

**EFFECTO DE APLICACIONES SECUENCIALES DE HERBICIDAS INHIBIDORES DE
LA ACETOLACTATO SINTETASA SOBRE SOJA, TRIGO Y CEBADA**

Néstor Hernán Panaggio

**Trabajo de Tesis para ser presentado como requisito parcial para optar al título
de *MAGISTER SCIENTIAE* EN PRODUCCIÓN VEGETAL**

Área de Producción Vegetal

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS AGRARIAS

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA

Lugar de realización: Unidad Integrada Balcarce. Facultad de Ciencias Agrarias,

UNMdP – Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA

Balcarce, Argentina

20 de diciembre de 2017

**EFFECTO DE APLICACIONES SECUENCIALES DE HERBICIDAS INHIBIDORES DE
LA ACETOLACTATO SINTETASA SOBRE SOJA, TRIGO Y CEBADA**

Néstor Hernán Panaggio

.....

Francisco Bedmar, Dr. M.Sc., Ing Agr.

Director de tesis

.....

Cerrudo, Anibal Alejandro, M.Sc., Ing Agr.

Asesor

.....

Monterubbianesi, Gloria, Dra, M. Sc., Profesora

Asesora

**EFFECTO DE APLICACIONES SECUENCIALES DE HERBICIDAS INHIBIDORES DE
LA ACETOLACTATO SINTETASA SOBRE SOJA, TRIGO Y CEBADA**

Néstor Hernán Panaggio

Aprobada por:

.....

Evaluador: Víctor Juan, M. Sc, Ing. Agrónomo

.....

Evaluador: Mario Raúl Vigna, M Sc, Ing. Agrónomo

.....

Evaluador: Juan Pablo Monzón, Dr., Ing. Agrónomo

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecerle a Francisco Bedmar (“Paco”) por haberme guiado durante este aprendizaje, por hacerme sentir muy bien acompañado en este trabajo y por brindarme toda su experiencia como profesional y sobre todo, su calidad humana.

También quiero agradecerle a Anibal Cerrudo por su constante apoyo, su calidad profesional y su actitud siempre positiva y alentadora.

A Valeria Gianelli (“Vale”), Luis Cabrelli (“Luisito”) y Eduardo Bellos (“Edu”) por haberme integrado a su equipo de trabajo, por ayudarme en los ensayos y volcarme toda su experiencia laboral para mejorar día tras día; y por el lindo día a día que compartimos trabajando juntos.

A Gloria Monterubbianesi (“Gloria”) por haberme asesorado en este aprendizaje y por sus correcciones más que oportunas.

A Dora Carmona por haberme recibido el día que ingrese a este trabajo y por guiarme continuamente en este camino laboral.

A Juan José Martínez, por ayudarme con las tareas de siembra y aplicaciones de fertilizantes y por su excelente profesionalidad.

A Juli, Dieguito, Miriam y Edu por los buenos momentos compartidos y por su buen compañerismo de cada día.

A todos mis vecinos laborales, es decir, Pablo, Ariel, Carla, Claudia, María, Verónica y Mónica por la buena onda del día a día.

A toda mi familia, mi papá Néstor, mis hermanos Diego y Cecilia, mi hermosa sobrina Emmita, mi abuela Azucena y en especial a mi mamá Cristina por ayudarme siempre.

A Silvia, Jorge y Romina (mi segunda familia) por todos los momentos compartidos fuera de la actividad laboral.

Y especialmente quiero dedicarle este trabajo al amor de mi vida, Laurita, por el apoyo constante y por el día a día que compartimos juntos y todos los hermosos momentos vividos hasta hoy.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABREVIATURAS	xv
ABSTRACT	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Modo de acción de herbicidas: Inhibidores de la acetolactato sintetasa	5
2.2 Persistencia de herbicidas en el suelo.....	5
2.3 Factores que afectan la residualidad de los herbicidas.....	6
2.4 Recomendaciones de uso de herbicidas inhibidores de la ALS estudiados.....	7
2.4.1 Metsulfuron.....	7
2.4.2 Clorimuron	7
2.4.3 Clorsufluron+Metsulfuron metil (Finesse).....	8
2.4.4 Diclosulam	8
2.4.5 Imazetapir.....	8
2.5 Residualidad y acumulación de residuos herbicidas en el suelo y efectos en cultivos en rotación	9
2.6 HIPÓTESIS	10
2.7 OBJETIVOS	11
MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
3.1 Características de los ensayos de campo	12
3.2 Muestreos y determinaciones.....	16
3.2.1 Cultivo de soja	16
3.2.2 Cultivos invernales.....	18
3.2.3 Bioensayos	19

3.3 Análisis estadísticos	20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1 Condiciones climáticas durante la experimentación	21
4.2 Efectos en el crecimiento y rendimiento del cultivo de soja	26
4.2.1 Fitotoxicidad sobre el cultivo de soja	26
4.2.2 Producción de materia seca del cultivo	29
4.2.3 Intercepción de radiación	33
4.2.4 Tasa de crecimiento del cultivo y eficiencia de conversión de la radiación interceptada	34
4.2.5 Rendimiento del cultivo de soja	37
4.2.6 Disipación de los herbicidas en el suelo y tolerancia del cultivo	39
4.3 Efectos en el crecimiento y en el rendimiento de los cultivos invernales	40
4.3.1 Fitotoxicidad sobre trigo y cebada	40
4.3.1.1 Fitotoxicidad y su relación con los activos herbicidas	44
4.3.1.2 Acumulación de residuos herbicidas inhibidores de ALS y fitotoxicidad sobre los cultivos invernales.....	45
4.3.2 Rendimiento de los cultivos invernales	46
4.3.3 Componentes numéricos del rendimiento	50
4.3.3.1 Número de granos	51
4.3.3.2 Peso por grano	57
4.3.4 Relaciones entre el crecimiento y el rendimiento de los cultivos invernales	58
4.4 Bioensayos en cámara de crecimiento	61
4.4.1 Resultados de los bioensayos	61
CONCLUSIONES.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....	72

APÉNDICE.....	83
---------------	----

Figura I. Diagrama de campo del ensayo para la fase experimental barbecho químico/soja.

Figura II. Diagrama de campo del ensayo durante la fase completa barbecho químico/soja/barbecho químico/cultivos invernales.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores de suelo y climáticos que incrementan la persistencia de las sulfonilureas, imidazolinonas y triazolpirimidinas.....	6
Tabla 2. Clasