6%. Las variedades B.I. Sureña y B.I. Aikén no difirieron significativamente de Juana I. mientras que, B.I. Maná, B.I. Yapa y Carlota I., no mostraron diferencias significativas con la de menor *poder germinativo* (Figura 7). En la comparación de medias entre dosis, aquella asociada a un mayor *poder germinativo* fue el tratamiento testigo (0 μM) con 94,0%; las concentraciones que difirieron significativamente de ese tratamiento fueron 0,001 μM y 1 μM con valores de 87,9% y 88,3%, respectivamente.

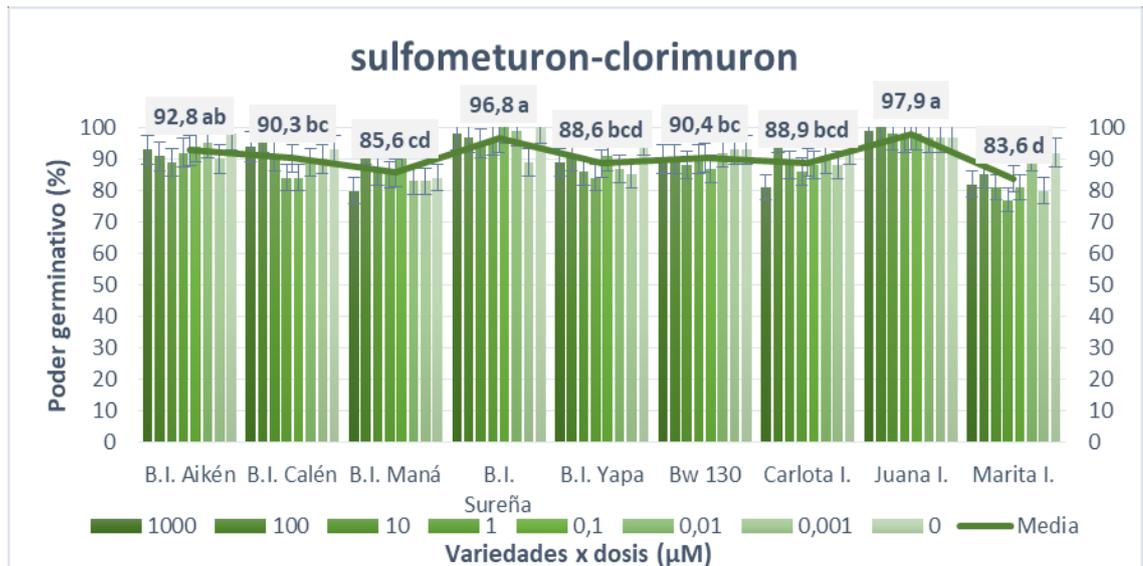


Figura 7. Valores promedio del *poder germinativo* (%) de cada variedad sometida a diferentes dosis de sulfometuron-clorimuron (μM) (eje izquierdo) y *poder germinativo* promedio de cada variedad (línea segmentada; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.2. Efectos de los herbicidas sobre el crecimiento plumular

El *crecimiento plumular* fue evaluado en función de la concentración de herbicida del medio y, a partir del parámetro de concentración de inhibición media (I_{50}) del modelo de regresión, se realizaron comparaciones entre variedades.

3.2.1. Imazapir-imazamox

Se hallaron diferencias significativas en la sensibilidad a imazapir-imazamox de las distintas variedades estudiadas. La variedad de avena que mostró menor sensibilidad fue Marita I., con un valor de I_{50} de 206,3 μM , mientras que la variedad con el registro de mayor sensibilidad fue B.I. Aikén cuya I_{50} se estimó en 4,7 μM (Tabla 3; Figura 8). Marita I., difirió significativamente del resto de variedades, mientras que B.I. Aikén no

mostró diferencias significativas respecto a B.I. Sureña ni a B.I. Juana. El resto de las variedades mostraron una sensibilidad intermedia entre ambos grupos. Considerando el *crecimiento plumular* y comparando los valores de I_{50} , la variedad Marita I., fue 43 veces menos sensible a imazapir-imazamox que B.I. Aikén.

Tabla 3. Valores de los parámetros del modelo de regresión no lineal de respuesta del *crecimiento plumular* a dosis crecientes de imazapir-imazamox de variedades de avena cultivadas en cámaras de crecimiento. Se muestran las dosis de inhibición media (I_{50}) y los coeficientes de determinación de cada modelo (R^2).

Variedad	I_{50} (μM herbicida)*	D (% altura)	b (pendiente)	R^2
Marita I.	206,3 \pm 12,8	80,4	0,93	0,69
Carlota I.	51,6 \pm 2,4	79,1	1,17	0,84
B.I. Yapa	32,5 \pm 5,6	127,2	0,42	0,49
Bw 130	29,2 \pm 1,1	107,4	0,60	0,94
B.I. Maná	25,2 \pm 1,3	101,0	0,21	0,96
B.I. Calén	10,9 \pm 0,6	98,0	0,98	0,83
Juana I.	5,6 \pm 1,0	97,8	0,16	0,78
B.I. Sureña	5,0 \pm 0,2	109,4	1,34	0,93
B.I. Aikén	4,7 \pm 0,4	166,6	0,80	0,76

*Valores promedio \pm intervalo de confianza (95%). Modelo: $y = (D)/(1+(x/I_{50})^b)$.

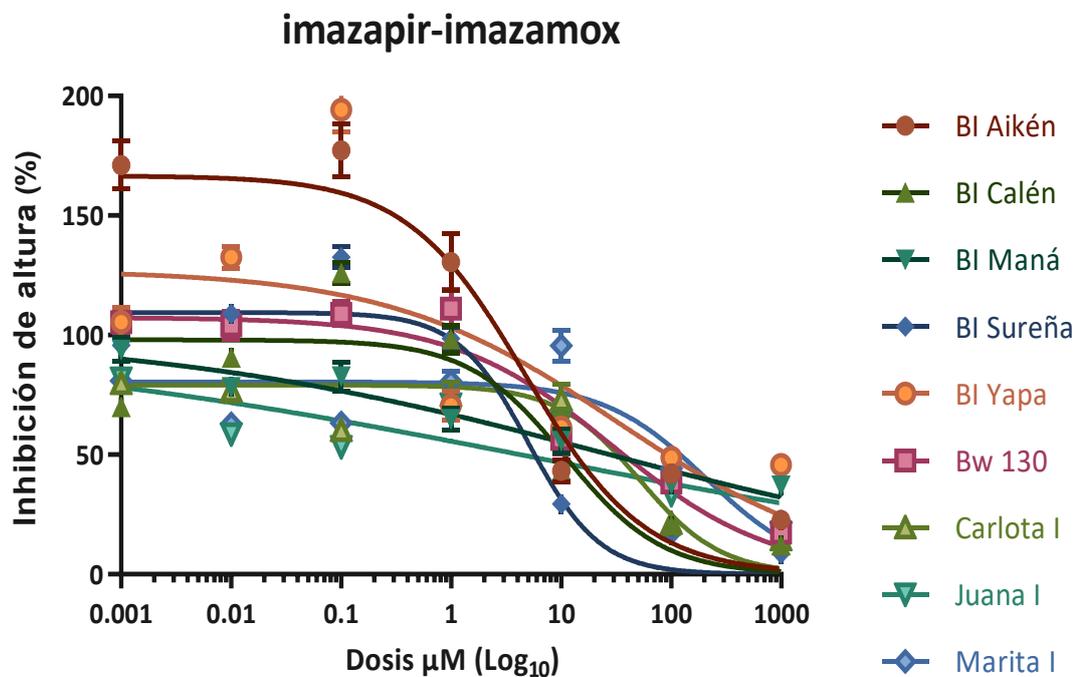


Figura 8. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de imazapir-imazamox sobre la *inhibición de altura* en nueve variedades de avena cultivadas en cámaras de crecimiento. Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.2.2. Diclosulam

Se encontraron diferencias significativas en la sensibilidad a diclosulam de las distintas variedades evaluadas. La variedad que mostró menor sensibilidad fue B.I. Maná con una I_{50} de 40,6 μM ; en tanto que la variedad con el registro de mayor sensibilidad fue B.I. Aikén con una I_{50} estimada en 3,7 μM (Tabla 4; Figura 9). B.I. Maná fue alrededor de 10 veces menos sensible que B.I. Aikén y se diferenció significativamente del resto de las variedades. De forma similar, B.I. Aikén también se diferenció en forma significativa de las demás variedades que, aunque mostraron diferencias entre sí, presentaron un nivel de sensibilidad intermedio entre B.I. Maná y B.I. Aikén.

Tabla 4. Valores de los parámetros del modelo de regresión no lineal de respuesta del crecimiento plumular a dosis crecientes de diclosulam de variedades de avena cultivadas en cámaras de crecimiento. Se muestran las dosis de inhibición media (I_{50}) y los coeficientes de determinación de cada modelo (R^2).

Variedad	I_{50} (μM herbicida)*	D (% altura)	b (pendiente)	R^2
B.I. Maná	40,6 \pm 1,9	141,4	1,64	0,88
B.I. Sureña	26,0 \pm 0,6	112,9	1,23	0,96
Carlota I.	23,2 \pm 0,7	118,0	1,43	0,95
Juana I.	20,4 \pm 0,3	98,2	1,53	0,99
Marita I.	14,3 \pm 0,5	122,8	1,71	0,91
B.I. Calén	14,3 \pm 0,4	119,6	0,85	0,95
B.I. Yapa	7,0 \pm 0,8	134,7	0,45	0,78
Bw 130	5,4 \pm 0,4	144,3	0,52	0,84
B.I. Aikén	3,7 \pm 0,4	154,3	0,59	0,74

*Valores promedio \pm intervalo de confianza (95%). Modelo: $y = (D)/(1+(x/I_{50})^b)$.

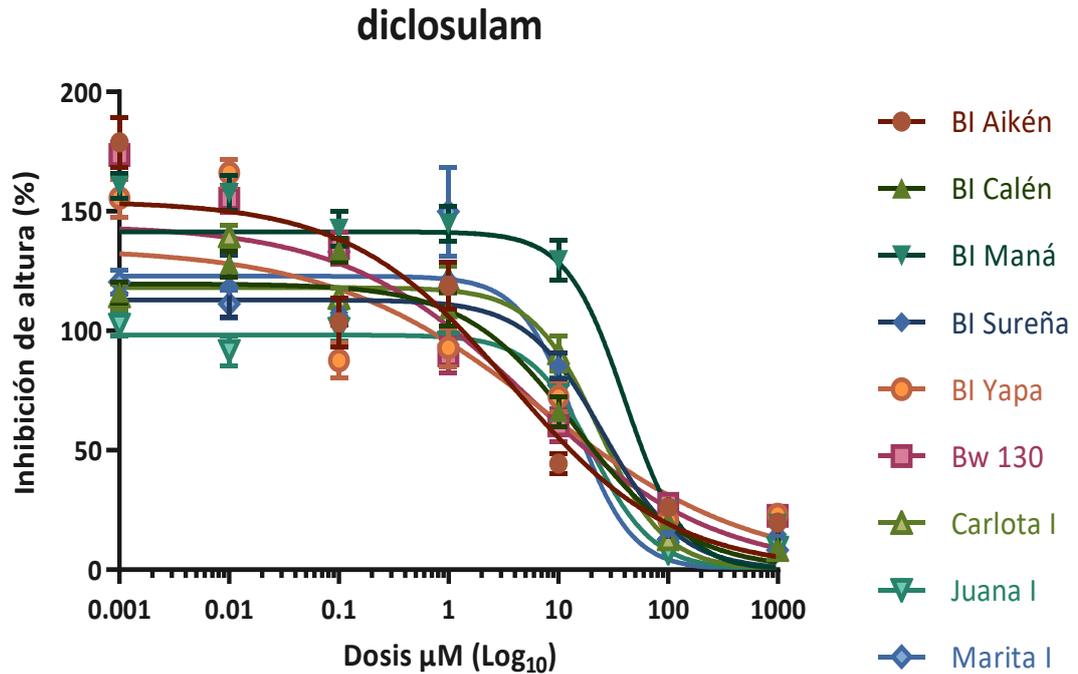


Figura 9. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de diclosulam sobre la *inhibición de altura* en nueve variedades de avena cultivadas en cámaras de crecimiento. Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.2.3. Sulfometuron-clorimuron

Se hallaron diferencias significativas en la sensibilidad a sulfometuron-clorimuron de las distintas variedades de avena (Figura 10). La variedad que mostró menor sensibilidad fue B.I. Maná con una I_{50} de 15,76 μM mientras que Carlota I., fue la variedad con el registro de mayor sensibilidad con una I_{50} de 0,03 μM (Tabla 5; Figura 11). El resto de las variedades presentaron un nivel de sensibilidad intermedio entre ambos materiales, no obstante, B.I. Maná fue 500 veces menos sensible que Carlota I., y 17 veces menos sensible respecto a B.I. Aikén (variedad con mayor tolerancia después de B.I. Maná).

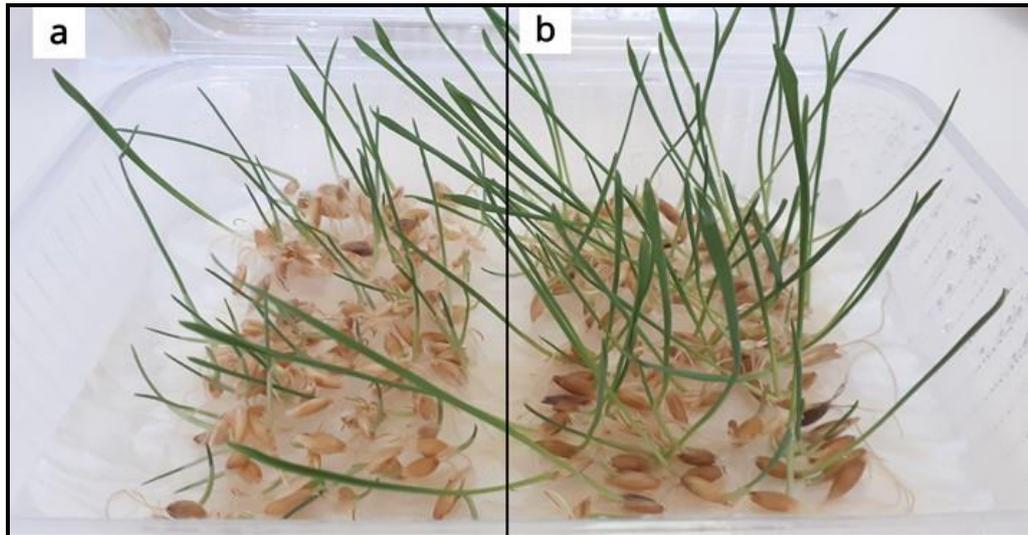


Figura 10. Crecimiento del cultivar Bw 130 (a) y efectos horméticos en el cultivar B.I. Aikén (b) a dosis de 0,01 μM de sulfometuron-clorimuron.

Tabla 5. Valores de los parámetros del modelo de regresión no lineal de respuesta del crecimiento plumular a dosis crecientes de sulfometuron-clorimuron de variedades de avena cultivadas en cámaras de crecimiento. Se muestran las dosis de inhibición media (I_{50}) y los coeficientes de determinación de cada modelo (R^2).

Variedad	I_{50} (μM herbicida)*	D (% altura)	b (pendiente)	R^2
B.I. Maná	15,76 \pm 1,21	127,4	0,72	0,80
B.I. Aikén	0,89 \pm 0,21	151,3	0,37	0,53
B.I. Sureña	0,56 \pm 0,04	120,6	0,46	0,91
B.I. Yapa	0,56 \pm 0,13	107,9	0,24	0,64
B.I. Calén	0,37 \pm 0,03	103,1	0,34	0,92
Juana I.	0,08 \pm 0,01	111,4	0,38	0,79
Marita I.	0,06 \pm <0,01	104,5	0,29	0,90
Bw 130	0,04 \pm <0,01	108,7	0,37	0,76
Carlota I.	0,03 \pm <0,01	105,8	0,39	0,89

*Valores promedio \pm intervalo de confianza (95%). Modelo: $y = (D)/(1+(x/I_{50})^b)$.

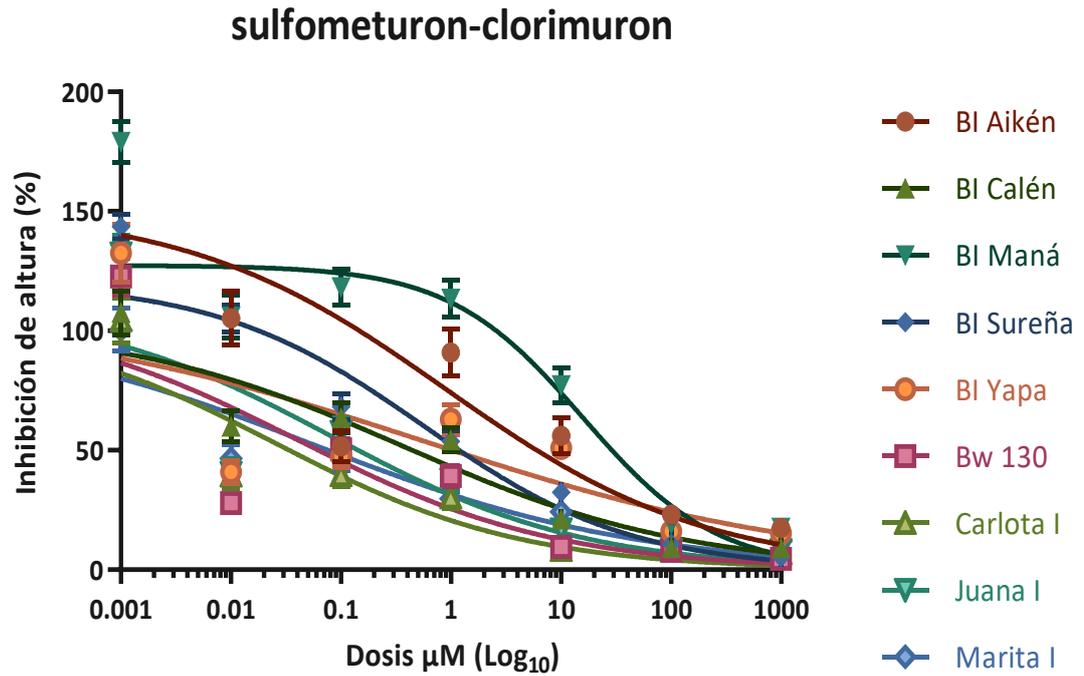


Figura 11. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de sulfometuron-clorimuron sobre la *inhibición de altura* en nueve variedades de avena cultivadas en cámaras de crecimiento. Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

EMERGENCIA DE PLÁNTULAS DE AVENA EN PRESENCIA DE HERBICIDA

3.3. *Efectos de los herbicidas sobre la energía y porcentaje de emergencia de plantas cultivadas en macetas en invernáculo*

3.3.1. *Imazapir -imazamox*

Los resultados del análisis de varianza reflejaron diferencias significativas ($P < 0,01$) entre la *energía de emergencia* de las variedades de avena y entre las dosis de herbicida empleadas (Tabla 6; Figura 12). Las variedades con mayor *energía de emergencia* fueron Juana I., B.I. Maná, Bw 130 y Carlota I., todas ellas necesitaron 3,4 días para lograr el 50% de emergencia, mientras que, B.I. Calén con un promedio de 4,1 días registró la menor *energía de emergencia*. Las variedades B.I. Aikén, B.I. Yapa, B.I. Sureña y Marita I., no difirieron significativamente de las cuatro variedades con mayor *energía de emergencia* ni de la variedad con menor *energía de emergencia* (Figura 13). Para el caso de la comparación de medias entre dosis, aquellas asociadas a una mayor *energía de emergencia* fueron las concentraciones de 1/5x con 3,3 días y 1x con 3,5 días, ambas resultaron las únicas que difirieron significativamente del tratamiento testigo que registró 3,9 días.

Tabla 6. Valores de probabilidad de los ANOVA realizados sobre los datos de *energía de emergencia* y *emergencia final* de nueve variedades de avena sometidas a diferentes dosis de herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS.

Fuente de Variación	imazapir-imazamox	diclosulam	sulfometuron-clorimuron
Energía de emergencia			
Variedad	0,004	0,594	0,332
Dosis	0,002	<0,001	0,030
Emergencia			
Variedad	0,002	0,002	0,247
Dosis	0,596	0,337	0,180

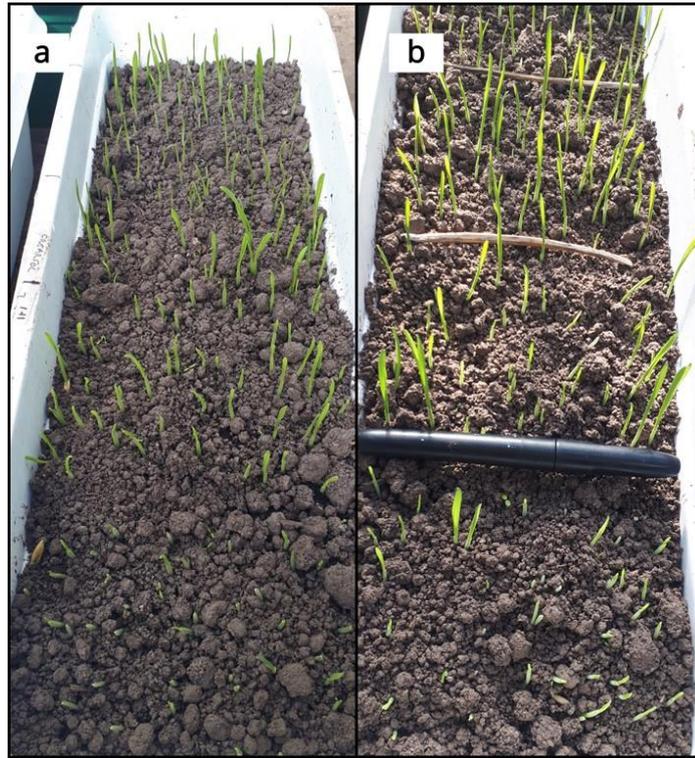


Figura 12. Efectos sobre la *energía de emergencia* y porcentaje de *emergencia*: a) dosis 1x; b) dosis 1/5x de las variedades de avena tratadas con imazapir-imazamox.

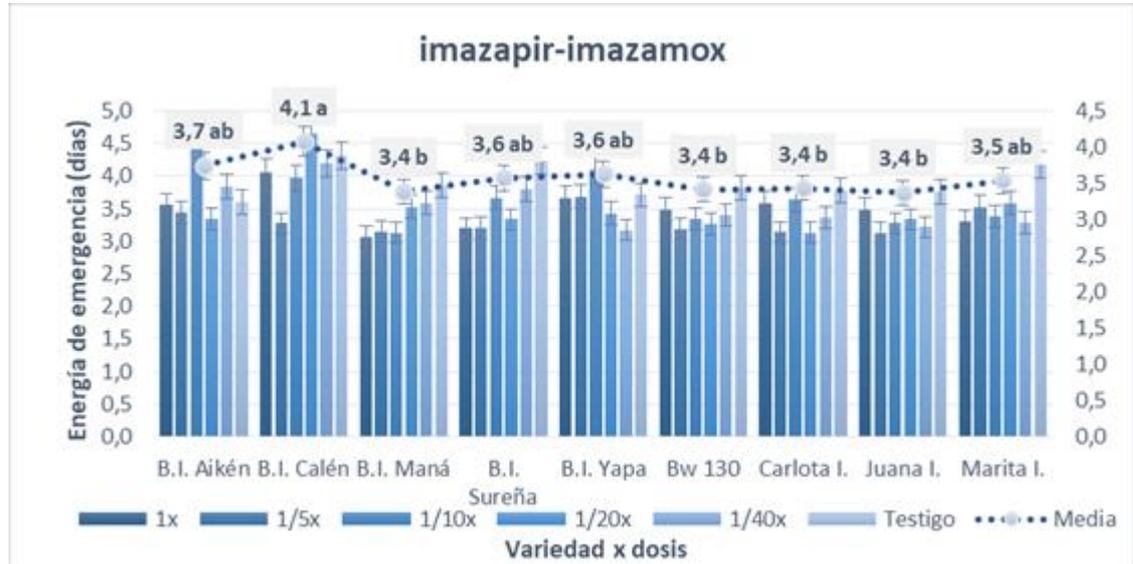


Figura 13. Valores promedio de *energía de emergencia* de cada variedad a dosis decrecientes de imazapir-imazamox (eje izquierdo) y *energía de emergencia* promedio de cada variedad (línea punteada; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

En lo que corresponde a porcentaje de *emergencia*, el análisis de varianza mostró diferencias significativas entre las variedades de avena ($P < 0,01$), pero no se observaron diferencias significativas entre las dosis de herbicida evaluadas (Tabla 6). La

variedad con mayor *emergencia* fue Bw 130 con 98,3% y la de menor *emergencia* fue B.I. Yapa con 85,7%. A excepción de B.I. Yapa, la variedad Bw 130 no difirió significativamente de las demás (Figura 14). Con respecto a la comparación entre dosis, los valores promedio de *emergencia* estuvieron comprendidos entre el 92,9% y 95,6%.

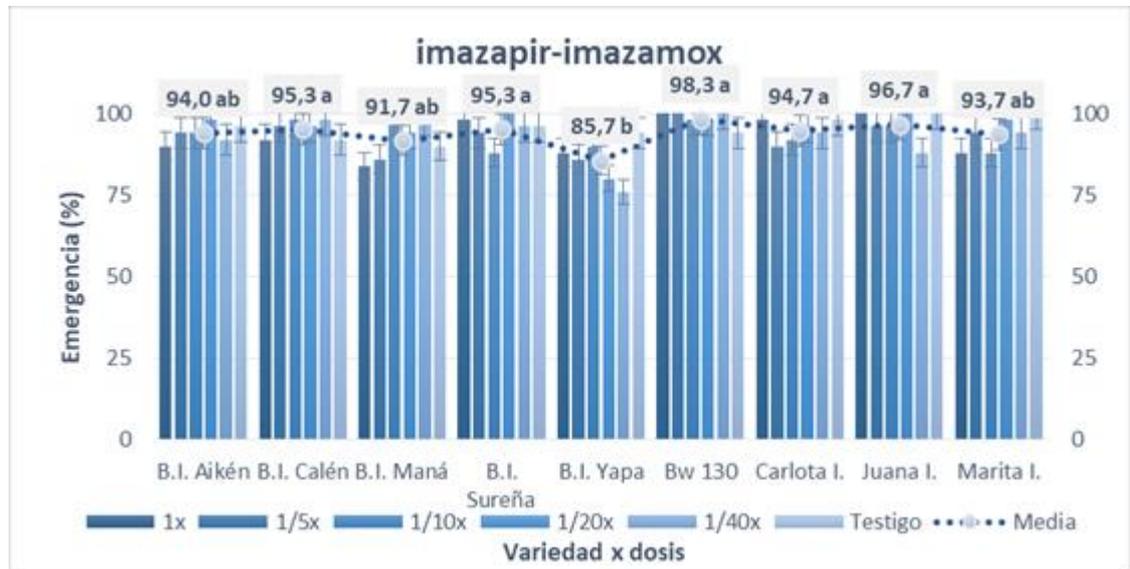


Figura 14. Valores promedio del porcentaje de *emergencia* de cada variedad a dosis decrecientes de imazapir-imazamox (eje izquierdo) y *emergencia* promedio de cada variedad (línea punteada; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.3.2. Diclosulam

Por medio del análisis de varianza no se observaron diferencias estadísticas entre la *energía de emergencia* de las nueve variedades de avena, mientras que la dosis del herbicida condicionó de forma altamente significativa ($P < 0,01$) la *energía germinativa* de avena (Tabla 6). La variedad que requirió más tiempo para alcanzar el 50% de *emergencia* fue B.I. Sureña con un promedio de 4,0 días, mientras que B.I. Yapa, Carlota I. y Marita I. requirieron 3,6 días, el menor tiempo registrado (Figura 15).

Con respecto a la comparación de medias entre dosis, aquella que se asoció a mayor *energía de emergencia* fue la dosis de 1x con 3,3 días, mientras que la dosis 1/40x con 4,5 días fue la de menor valor promedio; ambas dosis resultaron ser las únicas que se diferenciaron significativamente del tratamiento testigo que alcanzó 3,9 días de *energía de emergencia*.

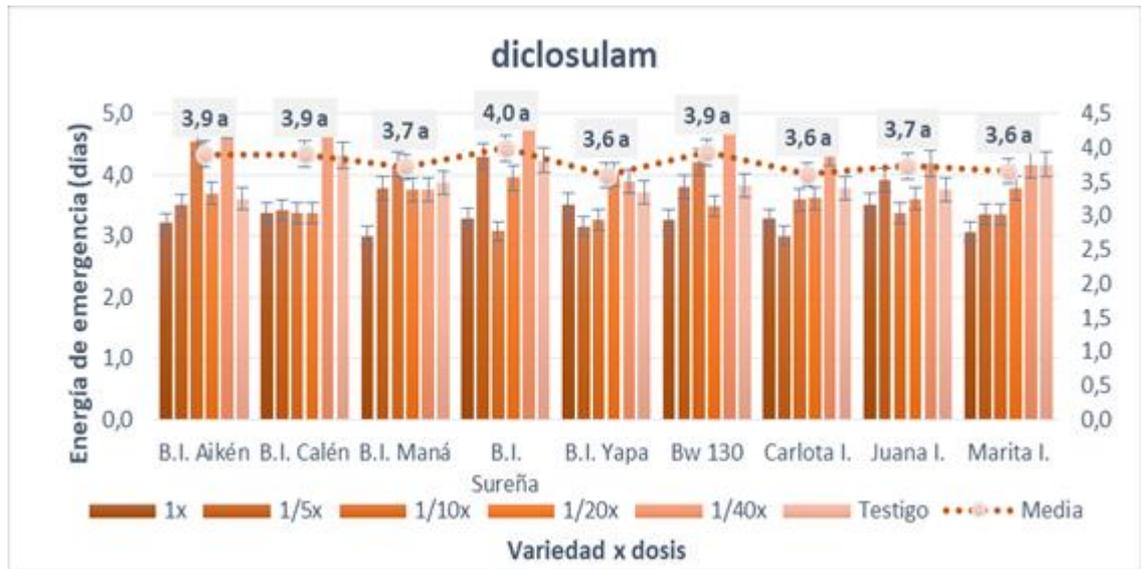


Figura 15. Valores promedio de *energía de emergencia* de cada variedad a dosis decrecientes de diclosulam (eje izquierdo) y *energía de emergencia* promedio de cada variedad (línea punteada; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

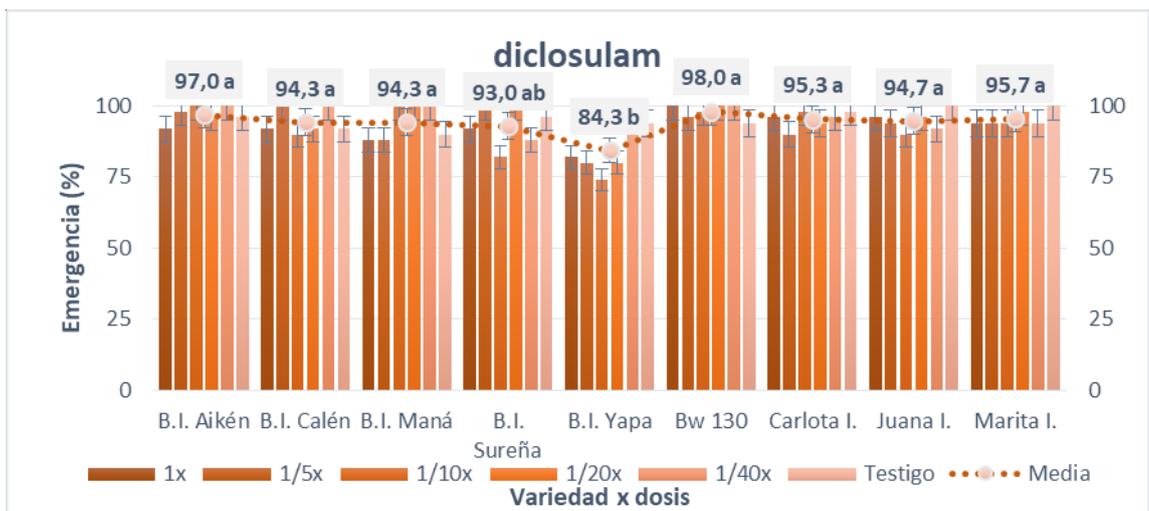


Figura 16. Valores promedio del porcentaje de *emergencia* de cada variedad a dosis decrecientes de diclosulam (eje izquierdo) y *emergencia* promedio de cada variedad (línea punteada; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

En cuanto al porcentaje de *emergencia*, el análisis de la varianza determinó diferencias significativas entre las variedades de avena ($P < 0,01$), mientras que entre las dosis de herbicida no existieron diferencias estadísticas (Tabla 6). La variedad de mayor porcentaje de *emergencia* fue Bw 130 con 98,0% y la de menor promedio fue B.I. Yapa con 84,3%. Excluyendo a B.I. Yapa, las demás variedades no difirieron significativamente de Bw 130, mientras que la variedad B.I. Sureña no mostró diferencias significativas con la de menor *emergencia* (B.I. Yapa) (Figura 16). Si bien

entre dosis no se hallaron diferencias significativas respecto a la inhibición de *emergencia*, las de mayor porcentaje de *emergencia* fueron aquellas tratadas sin herbicida ó con 1/40x (95,6% y 96,2%, respectivamente), mientras que la de menor *emergencia* promedio fue 1/10x con 91,8%.

3.3.3. Sulfometuron-clorimuron

El análisis de la varianza de *energía de emergencia*, no demostró diferencias estadística entre las variedades de avena, pero entre las dosis de herbicida sí hubo diferencias significativas ($P < 0,05$) (Tabla 6). La variedad que registró mayor *energía de emergencia* fue B.I. Aikén con un promedio de 3,4 días y B.I. Calén fue la variedad de menor *energía de emergencia* con 4,0 días. En tanto que el resto de variedades evidenciaron un comportamiento intermedio (Figura 17).

En cuanto a la comparación de medias entre dosis, aquella que demandó menos tiempo en alcanzar el 50% de *emergencia* fue 1/10x con 3,6 días, mientras que 1/40x requirió 4,2 días; ninguna de las dosis estudiadas difirió significativamente del tratamiento testigo.

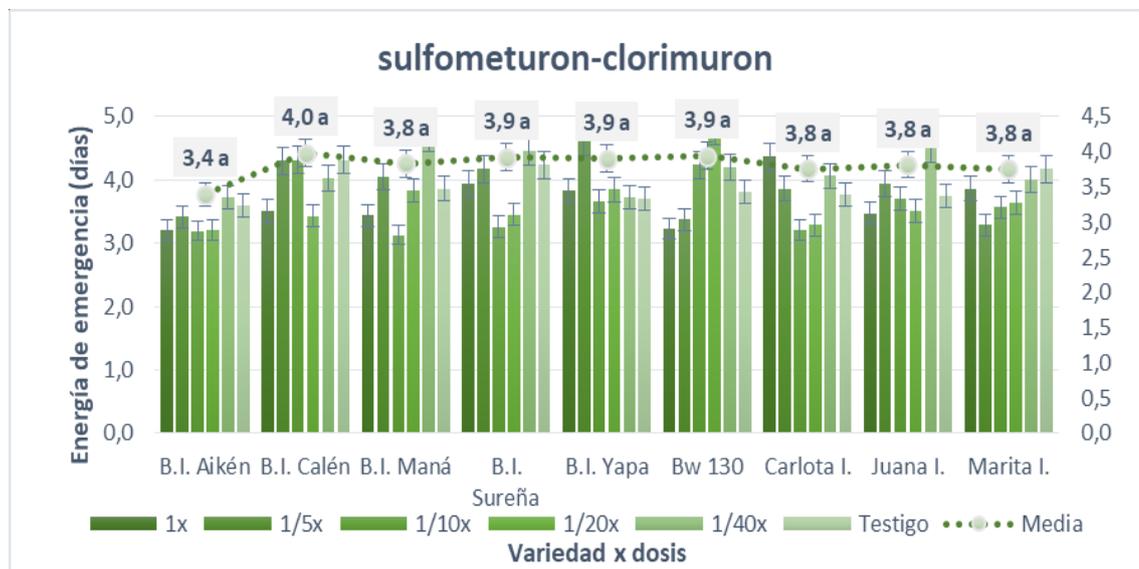


Figura 17. Valores promedio de *energía de emergencia* de cada variedad a dosis decrecientes de sulfometuron-clorimuron (eje izquierdo) y *energía de emergencia* promedio de cada variedad (línea punteada; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

En lo que refiere al porcentaje de *emergencia*, el análisis de la varianza no mostró diferencias significativas ($P > 0,05$) entre las variedades de avena, ni entre las dosis de herbicida (Tabla 6). La variedad con mayor porcentaje de *emergencia* fue B.I.

Maná con un promedio del 95,7%, mientras que la de menor valor promedio fue B.I. Yapa con 89,0% (Figura 18). En cuanto a las dosis, el tratamiento con mayor porcentaje de *emergencia* fue el testigo con 95,6% y el de menor valor promedio fue 1/5x con 90,9%.

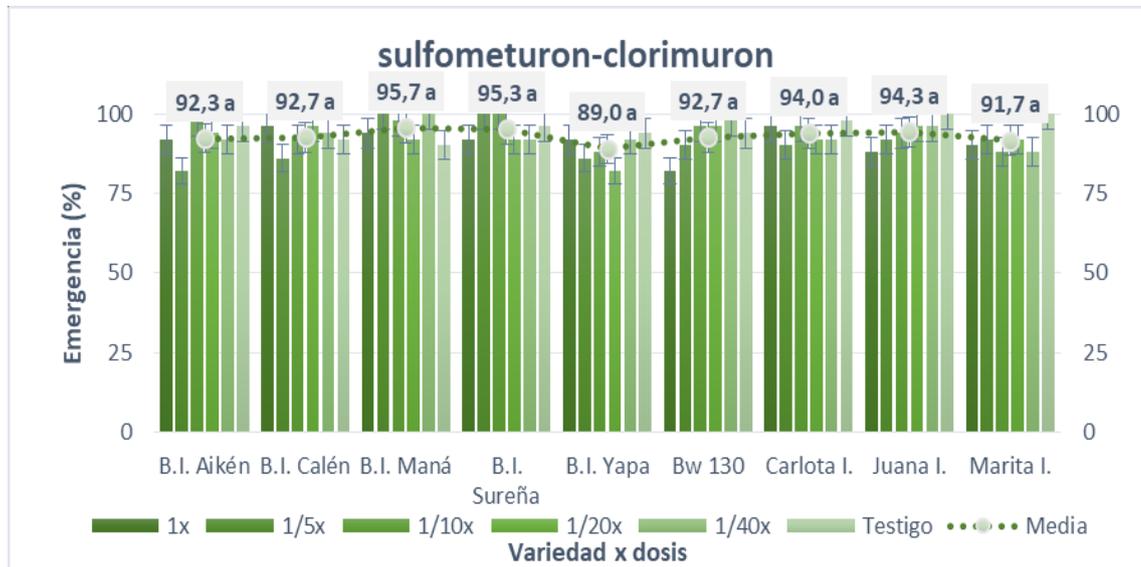


Figura 18. Valores promedio del porcentaje de *emergencia* de cada variedad a dosis decrecientes de sulfometuron-clorimuron (eje izquierdo) y *emergencia* promedio de cada variedad (línea punteada; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.4. Efectos de los herbicidas sobre el crecimiento plumular de avena cultivada en macetas en invernáculo

3.4.1. Imazapir-imazamox

Para este herbicida, la variedad de avena que mostró menor sensibilidad, reflejada en el parámetro dosis de inhibición media (I_{50}) del producto comercial por hectárea ($1x = 2000 \text{ ml p.c ha}^{-1}$), fue B.I. Calén con $453,1 \text{ ml ha}^{-1}$; mientras que la variedad que registró la mayor sensibilidad fue Carlota I., con $113,9 \text{ ml ha}^{-1}$ (Tabla 7; Figura 19 y 20). Por lo tanto, la variedad B.I. Calén fue cuatro veces menos sensible a imazapir-imazamox que Carlota I.

Tabla 7. Valores de los parámetros del modelo de respuesta del *crecimiento plumular* a dosis decrecientes de imazapir-imazamox de variedades de avena cultivadas en macetas en invernáculo. Se muestran las dosis de inhibición media (I_{50}) y los coeficientes de determinación de cada modelo (R^2).

Variedad	I_{50} (ml p.c. ha ⁻¹)*	D (% altura)	b (pendiente)	R ²
B.I. Calén	453,1 ± 55,1	97,0	0,68	0,92
B.I. Sureña	339,3 ± 13,6	98,7	1,31	0,98
B.I. Aikén	297,7 ± 17,2	99,1	0,96	0,98
B.I. Yapa	282,3 ± 12,8	102,0	1,47	0,98
B.I. Maná	278,0 ± 10,2	99,2	1,23	0,99
Bw 130	216,0 ± 9,5	98,0	1,10	0,99
Juana I.	209,7 ± 4,3	100,5	1,19	1,00
Marita I.	164,4 ± 7,9	101,5	1,12	0,98
Carlota I.	113,9 ± 1,1	99,8	0,89	1,00

*Valores promedio ± intervalo de confianza (95%). Modelo: $y = (D)/(1+(x/I_{50})^b)$.

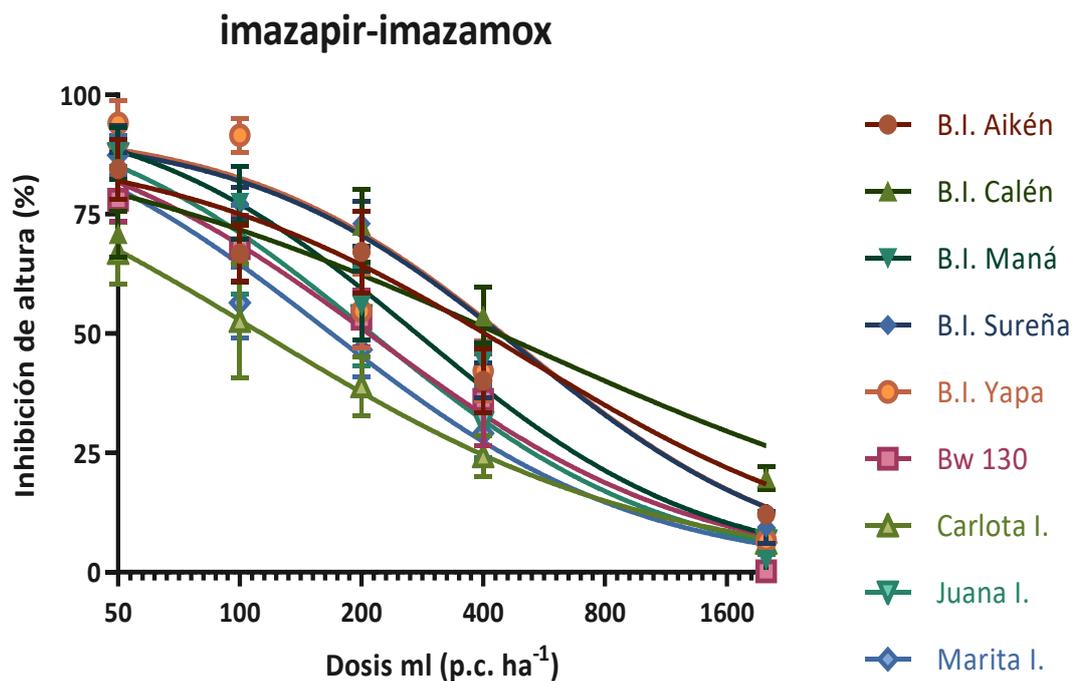


Figura 19. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de imazapir-imazamox sobre la *inhibición de altura* en nueve variedades de avena cultivadas en macetas en invernáculo. Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

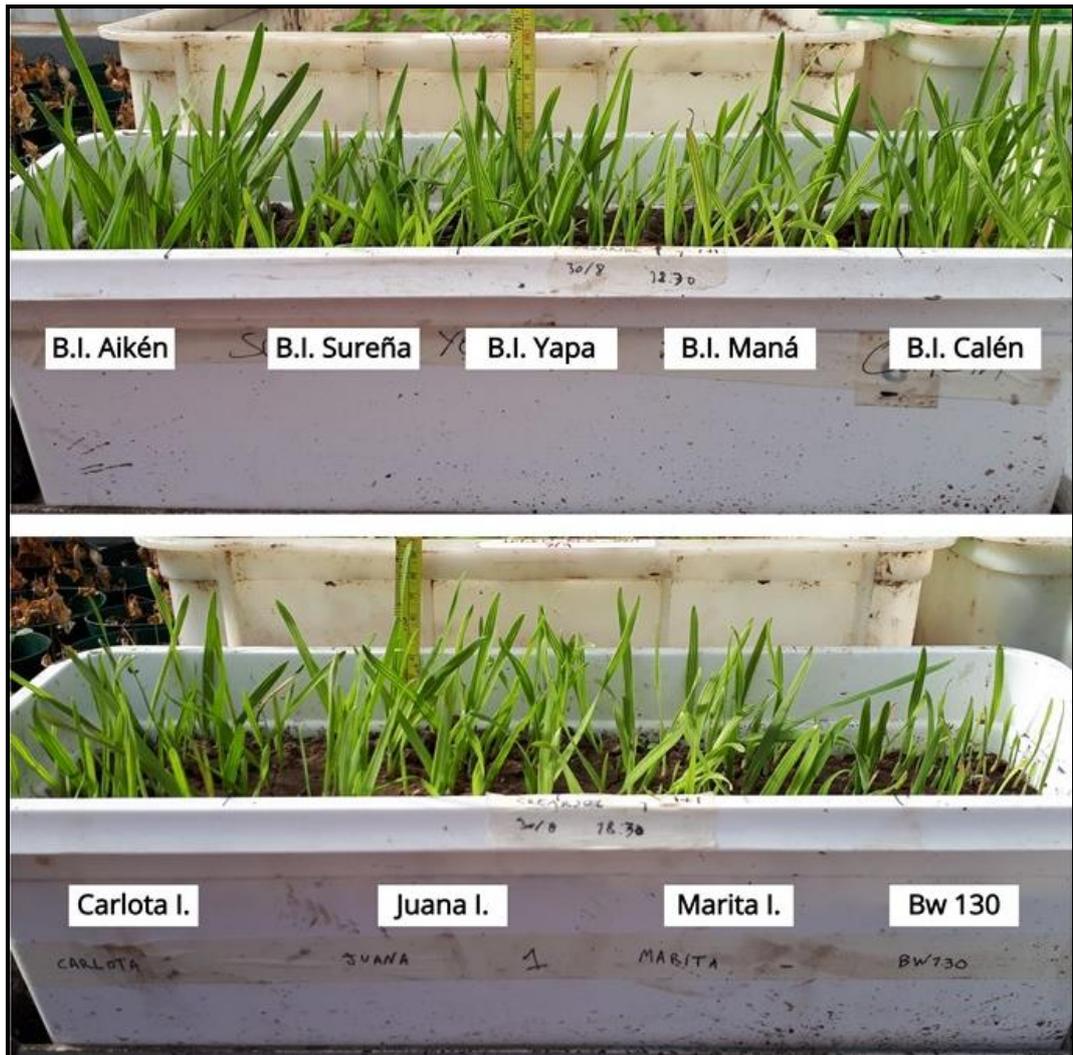


Figura 20. Crecimiento en macetas en invernáculo de variedades de avena tratadas con imazapir-imazamox a dosis de 1x.

3.4.2. Sulfometuron-clorimuron

La variedad de avena que mostró menor sensibilidad a sulfometuron-clorimuron, reflejado en el parámetro I_{50} del p.c. ha^{-1} ($1x= 100 \text{ g}$), fue B.I. Aikén con $76,6 \text{ g ha}^{-1}$, en tanto que la variedad con mayor sensibilidad fue Bw 130 con $28,9 \text{ g ha}^{-1}$ (Tabla 8; Figura 21). B.I. Aikén fue significativamente distinta de las otras variedades, así como lo fue Bw 130. Las demás variedades mostraron un comportamiento intermedio entre ambos niveles de sensibilidad, siendo significativas las diferencias entre sí.

Tabla 8. Valores de los parámetros del modelo de respuesta del *crecimiento plumular* a dosis decrecientes de sulfometuron-clorimuron de variedades de avena cultivadas en macetas en invernáculo. Se muestran las dosis de inhibición media (I_{50}) y los coeficientes de determinación de cada modelo (R^2).

Variedad	I_{50} (g p.c. ha ⁻¹)*	D (% altura)	b (pendiente)	R^2
B.I. Aikén	76,6 ± 3,6	106,2	1,55	0,96
Juana I.	72,4 ± 1,8	103,7	1,40	0,99
B.I. Yapa	57,6 ± 3,9	105,5	1,48	0,94
B.I. Sureña	56,6 ± 1,5	96,13	1,62	0,99
Marita I.	53,9 ± 0,8	102,4	1,89	1,00
Carlota I.	50,5 ± 6,4	107,4	1,08	0,84
B.I. Calén	49,8 ± 2,2	96,63	1,18	0,98
B.I. Maná	42,1 ± 2,0	100,1	1,26	0,98
Bw 130	28,9 ± 1,7	104,8	1,63	0,96

*Valores promedio ± intervalo de confianza (95%). Modelo: $y = (D)/(1+(x/I_{50})^b)$.

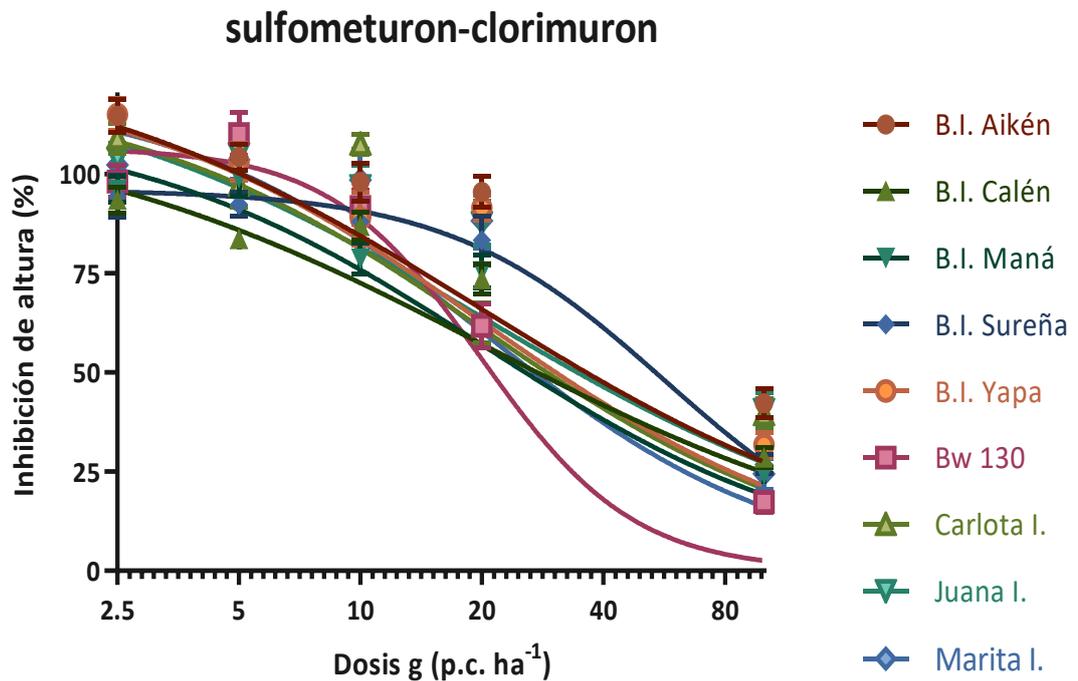


Figura 21. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de sulfometuron-clorimuron sobre la *inhibición de altura* en nueve variedades de avena cultivadas en macetas en invernáculo. Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.4.3. Diclosulam

Para el caso de este herbicida no se alcanzó el 50% de *inhibición de altura* con la dosis máxima evaluada y por tanto no corresponde el ajuste del modelo de regresión para la estimación del parámetro I_{50} . En consecuencia, se realizó un análisis de varianza para comparar el efecto del herbicida sobre la *altura relativa* de las plantas. No se encontraron diferencias significativas ($P > 0,05$) entre las variedades de avena, pero sí, entre las dosis del herbicida (Tabla 9).

La variedad de avena de mayor *altura relativa* fue Juana I., con el 92,5% y la de menor *altura relativa* fue B.I. Calén con el 80,0% sin diferir significativamente entre ellas, como se indicó antes (Figura 22). En la comparación entre dosis, aquella asociada a un mayor promedio de *altura relativa* respecto al control sin herbicida fue la dosis de 3 g ha⁻¹ con 97,6% y no se diferenció significativamente de 0,75 g ha⁻¹ y 1,5 g ha⁻¹. En tanto, la dosis que condujo a la menor *altura relativa* fue de 30 g ha⁻¹ (máxima dosis evaluada) con el 62,2% y difirió significativamente de las demás.

Tabla 9. Valores de probabilidad del ANOVA realizado a la determinación de *altura relativa* de nueve variedades de avena cultivadas en maceta en invernáculo expuestas a dosis decrecientes del herbicida diclosulam.

Fuente de Variación	Altura de planta
Variedad	0,142
Dosis	<0,001

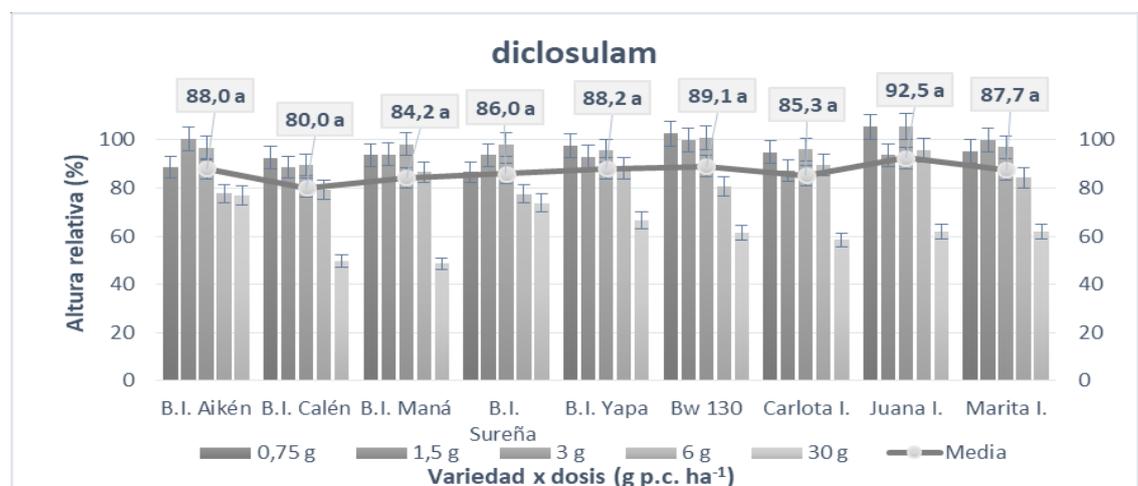


Figura 22. Valores de *altura relativa* de cada variedad de avena cultivadas en maceta en invernáculo a dosis decrecientes de diclosulam (eje izquierdo) y promedios de *altura relativa* por variedad (línea continua; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.5. Efectos de los herbicidas sobre la producción de biomasa aérea de avena cultivada en macetas en invernáculo

3.5.1. Imazapir-imazamox

El análisis de varianza mostró diferencias significativas ($P < 0,01$) entre la producción de *biomasa aérea* relativa de las variedades de avena y entre las dosis de herbicida estudiadas a los 21 días desde la siembra (Tabla 10). La variedad tratada con herbicida y con mayor *peso seco relativo* fue B.I. Calén con 111,0% mientras que la de menor *peso seco relativo* fue Carlota I., con 62,3%. Las variedades B.I. Aikén, B.I. Sureña, B.I. Yapa y B.I. Maná no mostraron diferencias significativas respecto a B.I. Calén mientras que Marita I., Bw 130, Juana I., B.I. Maná y B.I. Yapa no difirieron significativamente de Carlota I. (Figura 23).

En cuanto a la comparación de medias entre dosis, aquella asociada a mayor *biomasa aérea* relativa fue 1/20x con el 99,2% y su diferencia no fue significativa de 1/40x, 1/10x y 1/5x; todas las dosis mencionadas anteriormente difirieron significativamente de 1x cuyo *peso seco relativo* promedio fue de 37,5%.

Tabla 10. Valores de probabilidad de los ANOVA realizados en la determinación del *peso seco* y el *peso seco relativo* de nueve variedades de avena cultivadas en maceta en invernáculo expuestas a dosis decrecientes de herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS.

Fuente de Variación	imazapir-imazamox	diclosulam	sulfometuron-clorimuron
Peso seco			
Variedad	<0,001	<0,001	<0,001
Dosis	<0,001	<0,001	<0,001
Peso seco relativo			
Variedad	<0,001	0,003	0,005
Dosis	<0,001	<0,001	<0,001

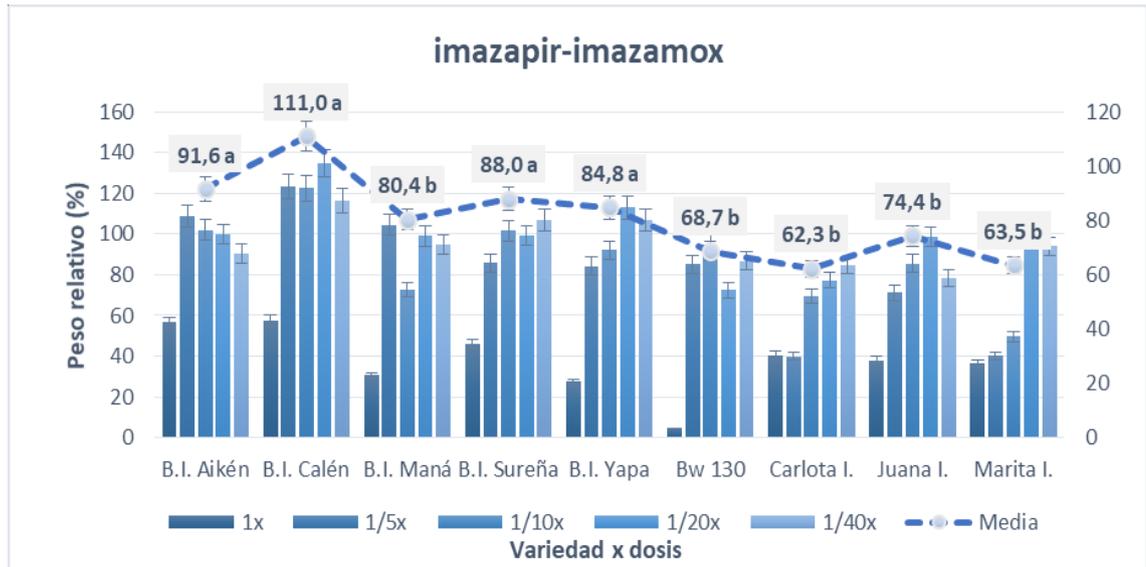


Figura 23. Valores de *peso seco relativo* de cada variedad de avena cultivada en macetas en invernáculo a dosis decrecientes de imazapir-imazamox (eje izquierdo) y promedios de *peso seco relativo* por variedad (línea segmentada; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.5.2. Diclosulam

En cuanto a la producción relativa de *biomasa aérea* de plantas tratadas con diclosulam, el análisis de varianza determinó diferencias significativas ($P < 0,01$) sobre ambas fuentes de variación (cultivares y dosis) (Tabla 10). El cultivar B.I. Calén con 123,6% fue el de mayor *peso seco relativo* y B.I. Sureña con un 81,0% el de menor *peso relativo*. Para los cultivares Bw 130 y B.I. Yapa no se observaron diferencias significativas con aquel de mayor *peso seco relativo* (B.I. Calén) mientras que todos los cultivares, excepto B.I. Calén, no difirieron significativamente de B.I. Sureña (Figura 24).

En lo referente a la comparación de medias entre dosis, aquella asociada a mayor *biomasa aérea* relativa fue 1/5x con el 114,6%. Este valor no mostró una diferencia significativa con el de las dosis 1/10x y 1/20x; a excepción de 1/5x, todas las demás dosis no difirieron significativamente de 1x, cuyo *peso seco relativo* fue de 85,1%.

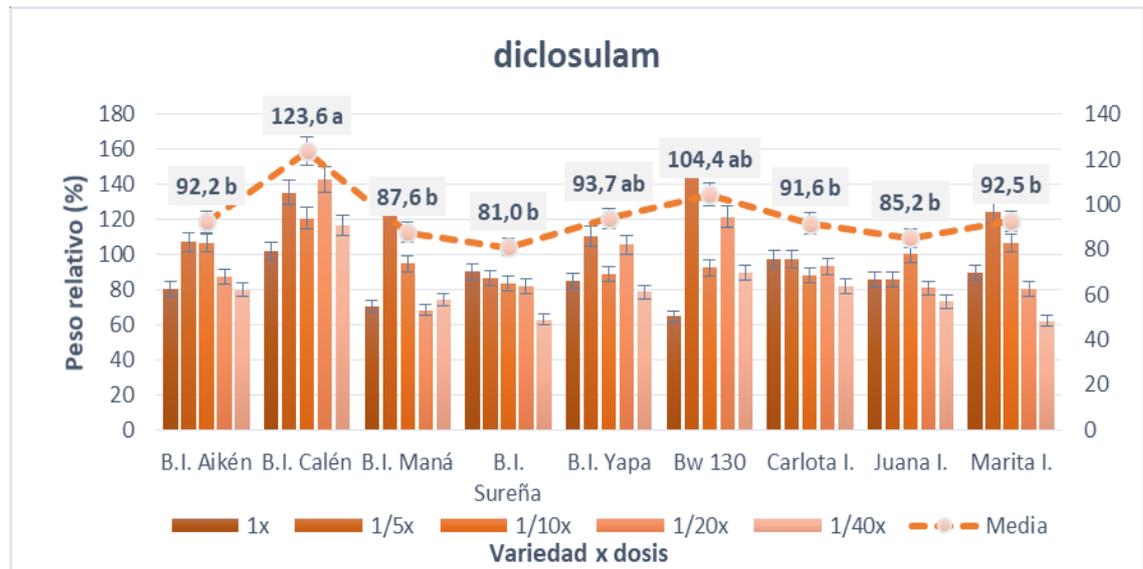


Figura 24. Valores de *peso seco relativo* de cada variedad de avena cultivada en macetas en invernáculo a dosis decrecientes de diclosulam (eje izquierdo) y promedios de *peso seco relativo* por variedad (línea segmentada; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.5.3. Sulfometuron-clorimuron

El análisis de varianza realizado sobre los datos de producción relativa de *biomasa aérea* indicó diferencias significativas ($P < 0,01$) entre las variedades de avena y entre las dosis de herbicida (Tabla 10). La variedad con mayor *peso relativo* promedio fue B.I. Calén con 104,6% y Bw 130 fue la de menor *peso seco relativo* con 59,5%. Todas las variedades, excepto Bw 130, no difirieron significativamente de aquella con mayor *peso seco relativo* (B.I. Calén) mientras que la variedad con menor *peso seco relativo* (Bw 130) no mostró diferencias significativas con el resto de variedades a excepción de B.I. Calén y Marita I. (Figura 25).

La comparación de medias entre dosis indicó que aquella asociada a mayor *peso seco relativo* fue la dosis de 1/10x con 103,4%. Este valor no tuvo una diferencia significativa con el de las dosis de 1/20x, 1/5x y 1/40x mientras que todas estas dosis sí difirieron significativamente de 1x cuyo *peso seco relativo* fue de 49,3%.

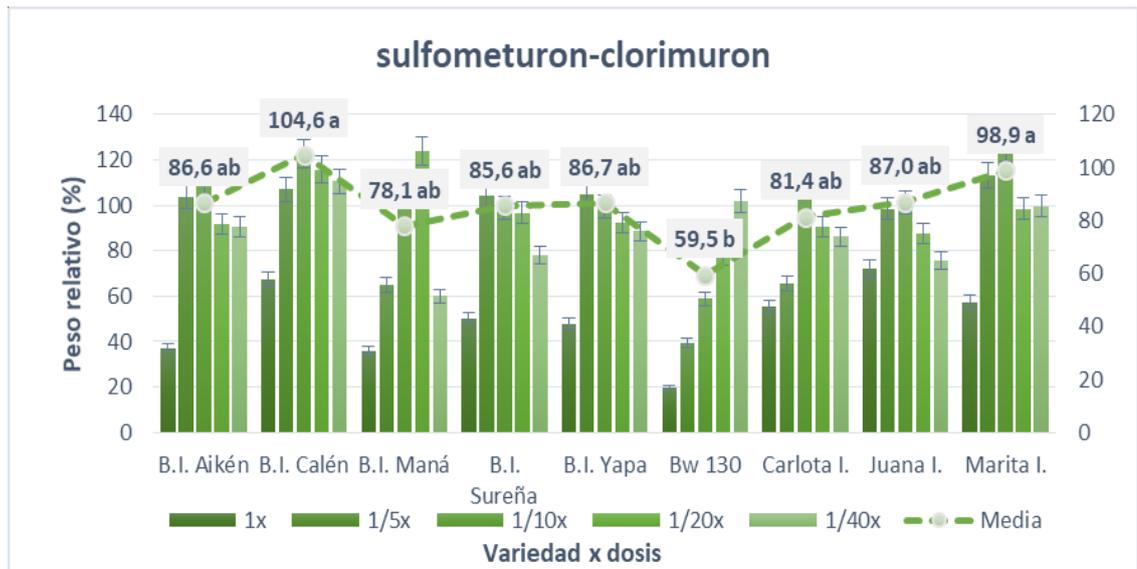


Figura 25. Valores de *peso seco relativo* de cada variedad de avena cultivada en macetas en invernáculo a dosis decrecientes de sulfometuron-clorimuron (eje izquierdo) y *peso seco relativo* por variedad (línea segmentada; eje derecho). Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA DE VARIEDADES DE AVENA EN IMPLANTACIÓN CULTIVADAS A CAMPO BAJO DIFERENTES DOSIS DE HERBICIDAS

3.6. Efecto de imazapir-imazamox sobre la producción de biomasa aérea relativa

Se observó que la variedad de avena que mostró menor *fitotoxicidad*, reflejada en el parámetro dosis de inhibición media (I_{50}) del producto comercial por hectárea (p.c ha⁻¹), fue B.I. Yapa con 1081 ml ha⁻¹. Por otra parte, la variedad que registró la mayor *fitotoxicidad* fue Carlota I., con 552,4 ml ha⁻¹ (Tabla 11; Figura 26 y 27). Comparando los intervalos de confianza de las I_{50} estimadas para cada variedad, B.I. Aikén, B.I. Calén y Bw 130 no difirieron de B.I. Yapa. Estas cuatro variedades se comportaron como las *menos sensibles* al herbicida (Tabla 11). En el mismo análisis, Carlota I. (caracterizada como el material más sensible) difirió significativamente del resto de las variedades (Tabla 11). En tanto, Juana I., B.I. Maná, B.I. Sureña y Marita I. mostraron una sensibilidad intermedia (Tabla 11).



Figura 26. Biomasa aérea de las variedades de avena B.I. Yapa y Carlota I. en implantación, cultivadas a campo bajo la dosis 1x de imazapir-imazamox y testigo a los 60 días post-aplicación.

Tabla 11. Valores de los parámetros del modelo de regresión no lineal de la respuesta de *biomasa aérea* de las variedades de avena en implantación, cultivadas a campo a dosis crecientes de imazapir-imazamox. Se muestran las dosis de inhibición media (I_{50}) y los coeficientes de determinación de cada modelo (R^2).

Variedad	I_{50} (ml p.c. ha ⁻¹)*	D (% altura)	b (pendiente)	R^2
B.I. Yapa	1081,0 ± 261,2	98,4	0,53	0,81
B.I. Aikén	1051,0 ± 28,4	99,8	2,42	0,99
B.I. Calén	952,4 ± 31,0	102,9	1,71	0,99
Bw 130	894,5 ± 44,8	101,0	1,19	0,98
Juana I.	777,7 ± 29,3	99,2	1,74	0,98
B.I. Maná	766,2 ± 29,0	100,4	0,81	0,99
B.I. Sureña	721,3 ± 55,5	104,7	1,44	0,94
Marita I.	710,3 ± 84,8	110,7	1,80	0,85
Carlota I.	552,4 ± 37,4	101,6	1,09	0,97

*Valores promedio ± intervalo de confianza (95%). Modelo: $y = (D)/(1+(x/I_{50})^b)$.

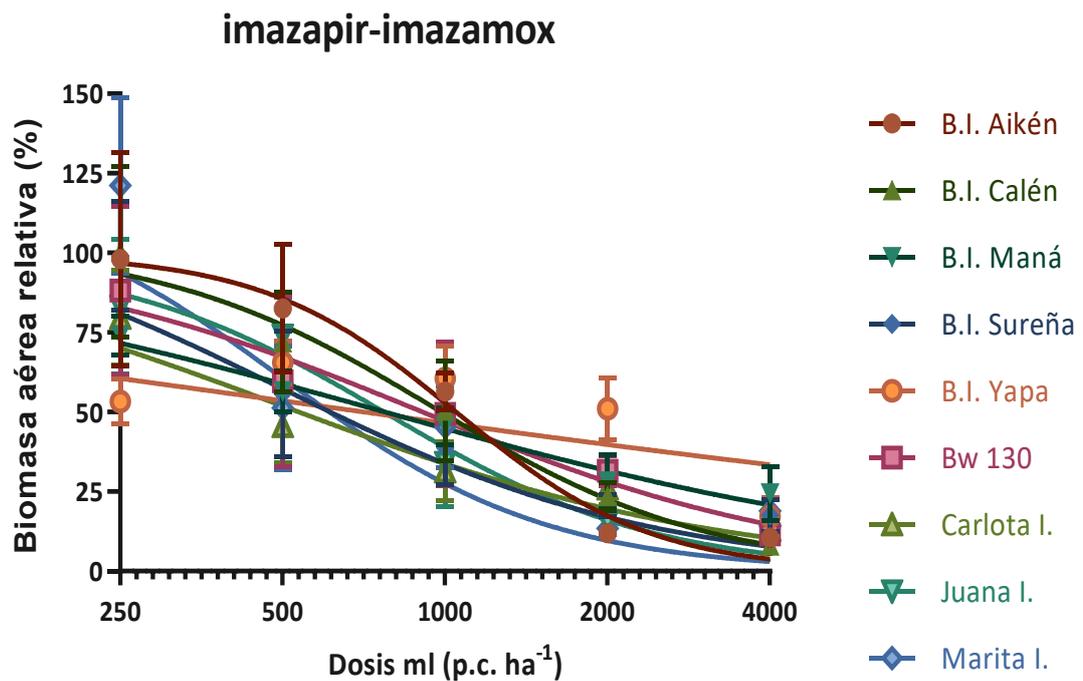


Figura 27. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de imazapir-imazamox sobre la producción de *biomasa aérea relativa* de nueve variedades de avena en implantación, cultivadas a campo. Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.7. Efecto de diclosulam sobre la producción de biomasa aérea relativa

Para este herbicida la variedad de avena que mostró menor *fitotoxicidad*, reflejada en el parámetro I_{50} del p.c ha⁻¹, fue B.I. Calén con 13,2 g ha⁻¹ mientras que la variedad con el mayor registro de *fitotoxicidad* fue Juana I., con 3,5 g ha⁻¹ (Tabla 12; Figura 28). B.I. Yapa no difirió respecto a la *sensibilidad* detectada sobre B.I. Calén y, B.I. Maná mostró una *sensibilidad* similar a Juana I. (Tabla 12). Las demás variedades, si bien mostraron diferencias significativas entre sí, se asociaron a una *sensibilidad* intermedia entre ambos grupos (Tabla 12).

Tabla 12. Valores de los parámetros del modelo de regresión no lineal de la respuesta de *biomasa aérea* de las variedades de avena en implantación, cultivadas a campo a dosis crecientes de diclosulam. Se muestran las dosis de inhibición media (I_{50}) y los coeficientes de determinación de cada modelo (R^2).

Variedad	I_{50} (g p.c. ha ⁻¹)*	D (% altura)	b (pendiente)	R^2
B.I. Calén	13,2 ± 0,7	99,4	0,88	0,72
B.I. Yapa	12,4 ± 1,2	101,1	0,72	0,74
B.I. Aikén	8,9 ± 0,5	100,7	0,85	0,67
Bw 130	8,4 ± 0,5	101,0	0,94	0,63
Carlota I.	8,3 ± 0,6	98,8	1,15	0,56
Marita I.	6,8 ± 0,4	100,1	0,53	0,77
B.I. Sureña	5,3 ± 0,4	100,3	0,83	0,61
B.I. Maná	3,9 ± 0,7	100,0	0,43	0,75
Juana I.	3,5 ± 0,3	100,3	0,88	0,58

*Valores promedio ± intervalo de confianza (95%). Modelo: $y = (D)/(1+(x/I_{50})^b)$.

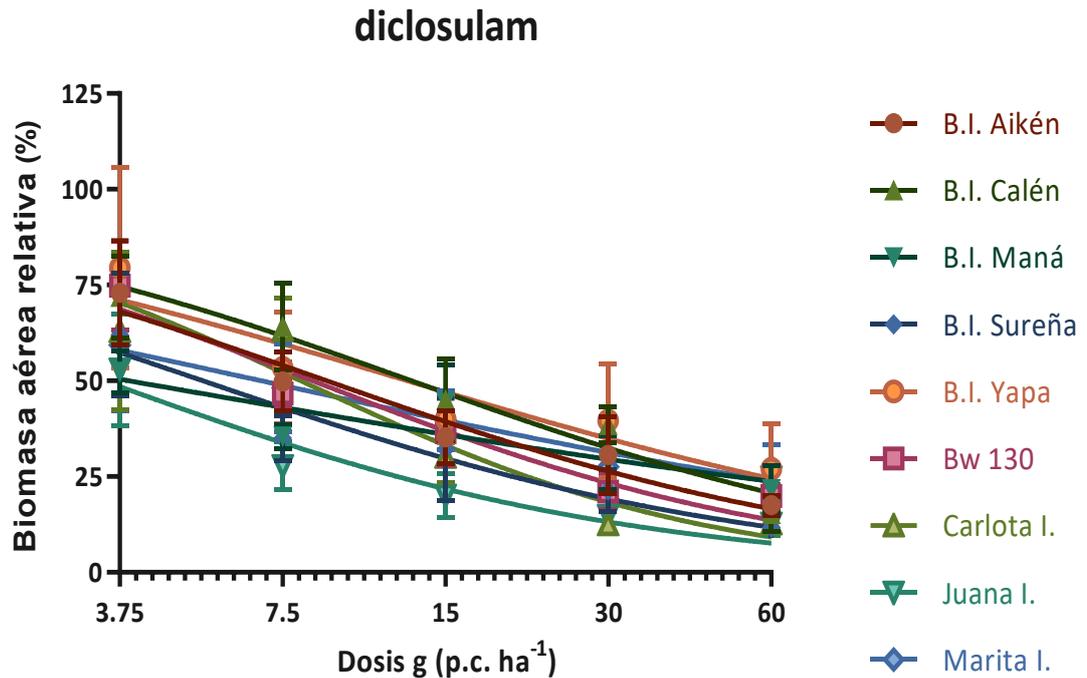


Figura 28. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de diclosulam sobre la producción de biomasa aérea relativa de nueve variedades de avena en implantación, cultivadas a campo. Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.8. Efecto de sulfometuron-clorimuron sobre la biomasa aérea relativa

En el caso de este herbicida, el cultivar de avena que mostró menor *fitotoxicidad* reflejada en el parámetro I_{50} del p.c. ha⁻¹ fue también B.I. Calén con 64,4 g ha⁻¹ mientras que el cultivar reconocido con la mayor *fitotoxicidad* fue Carlota I. con 20,9 g ha⁻¹ (Tabla 13; Figura 29). Por su parte, Marita I. no difirió significativamente respecto a B.I. Calén, sin embargo todas las variedades mostraron una *sensibilidad* significativamente menor a Carlota I. (Tabla 13).

Tabla 13. Valores de los parámetros del modelo de regresión no lineal de la respuesta de *biomasa aérea* de variedades de avena en implantación, cultivadas a campo a dosis crecientes de sulfometuron-clorimuron. Se muestran las dosis de inhibición media (I_{50}) y los coeficientes de determinación de cada modelo (R^2).

Variedad	I_{50} (g p.c. ha ⁻¹)*	D (% altura)	b (pendiente)	R^2
B.I. Calén	64,4 ± 4,7	99,9	1,21	0,95
Marita I.	56,0 ± 4,5	101,9	1,14	0,95
B.I. Aikén	54,7 ± 3,3	103,1	1,89	0,96
Bw 130	53,6 ± 9,3	98,1	0,68	0,86
B.I. Maná	53,0 ± 6,4	105,6	1,07	0,88
B.I. Yapa	34,8 ± 0,4	100,0	1,11	1,00
B.I. Sureña	30,5 ± 0,7	102,1	2,17	0,99
Juana I.	29,1 ± 0,9	97,8	2,95	0,98
Carlota I.	20,9 ± 2,1	99,9	0,54	0,97

*Valores promedio ± intervalo de confianza (95%). Modelo: $y = (D)/(1+(x/I_{50})^b)$.

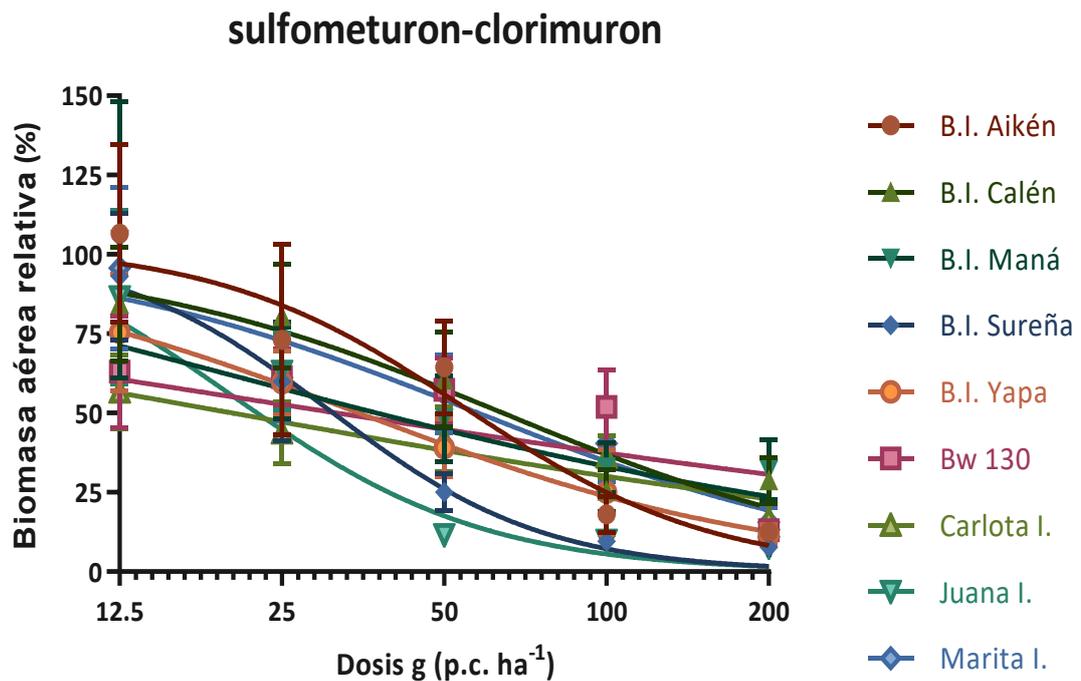


Figura 29. Curvas de dosis-respuesta del efecto de diferentes dosis de sulfometuron-clorimuron sobre la inhibición de *biomasa aérea* de nueve variedades de avena en implantación, cultivadas a campo. Barras de dispersión indican el error estándar de la media.

3.9. Discusión

En respuesta al primer objetivo específico planteado, en los experimentos realizados las variedades de avena mostraron diferencias en cuanto a la sensibilidad a herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS. Salvo algunas excepciones, gran parte del contraste de sensibilidad detectado entre variedades en los experimentos de germinación y crecimiento plumular en condiciones controladas (cámara de crecimiento) resultaron inconsistentes con los resultados de los experimentos de macetas en invernáculo y de campo. En cambio, estos dos últimos experimentos mostraron una alta consistencia en la caracterización relativa de la sensibilidad de las variedades (Tabla 14).

En términos generales, si se toman en cuenta las variables medidas en los experimentos de macetas en invernáculo y a campo, los cultivares B.I. Calén y B.I. Aikén se detectaron como aquellos con mayor tolerancia a imazapir-imazamox mientras que entre los menos tolerantes se agrupó a Carlota I. y Marita I. Para el herbicida diclosulam, B.I. Calén se destacó como la variedad más tolerante mientras que Juana I. fue el material menos tolerante. Cuando se empleó sulfometuron-clorimuron, B.I. Calén junto a B.I. Aikén fueron las variedades más tolerantes y Bw 130 junto a Carlota I., las menos tolerantes (Tabla 14).

Los estudios de variabilidad genética entre cultivares de avena han abordado aspectos de crecimiento, producción de biomasa aérea, rendimiento y calidad de grano, sensibilidad a plagas y a enfermedades (Condón *et al.*, 2010; Wehrhahne, 2015; Mourtzinis *et al.*, 2015), sin embargo, la variación en cuanto a la sensibilidad a herbicidas ha sido poco estudiada.

Estudios efectuados por Dhammu (2016) para determinar la tolerancia de cinco variedades nuevas de avena a varios herbicidas selectivos indican que los herbicidas pre-emergentes trifluralina, clorsulfuron, pendimetalin, metolaclor + prosulfocarb y diuron causaron reducción del rendimiento en biomasa aérea sobre una de las variedades contrastando con los demás materiales evaluados. Este antecedente sustenta la variabilidad intra-específica respecto a la sensibilidad a herbicidas en cultivares de avena como los alcanzados en el presente trabajo. Asimismo, las diferencias en los niveles de tolerancia no se asocian a uno ó unos pocos genotipos, sino que parece depender del herbicida considerado. En tal sentido, mientras que clorsulfuron aplicado en post-emergencia, disminuyó el rendimiento de grano en cuatro de las cinco

variedades de avena, otros herbicidas afectaron el rendimiento en una sola variedad (Dhammu, 2016).

Incluso entre herbicidas de un mismo sitio de acción, la sensibilidad de cultivares de avena parece mostrar variantes. En estudios de tolerancia de avena a diferentes dosis de herbicidas post-emergentes, una sulfonilurea como tribenuron no se asoció a mermas de rendimiento de grano en ningún cultivar de avena, en tanto que la aplicación de mesosulfuron, también perteneciente a la familia química de sulfonilureas, condujo a una muerte de plantas de entre el 65% y 86% condicionando el rendimiento según el cultivar (MacRae *et al.*, 2007). Estos antecedentes sustentan la necesidad de evaluar el comportamiento de cada variedad de avena en función de cada herbicida.

En el presente trabajo, se halló que imazapir-imazamox y sulfometuron-clorimuron fueron los herbicidas más agresivos, en términos generales, al determinar el impacto en la producción de biomasa aérea. Pese a esto, se pudo detectar aquellos materiales más y menos sensibles a cada uno de ellos (Tabla 14).

Considerando todos los experimentos y las variables evaluadas, B.I. Calén fue la variedad que mostró la menor sensibilidad a imazapir-imazamox tanto en las evaluaciones de plantas cultivadas en macetas en invernáculo como en el experimento de campo. Esta variedad integró el grupo de menor sensibilidad al considerar el efecto del herbicida sobre la producción de biomasa, sin embargo, al evaluar la inhibición de imazapir-imazamox sobre el crecimiento plumular (en cámara de crecimiento) no se mostró entre los materiales menos tolerantes. Los resultados de los experimentos realizados en cámaras de crecimiento no fueron consistentes con aquellos hallados en maceta en invernáculo y a campo como se discutirá luego (Tabla 14a).

La variedad que se detectó como más sensible a imazapir-imazamox fue Carlota I. La producción de biomasa aérea relativa de esa variedad, cultivada en condiciones de campo bajo acción del herbicida, fue significativamente inferior al resto de los materiales evaluados (Tabla 14a). Asimismo, el crecimiento plumular y la biomasa aérea relativa de Carlota I., cultivada en macetas en invernáculo, mostró la mayor sensibilidad a imazapir-imazamox al contrastar con el resto de las variedades. Como se indicó antes, estos resultados no se corresponden con lo hallado en condiciones de

germinación a diferentes dosis de imazapir-imazamox, donde Carlota I. se ubicó entre las variedades menos sensibles al herbicida (Tabla 14a).

Tabla 14. Ranking de sensibilidad a herbicidas de diferentes variedades de avena evaluadas en los distintos experimentos de cámara de crecimiento, macetas en invernáculo y campo. Las variedades se ordenan de menor a mayor sensibilidad, donde letras distintas de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

a.

imazapir-imazamox															
Cámara de crecimiento				Macetas en invernáculo				Campo							
Germinación		Crecimiento		Emergencia		Crecimiento	Peso seco relativo	Peso seco relativo							
Horas	%	I_{50}		dds	21 dds	I_{50}	21 dds	110 dds							
B.I. Yapa	a	B.I. Sureña	a	Marita I.	a	B.I. Maná	b	Bw 130	a	B.I. Calén	a	B.I. Calén	a	B.I. Yapa	abc
B.I. Calén	a	Juana I.	a	Carlota I.	b	Bw 130	b	Juana I.	a	B.I. Sureña	b	B.I. Aikén	ab	B.I. Aikén	ab
B.I. Maná	a	B.I. Calén	a	B.I. Yapa	c	Carlota I.	b	B.I. Calén	a	B.I. Aikén	c	B.I. Sureña	ab	B.I. Calén	ac
Bw 130	a	B.I. Yapa	a	Bw 130	cd	Juana I.	b	B.I. Sureña	a	B.I. Yapa	cd	B.I. Yapa	ab	Bw 130	bc
B.I. Sureña	a	B.I. Aikén	a	B.I. Maná	e	Marita I.	ab	Carlota I.	a	B.I. Maná	de	B.I. Maná	b	Juana I.	e
Juana I.	a	Carlota I.	a	B.I. Calén	f	B.I. Sureña	ab	B.I. Aikén	ab	Bw 130	f	Juana I.	b	B.I. Maná	e
B.I. Aikén	a	Bw 130	a	Juana I.	g	B.I. Yapa	ab	Marita I.	ab	Juana I.	fg	Bw 130	b	B.I. Sureña	ef
Carlota I.	a	Marita I.	ab	B.I. Sureña	g	B.I. Aikén	ab	B.I. Maná	ab	Marita I.	h	Marita I.	b	Marita I.	ef
Marita I.	a	B.I. Maná	b	B.I. Aikén	gh	B.I. Calén	a	B.I. Yapa	b	Carlota I.	i	Carlota I.	b	Carlota I.	g

b.

diclosulam															
Cámara de crecimiento				Macetas en invernáculo				Campo							
Germinación		Crecimiento		Emergencia		Altura relativa	Peso seco relativo	Peso seco relativo							
Horas	%	I_{50}		dds	21 dds	21 dds	21 dds	110 dds							
B.I. Yapa	b	B.I. Sureña	a	B.I. Maná	a	Carlota I.	a	Bw 130	a	Juana I.	a	B.I. Calén	a	B.I. Calén	a
B.I. Maná	b	Juana I.	a	B.I. Sureña	b	Marita I.	a	B.I. Aikén	a	Bw 130	a	Bw 130	ab	B.I. Yapa	ab
B.I. Sureña	b	B.I. Yapa	a	Carlota I.	c	B.I. Yapa	a	Marita I.	a	B.I. Aikén	a	B.I. Yapa	ab	B.I. Aikén	c
B.I. Calén	b	B.I. Calén	ab	Juana I.	d	B.I. Maná	a	Carlota I.	a	Marita I.	a	Marita I.	b	Bw 130	c
Bw 130	ab	B.I. Aikén	ab	B.I. Calén	e	Juana I.	a	Juana I.	a	B.I. Yapa	a	B.I. Aikén	b	Carlota I.	c
B.I. Aikén	ab	Bw 130	ab	Marita I.	e	B.I. Calén	a	B.I. Maná	a	B.I. Sureña	a	Carlota I.	b	Marita I.	d
Juana I.	ab	Carlota I.	ab	B.I. Yapa	f	Bw 130	a	B.I. Calén	a	Carlota I.	a	B.I. Maná	b	B.I. Sureña	e
Carlota I.	ab	B.I. Maná	bc	Bw 130	g	B.I. Aikén	a	B.I. Sureña	ab	B.I. Maná	a	Juana I.	b	B.I. Maná	f
Marita I.	a	Marita I.	c	B.I. Aikén	g	B.I. Sureña	a	B.I. Yapa	b	B.I. Calén	a	B.I. Sureña	b	Juana I.	fg

c.

sulfometuron-clorimuron															
Cámara de crecimiento				Macetas en invernáculo				Campo							
Germinación		Crecimiento		Emergencia		Crecimiento	Peso seco relativo	Peso seco relativo							
Horas	%	I_{50}		dds	21 dds	I_{50}	21 dds	110 dds							
B.I. Sureña	c	Juana I.	a	B.I. Maná	a	B.I. Aikén	a	B.I. Calén	a	B.I. Calén	a				
B.I. Aikén	c	B.I. Sureña	a	B.I. Aikén	b	B.I. Maná	a	B.I. Sureña	a	Juana I.	b	Marita I.	a	Marita I.	b
B.I. Yapa	c	B.I. Aikén	ab	B.I. Sureña	c	Juana I.	a	Juana I.	a	B.I. Yapa	c	B.I. Aikén	ab	B.I. Aikén	b
B.I. Calén	c	B.I. Calén	bc	B.I. Yapa	c	Marita I.	a	Carlota I.	a	B.I. Sureña	c	Juana I.	ab	Bw 130	b
Juana I.	bc	Bw 130	bc	B.I. Calén	d	Carlota I.	a	Bw 130	a	Marita I.	d	B.I. Yapa	ab	B.I. Maná	b
Bw 130	bc	Carlota I.	bcd	Juana I.	e	B.I. Sureña	a	B.I. Calén	a	Carlota I.	de	B.I. Sureña	ab	B.I. Yapa	c
B.I. Maná	ab	B.I. Yapa	bcd	Marita I.	f	B.I. Yapa	a	B.I. Aikén	a	B.I. Calén	e	Carlota I.	ab	B.I. Sureña	d
Marita I.	ab	B.I. Maná	cd	Bw 130	g	Bw 130	a	Marita I.	a	B.I. Maná	f	B.I. Maná	ab	Juana I.	e
Carlota I.	a	Marita I.	d	Carlota I.	h	B.I. Calén	a	B.I. Yapa	a	Bw 130	g	Bw 130	b	Carlota I.	f

Si bien existen antecedentes en los que se compara la sensibilidad de avena y trigo frente a imidazolinonas (Alister y Kogan, 2005; Istilart, 2005; Scursoni *et al.*, 2017), no se han hallado resultados de experiencias que contrasten la sensibilidad intra-específica del cultivo de avena. Tanto Alister y Kogan (2005) como Scursoni *et al.*, (2017) destacan la menor tolerancia de avena a imidazolinonas respecto a cebada, no obstante Istilart (2005) ha detectado una relación inversa, donde el cultivo de avena se mostraría más sensible respecto a cebada. En tal sentido, las variaciones en la sensibilidad de los materiales de avena evaluados en cada experiencia e incluso, la variabilidad intra-específica que podría presentar la cebada podrían explicar las diferencias de comportamiento relativo de cada cultivo frente a imidazolinonas.

En el caso de diclosulam, si se analizan todos los experimentos y las variables evaluadas, B.I. Calén junto a B.I. Yapa fueron las variedades que mostraron la menor sensibilidad a este herbicida. Esto se detectó tanto para el experimento de campo como para los bioensayos de plantas cultivadas en macetas en invernáculo. Estas variedades estuvieron en el grupo de menor sensibilidad al considerar el efecto del herbicida sobre la producción de biomasa. No obstante, al evaluar la inhibición de diclosulam sobre el crecimiento plumular en los experimentos de germinación, B.I. Calén y B.I. Yapa, no se ubicaron entre los materiales menos tolerantes. Los resultados de estos experimentos fueron inconsistentes con los de maceta en invernáculo y campo (Tabla 14b).

Los cultivares que mostraron mayor sensibilidad a diclosulam fueron Juana I. y B.I. Maná, donde la biomasa aérea relativa producida por ambos cultivares expuestos al herbicida bajo condiciones de campo fue significativamente inferior al resto de cultivares evaluados (Tabla 14b). Además, la biomasa aérea relativa de Juana I. y B.I. Maná cultivadas en macetas en invernáculo mostraron la mayor sensibilidad a diclosulam al contrastar con la variedad menos sensible (B.I. Calén). Estos resultados no se corresponden con los de los experimentos de germinación a diferentes dosis de diclosulam, donde B.I. Maná se ubicó como la variedad menos sensible al herbicida (Tabla 14b).

Existen evidencias de estudios donde se ha evaluado la tolerancia de avena a triazolpirimidinas pero no se reportan resultados contundentes de fitotoxicidad causada al cultivo. Elouize, (2018) encontró variación intra-específica entre cultivares del índice de tolerancia y la biomasa aérea debido a la aplicación de penoxsulam en post-

emergencia sobre el cultivo de avena. El mismo herbicida fue evaluado por Hartwig *et al.*, (2008) en dos cultivares de avena pero no detectó efectos sobre el rendimiento de materia seca en ambos genotipos.

Por otra parte, Dalazen *et al.*, (2015) manifiestan que el herbicida diclosulam es selectivo para el cultivo de avena, aunque provoca efectos visuales de fitotoxicidad que no se reflejan en la producción de biomasa aérea seca. Por otro lado, Rolim *et al.*, (2000) afirman que diclosulam aplicado en pre-emergencia de soja sobre suelos arenosos no causa fitotoxicidad en la rotación de avena a la dosis comercial del herbicida pero si se duplica la dosis recomendada provoca efectos del 25% de fitotoxicidad a los 30 días de sembrar el cereal. Los mismos autores indican que en el caso de suelos con textura arcillo-arenosa, diclosulam no provoca daños sobre la avena.

La variabilidad intra-específica documentada y la escasa fitotoxicidad que muestran los estudios previos sobre avena por parte de las triazolopirimidinas respaldan los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis, donde diclosulam resulta ser el herbicida menos agresivo para avena comparado a imazapir-imazamox y sulfometuron-clorimuron; cultivo que además cuenta con triazolopirimidinas como florasulam registrados para su uso comercial en Estados Unidos (Senseman, 2007; Shaner, 2014).

Si se contemplan todos los experimentos y las variables evaluadas usando el herbicida sulfometuron-clorimuron, se encuentra que B.I. Calén y B.I. Aikén fueron las variedades que exhibieron la menor sensibilidad a sulfometuron-clorimuron, no sólo en las evaluaciones del experimento de campo sino en el de plantas cultivadas en macetas en invernáculo. B.I. Calén encabezó el grupo de menor sensibilidad al considerar el efecto del herbicida sobre la producción de biomasa y B.I. Aikén se destacó entre las variedades de menor inhibición del crecimiento. No obstante, al evaluar la inhibición de sulfometuron-clorimuron sobre el crecimiento plumular en los experimentos de germinación desarrollados en cámara de crecimiento, solo B.I. Aikén se ubicó entre los materiales más tolerantes a este herbicida (Tabla 14c).

Entre tanto, las variedades reconocidas como más sensibles a sulfometuron-clorimuron fueron Bw 130 y Carlota I. La producción de biomasa aérea relativa de Carlota I. tratada con el herbicida y sembrada en condiciones de campo fue significativamente inferior al resto de los materiales evaluados (Tabla 14c). Para Bw

130, el menor crecimiento plumular y la reducida biomasa aérea relativa en el experimento de macetas en invernáculo puso en evidencia la mayor sensibilidad a sulfometuron-clorimuron al contrastar con las variedades menos sensibles. Estos resultados se corresponden con los de inhibición del crecimiento en condiciones de germinación a diferentes dosis de sulfometuron-clorimuron, donde Carlota I. y Bw 130 se ubicaron como las variedades más sensibles al herbicida (Tabla 14c).

Se tiene conocimiento que los cereales de invierno como avena resultan susceptibles a la acción residual de las sulfonilureas (Senseman, 2007; Bedmar y Gianelli, 2014; Wehrhahne y Storm, 2018); incluso el cultivo de avena es comúnmente usado como material susceptible a sulfometuron para evaluar mediante el vigor vegetativo los riesgos de deriva y fitotoxicidad sobre las plantas no objetivo según reportes de Olszyk *et al.*, (2008) y Bidelspach *et al.*, (2009). Sin embargo, no se han documentado resultados de experiencias que constaten la sensibilidad intra-específica de avena a la mezcla de sulfometuron-clorimuron.

Varios autores (Queiroz *et al.*, 2017; Elouize 2018; Hartwig *et al.*, 2008), destacan la variabilidad intra-específica del rendimiento de grano en cultivares de avena debido a la acción de iodosulfuron y metsulfuron, además de su menor tolerancia en comparación con el trigo. Dalazen *et al.*, (2015) mencionan que clorimuron es selectivo para el cultivo de avena, a pesar de provocar efectos fitotóxicos que no repercuten en la producción de materia seca; esto sumado a la evidencia de registros internacionales donde sulfonilureas como clorsulfuron, prosulfuron y tifensulfuron están autorizadas para emplearse en avena (Zandstra *et al.*, 2004) demuestran la variabilidad de sensibilidad que tienen los herbicidas de este grupo en el cultivo.

Mediante un estudio bajo condiciones controladas, Vidal *et al.*, (2017), determinaron que la temperatura afecta la selectividad de los herbicidas posteriores a la emergencia de manera compleja; varias dosis de iodosulfurón-metilo fueron aplicadas sobre el cultivo de avena a diferentes temperaturas y se determinó que la tolerancia del cultivo al herbicida aumentó proporcionalmente a la temperatura, lo que sugiere que la destoxificación del producto mejora la selectividad del cultivo. También se ha demostrado que existe una mayor influencia en el rendimiento de grano de avena en primavera debido a las condiciones climáticas que por efecto de la aplicación de herbicidas (Atanasova *et al.*, 2009).

CAPÍTULO IV

4. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO MÁS SENSIBLES A HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA ALS/AHAS EN AVENA

EXPERIMENTOS DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE VARIEDADES DE AVENA TRATADAS CON HERBICIDAS Y CULTIVADAS EN MACETAS A LA INTEMPERIE

4.1. *Imazapir-imazamox*

En base a los estudios realizados sobre las dosis de este herbicida, se pudo determinar que la medición de SPAD a los 35 dds (días después de la siembra) sería la variable más sensible para detectar los efectos de imazapir-imazamox sobre avena (Tabla 15).

No se encontraron diferencias estadísticas de la sensibilidad entre dosis de las variables *energía de emergencia* y *emergencia*. Para *altura relativa*, se observó mayor sensibilidad y valores estadísticamente similares entre las dosis 1x y 1/10x a los 12 dds y 15 dds. A los 20 dds, la diferencia de sensibilidad entre 1x y las demás dosis fue diferente estadísticamente (Tabla 15).

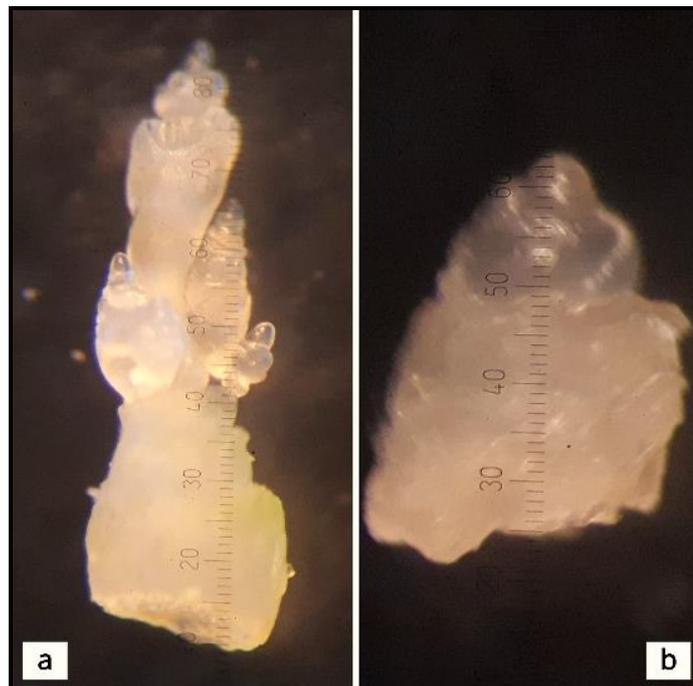


Figura 30. Evaluaciones de *actividad del ápice*. Efecto de retraso en el desarrollo del meristema apical de las variedades de avena expuestas a imazapir-imazamox: a) testigo; b) tratamiento 1x.

Al considerar la *actividad del ápice*, las diferencias de sensibilidad entre 1x y sus dosis decrecientes fueron estadísticamente distintas (Figura 30), entre las dosis <1x y el testigo no existió un rango amplio que permita reflejar el impacto del herbicida

sobre esa variable (Tabla 15). Con respecto a la producción de *macollos*, los efectos provocados entre 1x y el resto de dosis fue estadísticamente similar, a excepción de 1/10x a los 35 dds (Tabla 15). En la medición de SPAD, la diferencia de sensibilidad entre 1x con el resto de las dosis fue diferente estadísticamente, así como de 1/5x con las demás dosis (Tabla 15). Al considerar el *peso seco relativo* de la biomasa aérea, se encontró efecto del herbicida a la dosis de 1x, por lo tanto, fue diferente estadísticamente de las dosis inferiores (Tabla 15).

Tabla 15. Valores promedio por dosis de las variables de los experimentos de crecimiento y desarrollo de variedades de avena tratadas con imazapir-imazamox y cultivadas en macetas a la intemperie. Valores de una misma columna con distinta letra son estadísticamente diferentes, según la prueba de Tukey HSD al 5% de probabilidad.

F. Variación	Variables											
	Emergencia		Altura relativa			Act. del ápice		Macollos		SPAD	Peso relativo	
Dosis	días	15 dds	12 dds	15 dds	20 dds	25 dds	35 dds	25 dds	35 dds	35 dds	25 dds	55 dds
1x	3,0 a	84 a	42 b	46 b	28 b	5 b	2 c	1,1 ab	1,1 b	35 a	40 b	-
1/5x	2,6 a	82 a	72 ab	76 a	69 a	11 a	12 ab	1,3 A	1,2 ab	31 b	86 a	109 a
1/10x	2,6 a	76 a	66 ab	70 ab	70 a	11 a	12 b	1,3 A	1,3 a	26 c	108 a	131 a
1/20x	2,7 a	85 a	93 a	94 a	89 a	11 a	13 ab	1,1 B	1,2 b	23 c	112 a	124 a
1/40x	2,7 a	81 a	90 a	92 a	84 a	11 a	13 ab	1,2 ab	1,1 b	23 c	113 a	113 a
Testigo	3,0 a	82 a	-	-	-	11 a	13 a	1,1 B	1,1 b	25 c	-	-

4.2. Diclosulam

Conforme a los resultados obtenidos sobre las dosis de este herbicida, se puede establecer que el *peso seco relativo* de la biomasa aérea a los 25 dds y 55 dds, la *altura de planta* a 20 dds y el valor de SPAD resultaron las variables más sensibles a diclosulam (Tabla 16; Figura 31). La dosis de 1/5x fue suficiente para inhibir significativamente la producción de biomasa desde los 25 dds en adelante en correspondencia con una reducción en la altura de plantas. Consistentemente a lo hallado con imazapir-imazamox, los efectos de diclosulam en dosis de 1/5x se asociaron a un incremento en los valores de SPAD (Tabla 16).

Diclosulam, a las dosis estudiadas, no afectó la *emergencia del cultivo*. En tanto, la *actividad del ápice* y la producción de *macollos* fueron afectadas significativamente cuando la dosis de herbicida fue de al menos 1x (Tabla 16; Figura 31).

Tabla 16. Valores promedio por dosis de las variables de los experimentos de crecimiento y desarrollo de variedades de avena tratadas con diclosulam y cultivadas en macetas a la intemperie. Valores de una misma columna con distinta letra son estadísticamente diferentes, según la prueba de Tukey HSD al 5% de probabilidad.

Variación	Variables											
	Emergencia		Altura relativa			Act. del ápice		Macollos		SPAD	Peso relativo	
Dosis	días	15 dds	12 dds	15 dds	20 dds	25 dds	35 dds	25 dds	35 dds	35 dds	25 dds	55 dds
1x	3,2 a	95 a	39 b	46 b	27 c	9 b	9 c	1,5 A	1,8 a	37 a	68 b	67 c
1/5x	3,0 a	93 a	83 a	85 a	70 b	10 ab	13 b	1,3 Ab	1,3 b	29 b	78 b	87 c
1/10x	2,8 a	93 a	92 a	93 a	90 a	11 a	13 ab	1,2 B	1,3 b	23 c	91 ab	99 bc
1/20x	3,1 a	89 a	103 a	102 a	95 a	10 ab	13 ab	1,3 ab	1,2 b	24 c	114 a	195 a
1/40x	3,1 a	94 a	98 a	98 a	97 a	10 ab	14 a	1,2 B	1,2 b	23 c	116 a	154 ab
Testigo	3,2 a	94 a	-	-	-	10 ab	14 ab	1,3 B	1,2 b	24 c	-	-



Figura 31. Tratamiento de diclosulam en dosis de 1x: efecto sobre el incremento de *clorofila*, número de *macollos* y disminución del *crecimiento* en avena: a) tratamiento 1x; b) testigo.

4.3. *Sulfometuron-clorimuron*

Mediante el análisis de la mínima dosis de herbicida que mostró un efecto significativo sobre las variables estudiadas, se estableció que la *altura relativa* desde los 12 dds en adelante (Figura 32) y la producción de *macollos* fueron las variables más sensibles a sulfometuron-clorimuron (Tabla 17). En ambos casos, una dosis de 1/10x fue suficiente para impactar significativamente en esas variables (Tabla 17).

Con respecto a este herbicida se encontraron diferencias estadísticas de la sensibilidad entre dosis para la variable *emergencia* pero no se observó una clara relación entre las dosificaciones y la emergencia de plántulas. En ese sentido, apenas se registró una variación de 9% entre el valor promedio mínimo y máximo de diferentes dosis (Tabla 17). A diferencia de los herbicidas tratados previamente, en la medición de SPAD, sulfometuron-clorimuron afectó esta variable respecto al testigo sólo a dosis de 1x. El efecto de 1/10x de sulfometuron-clorimuron sobre la *altura de plantas* no se reflejó en una alteración significativa del *peso seco relativo* de la planta. Sólo las dosis de 1/5x ó mayores afectaron la producción de biomasa aérea relativa a 25 dds pero, posteriormente (a 55 dds), el cultivo mostró una recuperación sin impactar en tal variable a no ser que la dosis fuera de 1x (Tabla 17).

Tabla 17. Valores promedio por dosis de las variables de los experimentos de crecimiento y desarrollo de variedades de avena tratadas con sulfometuron-clorimuron y cultivadas en macetas a la intemperie. Valores de una misma columna con distinta letra son estadísticamente diferentes, según la prueba de Tukey HSD al 5% de probabilidad.

F.		Variables										
Variación	Emergencia		Altura relativa			Act. del ápice		Macollos		SPAD	Peso relativo	
Dosis	días	15 dds	12 dds	15 dds	20 dds	25 dds	35 dds	25 dds	35 dds	35 dds	25 dds	55 dds
1x	2,6 b	94 a	36 d	44 d	35 d	8 c	11 b	1,4 a	1,6 a	33 a	67 c	66 b
1/5x	2,9 ab	87 b	63 bc	68 bc	66 bc	9 bc	12 a	1,3 ab	1,2 bc	21 b	93 bc	105 ab
1/10x	2,6 b	92 ab	46 cd	53 cd	57 cd	10 ab	13 a	1,3 b	1,2 b	23 b	109 ab	109 ab
1/20x	3,0 a	90 ab	84 ab	86 ab	89 ab	10 ab	13 a	1,0 c	1,1 cd	23 b	110 ab	118 a
1/40x	2,7 b	85 b	87 a	89 a	97 a	10 a	13 a	1,0 c	1,0 d	22 b	141 a	123 a
Testigo	2,9 ab	90 ab	-	-	-	10 ab	13 a	1,1 c	1,0 d	20 b	-	-

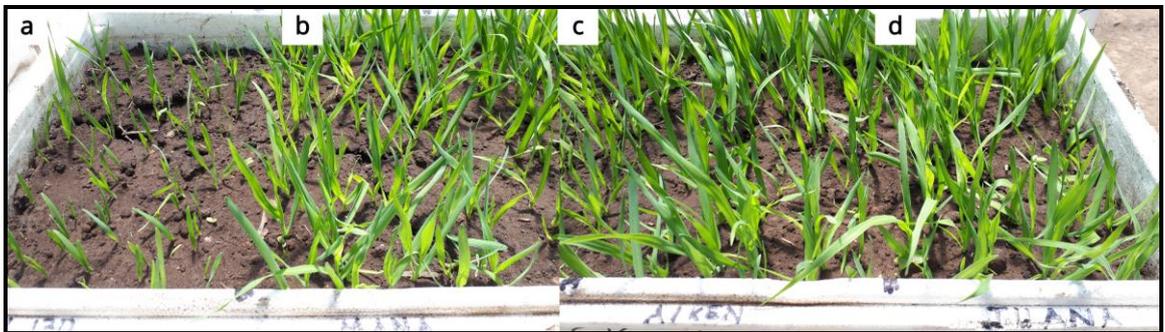


Figura 32. Sulfometuron-clorimuron en dosis de 1x: efecto sobre el crecimiento plumular y en la diferenciación de la sensibilidad al herbicida de las variedades de avena cultivadas en macetas a la intemperie: a) Bw 130; b) B.I. Maná; c) B.I. Aikén; d) Juana I.

4.4. Discusión

Respondiendo al segundo objetivo específico y analizando en un contexto más amplio el nivel de efecto que causan los herbicidas sobre las variables evaluadas para las distintas variedades de avena en los cuatro experimentos planteados de este estudio (cámara de crecimiento, macetas en invernáculo, macetas a la intemperie y a campo) se advierte que:

- Para imazapir-imazamox, entre variedades, la inhibición de altura en cámara de crecimiento, en macetas en invernáculo, y en macetas a la intemperie, así como la biomasa aérea relativa en macetas en invernáculo y a campo (Tabla 18, Anexos); junto a la medición de SPAD en macetas a la intemperie por el efecto de dosis (Tabla 15), resultaron ser las variables más sensibles. Esto fue evidenciado por la diferencia estadística entre dosis y la magnitud del efecto.
- En el caso de diclosulam, entre variedades, la inhibición de altura en cámara de crecimiento y la biomasa aérea relativa en campo (Tabla 19, Anexos); sumado a la altura relativa, la medición de SPAD y la biomasa aérea relativa entre dosis en macetas en invernáculo (Tabla 16), se presentan como las variables más sensibles.
- En cuanto a sulfometuron-clorimuron, entre variedades, la inhibición de altura en cámara de crecimiento y macetas en invernáculo, así como la biomasa aérea relativa en macetas en invernáculo, en macetas a la intemperie y a campo (Tabla 20, Anexos); junto a la producción de macollos y altura relativa entre dosis en macetas a la intemperie (Tabla 17), fueron las variables más sensibles.

En términos generales, y debido a los efectos directos que causan los herbicidas sobre la arquitectura de las plantas de avena, se puede destacar que la inhibición de altura y de la biomasa aérea son las variables con mayor sensibilidad a los herbicidas usados para este estudio. Esto podría suceder debido a la interrupción en el crecimiento celular de las plantas que generan los herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS sobre las plantas sensibles (Senseman, 2007; Shaner, 2014). Se ha demostrado que tales herbicidas bloquean el ciclo celular en los tejidos en activa división, aparentemente, asociado a la disminución del pool de aminoácidos de cadena corta ramificada (Cob y Reade, 2010).

Por otro lado, se ha advertido un incremento de los valores de SPAD como respuesta a ciertas dosis, incluso a las máximas evaluadas de los herbicidas estudiados. El aumento de la concentración de clorofila en plántulas de maíz ha sido detectado en respuesta a residuos de imazapic en suelo, posiblemente en respuesta a una menor producción de biomasa aérea y consecuente concentración de pigmentos (Cobb y Reade, 2010; Su *et al.*, 2017).

Es conocido que los efectos y tolerancia de los herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS difieren entre distintos principios activos y especies. En estudios de tolerancia de avena a diferentes dosis de herbicidas post-emergentes conducidos por MacRae *et al.*, (2007), se determinó que tribenuron (en mezcla con MCPA) produjo daños menores al 4% sin observar mermas en el rendimiento de grano, en tanto que la aplicación de mesosulfuron llegó a ocasionar pérdidas del 65% a 86% sobre el stand de plantas, *ergo*, una reducción del 70% del rendimiento.

Los efectos fitotóxicos reflejados sobre las variables descritas suelen impactar inhibiendo ó estimulando la respuesta. Dhammu *et al.*, (2018) durante varios años evaluaron la tolerancia de variedades de avena a trifluralina y otros herbicidas pre-emergentes, observando un efecto negativo sobre el stand de plantas, empero, tal efecto resultaba compensado con un mayor número de macollos y biomasa efectiva, lo que conducía a morigerar las pérdidas estadísticamente significativas en el rendimiento de grano. Los resultados del presente capítulo muestran cómo las diferentes variables (biomasa aérea, altura, número de macollos, SPAD) son afectadas por los distintos herbicidas.

La altura se ha determinado como una de las variables sensible a diclosulam y tal inhibición se correspondió con la reducción en la producción de biomasa aérea (Tabla 16). Sin embargo para el caso de sulfometuron-clorimuron, el impacto del herbicida sobre la altura no se asoció con la inhibición en la producción de biomasa, posiblemente compensado por el incremento en el número de macollos (Tabla 17).

En respuesta al tercer objetivo específico, la dosis mínima de imazapir-imazamox que provocó una respuesta de crecimiento/desarrollo de la planta de avena al herbicida fue de 1/5x (400 ml p.c. ha⁻¹) reflejado sobre la variable SPAD. Para diclosulam, la dosis mínima que pone en evidencia la acción herbicida sobre el cereal

rondó entre 1/5x (6 g p.c. ha⁻¹) y 1/10x (3 g p.c. ha⁻¹) y se apreció sobre el peso relativo de biomasa aérea, la altura relativa y el valor de SPAD. En tanto, para sulfometuron-clorimuron, la dosis mínima que muestra el accionar herbicida sobre el cultivo fue de 1/10x (10 g p.c. ha⁻¹) y se verificó a través de la altura relativa y la producción de macollos.

La compensación entre diferentes variables de crecimiento podrían ocultar los efectos de los herbicidas como se indicó antes. Por lo tanto, si se toma en cuenta el experimento de campo, la dosis mínima en el suelo para causar fitotoxicidad y por ende la inhibición del 50% de la biomasa aérea en avena está comprendida entre 1/4x y 1/2x para imazapir-imazamox (552,4 ml p.c. ha⁻¹ a 1081,0 ml p.c. ha⁻¹), entre 1/8x y 1/2x (3,5 g p.c. ha⁻¹ a 13,2 g p.c. ha⁻¹) para diclosulam y para sulfometuron-clorimuron entre 1/4x y 1/2x, aproximadamente (20,9 g p.c. ha⁻¹ a 64,4 g p.c. ha⁻¹). Como se expuso en el capítulo previo, estos valores dependen de la variedad y de otros factores, como condiciones climáticas, tipo de suelo y los estímulos por hormesis que puedan tener los cultivares.

Cabe mencionar que en este trabajo, tal como lo muestran otros estudios, se observaron efectos de hormesis (estímulo de la respuesta de crecimiento) a dosis bajas de herbicida (Abbas *et al.*, 2016; Velini *et al.*, 2010). En las pruebas de germinación en cámara de crecimiento, los efectos de hormesis se apreciaron sobre la mayoría de variedades de avena en los tres herbicidas a dosis $\leq 1 \mu\text{M}$, esta es 100 veces menor a la recomendada, llegando en algunos casos incluso a superar más del 100% la longitud de la hoja del testigo. Similar evidencia hallaron Cedergreen *et al.*, (2005) evaluando cebada a dosis $\leq 1 \mu\text{g/l}$ de metsulfuron.

Para la prueba de crecimiento de macetas en invernáculo se encontraron efectos de hormesis sólo en algunas variedades, principalmente para las dosis del herbicida sulfometuron-clorimuron $\leq 1/10x$. Mientras que en el experimento de campo, se observó hormesis para imazapir-imazamox y sulfometuron-clorimuron sobre algunas variedades expuestas a la dosis de 1/8x; esto demuestra que no solo hay variación entre variedades respecto a la sensibilidad, sino también con respecto a hormesis.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES

El uso de herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS en combinación con glifosato y herbicidas hormonales para el manejo de *Conyza spp.*, a fines de invierno e inicios de la primavera (Bedmar y Gianelli, 2014; Puricelli y Tuesca, 2005), han presentado una acción residual variable que va desde los 60 días hasta un año, dependiendo de las condiciones edafoclimáticas (Bedmar y Gianelli, 2014). Así, los residuos contenidos en el suelo pueden por "arrastre" o *carryover* podrían afectar al cultivo de invierno siguiente en la rotación, siendo uno de los más sensibles la avena (Scursoni *et al.*, 2017). El problema se agrava en regiones como el sur de la provincia de Buenos Aires donde las lluvias y temperaturas son menores a las del resto de la región pampeana (Borda, 2003; Ballari *et al.*, 2009), por lo tanto, son más comunes los problemas de fitotoxicidad.

En este estudio se utilizaron cultivares provenientes de los principales programas de fitomejoramiento de avena de Argentina (CEI Barrow y EEA Bordenave), por lo que se asume la inclusión de un amplio espectro de la variabilidad genética del país. Debido a esto se pudo determinar que las variedades de avena evaluadas difieren en cuanto a la sensibilidad a herbicidas residuales inhibidores de la ALS/AHAS. Así se acepta la hipótesis planteada en este trabajo de tesis: Las variedades de avena difieren en cuanto a la sensibilidad a herbicidas residuales inhibidores de la ALS/AHAS.

Por consiguiente se recomienda tener precaución en el uso de determinada variedad de avena luego de una rotación con herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS; para esto se debería evitar el uso de variedades sensibles como Carlota I. y Marita I. en suelos tratados con imazapir-imazamox. Por el contrario, variedades con mayor tolerancia al herbicida como B.I. Calén y B.I. Aikén permitirían reducir los riesgos de daño por *carryover* de tales herbicidas dentro de ciertos rangos.

También es importante evitar el uso de variedades como Juana I. y B.I. Maná que resultan sensibles a diclosulam en casos donde se utilizó este herbicida antes de la siembra de avena y recomendar la siembra del cultivar B.I. Calén. Asimismo, en suelos donde se empleó sulfometuron-clorimuron, se debe prescindir del uso de variedades sensibles como Bw 130 y Carlota I. y sembrar variedades tolerantes como B.I. Calén y B.I. Aikén que reducirían los riesgos de daño fitotóxico dentro de determinados rangos de herbicidas en suelo.

Las dosis mínimas de imazapir-imazamox que provocaron fitotoxicidad sobre cultivos de avena oscilaron entre 400 ml p.c. ha⁻¹ a 1000 ml p.c. ha⁻¹; en el caso de diclosulam los valores mínimos causales de fitotoxicidad estuvieron comprendidos entre 3 g p.c. ha⁻¹ a 13 g p.c. ha⁻¹ y para sulfometuron-clorimuron el rango de fitotoxicidad mínima se establece entre 10 g p.c. ha⁻¹ a 65 g p.c. ha⁻¹. Sin duda estos valores pueden depender del cultivar, como se demostró en el presente trabajo, y de condiciones edafoclimáticas (Bedmar y Gianelli, 2014).

La inhibición de altura y de la biomasa aérea son las variables con mayor sensibilidad a los herbicidas usados para este estudio, debido principalmente a los efectos directos que causan estos herbicidas sobre la división celular (Cobb y Reade, 2010). Por otro lado, la medición indirecta del contenido relativo de clorofila mediante los valores SPAD, como la respuesta de estímulo a la concentración de pigmentos por inhibición del crecimiento (Su *et al.*, 2017) resulta ser muy eficiente en la determinación de fitotoxicidad de avena por imidazolinonas y triazolopirimidinas siempre que se controlen los efectos de ciertos nutrientes (nitrógeno) sobre ese parámetro.

En cumplimiento de los objetivos planteados, como resultado del presente trabajo, se evaluó comparativamente la sensibilidad de cultivos de avena a diferentes herbicidas inhibidores de la ALS/AHAS (diclosulam, sulfometuron-clorimuron e imazapir-imazamox) detectando variabilidad intra-específica en la sensibilidad de materiales comerciales en respuesta a esos herbicidas. Se estableció un *ranking* de variedades donde se destacaron aquellas más y menos tolerantes a cada herbicida inhibidor de la ALS/AHAS y se determinó aquellos parámetros de crecimiento más sensibles a diclosulam, sulfometuron-clorimuron e imazapir-imazamox. En función de esto, para cada caso se estableció la mínima dosis de herbicida capaz de provocar fitotoxicidad evidente en cada caso.

En un programa de manejo de malezas que contemple la combinación de estrategias de control químico con la adecuada rotación de herbicidas, rotación de cultivos, estrategias de manejo cultural que busquen favorecer al cultivo sobre las malezas, la correcta elección del cultivar de avena podría minimizar los riesgos de fitotoxicidad por residualidad de herbicidas. Sin embargo, con altos niveles de residuos de herbicidas en suelo, todos los cultivos mostraron fitotoxicidad.

Además, el hecho que exista variabilidad intra-específica de los materiales de avena a los herbicidas residuales inhibidores de la ALS/AHAS que se estudiaron, da la posibilidad de seleccionar aquellos cultivares más tolerantes, para generar a futuro mediante mejoramiento genético materiales que soporten mejor la acumulación de estos herbicidas en el suelo.

Estos resultados cobran relevancia en el marco de un manejo integrado de malezas y tienden a advertir los efectos de la persistencia de herbicidas sobre cultivos sensibles subsiguientes en la rotación, como avena. Si bien realiza aportes para la elección del adecuado material a sembrar, sin duda pone de manifiesto el riesgo que los herbicidas residuales puede provocar sobre cultivos sensibles bajo ciertas circunstancias que no garanticen su degradación en el suelo.

Debido a la inconsistencias de resultados entre los experimentos en cámara de crecimiento y los realizados en macetas ó en campo, resultaron ser estos últimos mencionados, aquellos estudios que proveen la información más acertada al momento de la elección de un genotipo; los experimentos en macetas profundas y en campo, aportaron las variables más representativas que facilitaron la evaluación de fitotoxicidad sobre los cultivares de avena. Los resultados obtenidos en cámaras de crecimiento, no deben ser aplicados a campo, pues no consideran la interacción de los elementos planta-suelo-herbicida.

BIBLIOGRAFIA

1. **Abbas, T., Nadeem, M., Tanveer Abbas, T., Nadeem, M., Tanveer, A. y Zohaib, A.,** 2016. Low doses of fenoxaprop-p-ethyl cause hormesis in littleseed canarygrass and wild oat. *Planta Daninha*, 34(3), pp. 527-533.
2. **Aichele, T. y Penner, D.,** 2005. Adsorption, Desorption, and Degradation of Imidazolinones in Soil. *Weed Technology*, 19(1), pp. 154-159.
3. **Alister, C. y Kogan, M.,** 2005. Efficacy of imidazolinone herbicides applied to imidazolinone-resistant maize and their carryover effect on rotational crops. *Crop Protection*, 24(4), pp. 375-379.
4. **Andriulo, A. y Cordone, G.,** 1998. Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica de suelos de la región pampeana húmeda. Pp. 65-96. *En: Panigatti, J.L., Marelli, G., Buschiazzi, D. y Gil, R. (ed). Siembra directa. INTA. 333 p.*
5. **Atanasova, D., Marcheva, M. y Savova, T.,** 2009. *Investigation on herbicides' effect on the productivity in spring oat (Avena sativa L.). Zbornik Radova 44. Hrvatski i 4 Medunarodni Simpozij Agronoma, Opatija, Hrvatska, pp. 481-485.*
6. **Ballari, A., Botana, M. y Scarpati, O.,** 2009. Distribución de las sequías e identificación de áreas de riesgo (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *Huellas*, Issue 13, pp. 130-146.
7. **Baumann, P., Dotray, P. y Prostko, E.,** 1998. *Herbicide mode of action and injury symptomology.* The Texas A&M University System. 10 pp ed. Texas Agriculture Extension Service. The Texas A&M University System.
8. **Bedmar, F. y Gianelli, V.,** 2014. Comportamiento de los herbicidas en el suelo. *En: O. Fernández, E. Leguizamón y H. Acciaresi, edits. Malezas e invasoras de la Argentina.* Bahía Blanca: Ediuns, pp 361-389.
9. **Bidelspach, C., Olszyk, D. y Pflieger, T.,** 2009. Can artificial soil be used in the vegetative vigor test for US pesticide registration?. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 4(4), pp. 409-415.
10. **Borda, M.,** 2003. Sequías históricas. *AgroBarrow*, Sep: 20, pp 1-1.

11. **Boxall, A., Sinclair, C., Fenner, K., Kolpin, D. y Maund, S.,** 2004. When Synthetic Chemicals Degrade in the Environment. *Environmental Science & Technology*, 38(19), pp. 368-375.
12. **Brighenti, A., Moraes, V., Oliveira, J., Gazziero, D., Voll, E. y Gomes, J.,** 2002. Persistência e fitotoxicidade do herbicida atrazine aplicado na cultura do milho sobre a cultura do girassol em sucessão. *Planta Daninha*, 20(2), pp. 291-297.
13. **Brown, H.,** 1990. Mode of action, crop selectivity, and soil relations of the sulfonylurea herbicides. *Pesticide Science*, 29(3), pp. 263-281.
14. **Cassino, N., Bedmar, F., Monterubbianesi, G. y Gianelli, V.,** 2017. Efectos residuales de Imazamox sobre cultivos de invierno y de verano en Argentina. *Ciencias Agronómicas*, 17(30), pp. 23-29.
15. **Cedergreen, N., Ritz, C. y Streibig, J.,** 2005. Improved Empirical Models Describing Hormesis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 24(12), pp. 3166-3172.
16. **Cobb, A. y Reade, J.,** 2010. Herbicide Selectivity and Metabolism. En: *Herbicides and Plant Physiology*. 2 ed. Newport, UK: Wiley-Blackwell, 70 p.
17. **Condón, F., Rebuffo, M., Alzugaray, R. y Cuitiño, M.,** 2010. Mejoramiento genético de avena por resistencia al pulgón verde de los cereales (*Schizaphis graminum* Rondani). En: N. Altier, M. Rebuffo y K. Cabrera, edits. *Enfermedades y plagas en pasturas*. Montevideo: Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología de INIA, pp. 97-103.
18. **Corradi, P., del Río, J., Eleicegui, G. y Zorraquin, T.,** 2005. *Agroalimentos Argentinos II*. Buenos Aires: AACREA.
19. **Dalazen, G., Kruse, N. y Machado, S.,** 2015. Herbicides with potential use in the control of hairy fleabane and their selectivity in oats and ryegrass. *Revista Ciência Agronômica*, 46(4), pp. 792-799.
20. **Dhammu, H.,** 2016. *Oats tolerance to grass selective herbicides*. Perth, Western Australia, Twentieth Australasian Weeds Conference.

21. **Dhammu, H., Cox, D., Quartermaine, R. y Troup, G.,** 2018. *Oats tolerance to trifluralin and other herbicides*. Perth, Western Australia, Grains Research Updates.
22. **Diez de Ulzurrun, P.,** 2013. Manejo de malezas problema: Modos de acción de herbicidas. *Red de conocimiento en malezas resistentes*. Rosario, Argentina.
23. **Dipiano, A. y Waiman, E.,** 2017. Evaluación del efecto carryover de Clearsol y Clearsol Plus sobre avena, trigo y cebada. *Semiárida*, 27(1), pp. 45-57.
24. **Dow AgroSciences,** 2018. *Dow AgroSciences*. [En línea] Available at: <http://www.dowagro.com/es-ar/argentina/proteccion-de-cultivos/herbicidas> [Último acceso: 5 Mayo 2018].
25. **Duggleby, R. y Pang, S.,** 2000. Acetohydroxyacid Synthase. *Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 33(1), pp. 1-36.
26. **Elouize, X.,** 2018. *Mecanismo de tolerância a herbicidas inibidores da ALS em cultivares de aveia branca (Avena sativa L.)*. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco. 180 p.
27. **FAOSTAT,** 2017. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. [En línea] Available at: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> [Último acceso: 18 07 2019].
28. **Forján, H. y Manso, L.,** 2016. *Rotaciones y secuencias de cultivos en la región mixta cerealera del centro-sur bonaerense: 30 años de experiencias*. 1 ed. Tres Arroyos, Buenos Aires: Ediciones INTA.
29. **Forján, H. y Manso, L.,** 2017. *Actualización técnica en cultivos de cosecha fina 2016/2017*. Tres Arroyos: INTA.
30. **Forján, H. y Manso, L.,** 2018. ¿Cómo evolucionó la superficie agrícola en el Centro Sur Bonaerense?. *AgroBarrow*, pp. 9-12.
31. **Frioni, L.,** 1999. *Los Procesos microbianos*. Río Cuarto. Córdoba, Argentina: Editorial de la Fundación Universidad Nacional de Río Cuarto.

- 32. Fuentes, R.,** 2005. Dinámica ambiental y agronómica de los herbicidas en el suelo. Universidad Austral de Chile. *In: Curso sustentabilidad, efecto ambiental y agronómico de los herbicidas aplicados al suelo.* Universidad Santiago del Estero, Santiago del Estero 11-16 abril 2005., Argentina. 33 p.
- 33. Gazziero, D., Karan, D., Voll, E. y Ulbrich, A.,** 1997. Persistência dos herbicidas imazaquin e imazethapyr no solo e os efeitos sobre plantas de milho e pepino. *Planta Daninha*, 15(2), pp. 162-168.
- 34. Georgieva, T. y Dimitrova, M.,** 2001. Response of some winter oat (*Avena sativa* L.) varieties and lines to the new herbicide Derby 175 SK. *Journal of Mountain Agriculture on the Balkans*, 4(2), pp. 94-103.
- 35. Giménez, J., Yannicari, M., Istilart, C. y Giménez, D.,** 2012. INTA. [En línea] Available at: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_barrow_-_efecto_fitotxico_de_imidazolinonas_sobr.pdf [Último acceso: 28 02 2018].
- 36. Hartwig, I., Bertan, I., Noldin, J. y Concenço, G.,** 2008. Tolerance of Wheat (*Triticum aestivum*) and Oat (*Avena* spp.) to ALS-Inhibiting Herbicides. *Planta Daninha*, 26(2), pp. 361-368.
- 37. Istilart, C.,** 2005. Imidazolinone residuality on wheat, barley and oats in the south zone of Buenos Aires. Proceedings of the 7 th International Wheat Conference. Mar del Plata. Argentina. Actas: 112.
- 38. Istilart, C.,** 2009. Residualidad de metsulfurón, iodosulfurón + metsulfurón y prosulfuron + triasulfuron, aplicados en presiembra de girasol en la zona sur bonaerense Argentina XII Congreso de la Sociedad Española de Malherbología. XIX Congreso de la Asociación Latinoamericana de Malezas. II Congreso Iberoamericano de Ciencias de las Malezas. Lisboa – Portugal. Volumen II: 641:645.
- 39. Jabusch, T. y Tjeerdema, R.,** 2008. Chemistry and Fate of Triazolopyrimidine Sulfonamide Herbicides. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 193, pp. 31-52.

- 40. Lavorenti, A., Rocha, A., Prata, F., Regitano, J., Tornisielo, V. y Pinto, O.,** 2003. Comportamento do diclosulam em amostras de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto e convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 27(2), pp. 183 - 190.
- 41. Ledda, A., Sauer, M. y Nadal, N.,** 2009. Efecto de cuatro herbicidas residuales sobre el cultivo de algodón (*Gossipium Hirsutum*): primer año de estudio. In: Congresso Brasileiro do Algodão (70, 2009, Foz do Iguaçu). Sustentabilidade da cotonicultura brasileira e expansão dos mercados. Campina Grande, EmbrapaAlgodão. pp. 1796-1801.
- 42. MacRae, A., Culpepper, S. y Grey, T.,** 2007. Oat and Rye Tolerance to Mesosulfuron and Tribenuron. *Weed Technology*, 21(4), pp. 938-940.
- 43. Magdalena, J., Fernández, D., Di Prinzio, A. y Behmer, S.,** 2012. Pasado y presente de la aplicación de agroquímicos en agricultura. En: J. Magdalena, y otros edits. Tecnología de aplicación de agroquímicos. Rosario: INTA Alto Valle, p. 196.
- 44. Maich, R.,** 2012. *Agrovoz*. [En línea] Available at: <http://agrovoz.lavoz.com.ar/granos/avena-versatil-grano-verde-y-silaje>[Último acceso: 26 02 2018].
- 45. Mangels, G., Shaner, D. y O'Connor, S.,** 1991. Behavior of the imidazolinone herbicides in soil—a review of the literature. En: D. Shaner & S. O'Connor, edits. *The imidazolinone herbicides*. Boca Raton, EU: CRC Press, pp. 191-209.
- 46. Metzler, M.,** 2011. Manejo y control de Rama Negra. EEA Marcos Juárez del INTA. Ministerio de Agricultura de la República Argentina. [En línea] Available at: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_rama_negra-_manejo_y_control.pdf[Último acceso: 05 05 2018].
- 47. Metzler, M., Puricelli, E., Papa, J. y Peltzer, H.,** 2013. *Manejo y control de rama negra*. Ediciones INTA. 27 pp.
- 48. Montoya, J.,** 2013. *Manejo de Rama Negra*. Sitio Argentino de Producción Animal, 21, pp. 22-30.

- 49. Montoya, J.**, 2016. *Malezas en el cultivo de girasol: estrategias de manejo y control*, Anguil: INTA, Boletín de Divulgacion Técnica No 114.
- 50. Montoya, J. y Cervellini, J.**, 2017. Diferencias entre Cloris (*Chlorisvirgata*) y Roseta (*Cenchrusincertus*), Anguil: INTA-Conicet.
- 51. Mourtzinis, S., Conley, S. y Gaska, J.**, 2015. Agronomic Management and Fungicide Effects on Oat Yield and Quality. *Crop Science*, 55(3), pp. 1290-1294.
- 52. Nissen, S., Namuth, D. y Hernández-Ríos, I.**, 2004. Introducción a los Inhibidores de la Síntesis de Aminoácidos Aromáticos. Library of Crop Technology Lessons. University of Nebraska, Lincoln. Consultado: 28 de marzo de 2018.
- 53. Olszyk, D., Pflieger, T., Lee, H., Burdick, C., King, G., Plocher, M. y Kern, J.**, 2008. Selecting and evaluating native plants for region-specific phytotoxicity testing. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 4(1), pp. 105-117.
- 54. Ortiz, A., Torres, S., Quintana, Y. y López, A.**, 2015. Primer reporte de resistencia de *Cyperus odoratus* L. al herbicida pirazosulfuron-etilo. *Bioagro*, 27(1), pp. 45-50.
- 55. Papa, J. y Tuesca, D.**, 2014. Los problemas actuales de malezas en la región sojera núcleo argentina: origen y alternativas de manejo. *Para mejorar la producción*, Volumen 52, 151 p.
- 56. Peterson, D., Thompson, C., Regehr, D. y Al-Katib, K.**, 2001. Herbicide mode of action. Kansas, Kansas State University. 24 p.
- 57. Pizzigallo, M., Mininni, R. y Ruggiero, P.**, 2001. Adsorption of triasulfuron on different soils and humic acids. *Fresenius Environmental Bulletin*, 10(2), pp. 221-225.
- 58. Puricelli, E. y Tuesca, D.**, 2005. Riqueza y diversidad de malezas en trigo y barbechos de secuencias de cultivos resistentes a glifosato. *Agriscientia*, 22(2), pp. 69-78.

- 59. Queiroz, A., Vidal, R., Nava, I., Pacheco, M., Federizzi, L. y Xavier, E,** 2017. Selectivity of Iodosulfuron-Methyl to Oat Cultivars. *Planta Daninha*, Volumen 35.
- 60. Rani, D.,** 2015. Persistence and Leaching Behaviour of Premix Formulation of Imazethapyr and Imazamox in Soil. Thesis of Master of Science in Chemistry. CCSHAU, Haryana. 108 p.
- 61. Rian,** 2019. *Red de Información Agropecuaria Nacional, INTA*. [En línea] Available at: <http://rian.inta.gob.ar/agrometeorologia/barrow/datosdiarios/> [Último acceso: 15 Septiembre 2019].
- 62. Rodrigues, B. y Almeida, F.,** 2011. *Guia de herbicidas*. 6 ed. Londrina: Grafmarke.
- 63. Rolim, F., Alvarenga, S., Otubo, S., Morceli, A. y Bazoni, R.,** 2000. Seletividade de sulfentrazone em cultivares de soja e efeitos residuais sobre culturas sucessivas, em solos de cerrado. *Revista Brasileira de Herbicidas*, 1(3), pp. 219-224.
- 64. Sánchez, G. y Sarandón, S.,** 2014. Principios de manejo agroecológico de malezas. En: S. Sarandón & C. Flores, edits. *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables*. La Plata: Edulp, pp. 300-308.
- 65. Scursioni, J., Montoya, J., Vigna, M. y Gigón, R.,** 2017. Impact of Imazamox and Imazapyr Carryover on Wheat, Barley, and Oat. *Weed Technology*, 31(6), pp. 838-846.
- 66. Seefeldt, S., Jensen, J. y Fuerst, E.,** 1995. Log-Logistic analysis of herbicide dose-response relationships. *Weed Technology*, 9(2), pp. 218-227.
- 67. Senseman, S.,** 2007. *Herbicide Handbook*. 9 ed. Lawrence, USA: Weed Science Society of America. 458 p.
- 68. Shaner, D.,** 2014. *Herbicide Handbook*. 10 ed. Champaign, IL, USA: Weed Science Society of America. 315 p.

- 69. Socorro, J.**, 2011. Resistencia de *Sinapis alba* L. A herbicidas inhibidores de la ALS: bases agronómicas bioquímicas y moleculares. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 194pp.
- 70. Su, W., Sun, L., Wu, R., Ma, Y., Wang, H., Xu, H., Yan, Z. y Lu, C.**, 2017. Effect of imazapic residues on photosynthetic traits and chlorophyll fluorescence of maize seedlings. *Photosynthetica*, 55(2), pp. 294-300.
- 71. Sweetser, P., Schow, G. y Hutchison, J.**, 1982. Metabolism of chlorsulfuron by plants: Biological basis for selectivity of a new herbicide for cereals. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 17(1), pp. 18-23.
- 72. Torres, L.**, 2001. El uso de herbicidas y las medidas agro-ambientales. *Revista Agricultura*, pp. 665-667.
- 73. Tu, M., Hurd, C. y Randall, J.**, 2004. Imazapyr. *Weed Control Methods Handbook*. The Nature Conservancy.
- 74. Ustarroz, D., Bedmar, F., Papa, J. y Satorre, E.**, 2016. Herramientas para el control de malezas. En: E. Satorre, B. Kruk y E. de la Fuente, edits. Bases y herramientas para el manejo de malezas. Buenos Aires: EFA Universidad de Buenos Aires, p. 221.
- 75. Ustarroz, D. y Cerutti, D.**, 2015. Dinámica de emergencia de *Conyza bonaerensis* (L.) Cronquist. durante el periodo de barbecho. XXII Congreso de ALAM, I Congreso de la ASACIM. Buenos Aires (Argentina), p. 251.
- 76. Velini, E., Trindale, M., Barberis, L. y Duke, S.**, 2010. Growth Regulation and Other Secondary Effects of Herbicides. *Weed Science*, 58(3), pp.
- 77. Vencill, W.**, 2002. *Herbicide Handbook*. 8 ed. Lawrence, USA: Weed Science Society of America. 493 p.
- 78. Vidal, R., Fipke, M., Queiroz, A., Soares, D. y Gherekhloo, J.**, 2017. An Innovative Method to Evaluate the Impact of Temperature on Iodosulfuron-Methyl Selectivity to Oat Crop. *Planta Daninha*, Volumen 35.
- 79. Wauchope, R., Buttler, T., Hornsby, A., Augustijn-Beckers, P. y Burt, J.**, 1992. The SCS/ARS/CES Pesticide Properties Database for Environmental

Decision-Making. En: G. Ware, ed. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Springer, Nueva York, USA, pp. 1-155.

- 80. Wehrhahne, L.,** 2015. La Chacra Experimental de Barrow y la obtención de nuevos cultivares de avena. *AgroBarrow*, pp. 14-15.
- 81. Wehrhahne, L. y Storm, A.,** 2018. Avenas para reservas forrajeras. *AgroBarrow*, Issue 62, pp. 22-23.
- 82. Yoder, R., Huskin, M., Kennard, L. y Zabik, J.,** 2000. Aerobic metabolism of diclosulam on U.S. and South American soils. *J Agric Food Chem*, 19(4), pp. 4335-4340.
- 83. Zandstra, B., Particka, M. y Masabni, J.,** 2004. *Guide to Tolerance of Crops and Susceptibility of Weeds to Herbicides*, East Lansing, MI: Bulletin E-2833, Michigan State University Extension.

ANEXOS

Tabla 18. Valores promedio de las variables evaluadas a cada variedad de avena, en los experimentos de cámara de crecimiento, macetas en invernáculo, campo y macetas a la intemperie que fueron tratadas con imazapir-imazamox.

Variables																							
F. Variación		Cámara de crecimiento			Macetas en invernáculo				Campo	F. Variación	Macetas a la intemperie												
Variación		Germinación		Altura	Emergencia		Altura	Peso R.		Peso R.	Variación	Emergencia		Altura relativa			Act. del ápice		Macollos		SPAD	Peso R.	
Variedad		Horas	%	<i>I</i> ₅₀	días	21 dds	<i>I</i> ₅₀	21 dds	<i>I</i> ₅₀	Variedad	días	15 dds	12 dds	15 dds	20 dds	25 dds	35 dds	25 dds	35 dds	35 dds	25 dds	55 dds	
B.I. Aikén		13,3 a*	93 a	4,7 gh	3,7 ab	94 ab	297,7 c	92 Ab	1051 ab	Marita I.	2,6 b	81 a	59 b	65 b	52 b	10 b	11 b	1,2 a	1,2 a	26 a	88 ab	130 a	
B.I. Calén		12,5 a	94 a	10,9 f	4,1 a	95 a	453,1 a	111 A	952 ac	Carlota I.	2,7 ab	82 a	61 b	65 b	56 b	9 b	11 b	1,2 a	1,2 a	27 a	70 b	93 a	
B.I. Maná		12,7 a	87 b	25,2 e	3,4 b	92 ab	278,0 de	80 abc	766 e	B.I. Yapa	2,6 b	85 a	78 ab	81 ab	77 ab	12 a	12 a	1,1 a	1,1 a	28 a	105 a	131 a	
B.I. Sureña		12,8 a	95 a	5,0 g	3,6 ab	95 a	339,3 b	88 ab	721 ef	B.I. Calén	3,1 a	79 a	93 a	93 a	87 a	9 b	11 b	1,1 a	1,2 a	27 a	104 a	121 a	
B.I. Yapa		12,4 a	94 a	32,5 c	3,6 ab	86 b	282,3 cd	85 abc	1081 a														
Bw 130		12,8 a	92 a	29,2 cd	3,4 b	98 a	216,3 f	69 bc	895 ad														
Carlota I.		13,3 a	93 a	51,6 b	3,4 b	95 a	113,9 i	53 C	552 g														
Juana I.		13,2 a	95 a	5,6 g	3,4 b	97 a	209,7 fg	74 bc	778 e														
Marita I.		13,4 a	91 ab	206,3 a	3,5 ab	94 ab	164,4 h	64 bc	710 ef														

*Valores con distinta letra son estadísticamente diferentes, según la prueba de Tukey HSD al 5% de probabilidad.

Tabla 19. Valores promedio de las variables evaluadas a cada variedad de avena, en los experimentos de cámara de crecimiento, macetas en invernáculo, campo y macetas a la intemperie que fueron tratadas con diclosulam.

Variables																																									
F. Variación		Cámara de crecimiento			Macetas en invernáculo			Campo	F. Variación	Macetas a la intemperie																															
		Germinación		Altura	Emergencia		Altura R	Peso R.	Peso R.	Emergencia		Altura relativa			Act. del ápice		Macollos		SPAD	Peso R.																					
Variedad	Horas	%	I ₅₀	días	21 dds	21 dds	21 dds	I ₅₀	Variedad	días	15 dds	12 dds	15 dds	20 dds	25 dds	35 dds	25 dds	35 dds	35 dds	25 dds	55 dds																				
B.I. Aikén	12,6	ab*	94	ab	3,7	h	3,9	a	97	a	88	a	92	B	8,9	c	B.I. Aikén	2,9	ab	90	b	68	b	72	b	70	a	10	a	13	a	1,3	b	1,3	a	26	a	89	a	125	a
B.I. Calén	12,4	b	94	ab	14,3	e	3,9	a	94	a	80	a	124	A	13,2	a	B.I. Maná	2,8	b	94	ab	64	b	68	b	75	a	10	a	13	ab	1,3	ab	1,4	a	28	a	96	a	94	a
B.I. Maná	12,3	b	90	bc	40,6	a	3,7	a	94	a	84	a	88	B	3,9	f	Carlota I.	3,3	a	92	ab	101	a	100	a	77	a	10	a	12	c	1,4	a	1,4	a	27	a	93	a	133	a
B.I. Sureña	12,3	b	98	a	26,0	b	4,0	a	93	ab	86	a	81	B	5,3	e	B.I. Sureña	3,2	a	95	a	99	a	99	a	80	a	10	a	12	bc	1,3	ab	1,4	a	26	a	94	a	130	a
B.I. Yapa	12,2	b	95	a	7,0	f	3,6	a	84	b	88	a	94	ab	12,4	ab																									
Bw 130	12,6	ab	94	ab	5,4	g	3,9	a	98	a	89	a	104	ab	8,4	c																									
Carlota I.	13,0	ab	94	ab	23,2	c	3,6	a	95	a	85	a	92	B	8,3	c																									
Juana I.	12,8	ab	97	a	20,4	d	3,7	a	95	a	93	a	85	B	3,5	fg																									
Marita I.	13,2	a	88	c	14,3	e	3,6	a	96	a	88	a	93	B	6,8	d																									

*Valores con distinta letra son estadísticamente diferentes, según la prueba de Tukey HSD al 5% de probabilidad.

Tabla 20. Valores promedio de las variables evaluadas a cada variedad de avena, en los experimentos de cámara de crecimiento, macetas en invernáculo, campo y macetas a la intemperie que fueron tratadas con sulfometuron-clorimuron.

Variables																																									
F. Variación	Cámara de crecimiento			Macetas en invernáculo			Campo	F. Variación	Macetas a la intemperie																																
	Germinación		Altura	Emergencia	Altura	Peso R.	Peso R.		Emergencia	Altura relativa			Act. del ápice		Macollos		SPAD	Peso R.																							
Variedad	Horas	%	I ₅₀	días	21 dds	I ₅₀	21 dds	I ₅₀	Variedad	días	15 dds	12 dds	15 dds	20 dds	25 dds	35 dds	25 dds	35 dds	35 dds	25 dds	55 dds																				
B.I. Aikén	12,7	c*	93	ab	0,89	b	3,4	a	92	a	76,6	a	87	ab	54,7	b	Bw 130	2,8	a	90	ab	36	c	43	c	46	b	7	b	11	c	1,1	b	1,2	a	23	ab	65	b	65	c
B.I. Calén	13,4	c	90	bc	0,37	d	4,0	a	93	a	49,8	e	105	A	64,4	a	B.I. Maná	2,8	a	93	a	59	b	65	b	69	ab	10	a	13	ab	1,2	a	1,2	a	25	a	102	a	109	ab
B.I. Maná	15,6	ab	86	cd	15,76	a	3,8	a	96	a	42,1	f	78	ab	53,0	b	B.I. Aikén	2,7	a	87	b	83	a	86	a	89	a	10	a	14	a	1,2	a	1,2	a	24	ab	127	a	149	a
B.I. Sureña	12,5	c	97	a	0,56	c	3,9	a	95	a	56,6	c	86	ab	30,5	d	Juana I.	2,7	a	89	ab	74	ab	78	ab	71	a	10	a	13	b	1,2	a	1,2	a	23	b	122	a	95	bc
B.I. Yapa	12,8	c	89	bcd	0,56	c	3,9	a	89	a	57,6	c	87	ab	34,8	c																									
Bw 130	13,8	bc	90	bc	0,04	g	3,9	a	93	a	28,9	g	60	B	53,6	b																									
Carlota I.	16,5	a	90	bcd	0,03	h	3,8	a	94	a	50,5	de	81	ab	20,9	f																									
Juana I.	13,8	bc	98	a	0,08	e	3,8	a	94	a	72,4	b	87	ab	29,1	e																									
Marita I.	15,7	ab	84	d	0,06	f	3,8	a	92	a	53,9	d	99	A	56,0	b																									

*Valores con distinta letra son estadísticamente diferentes, según la prueba de Tukey HSD al 5% de probabilidad.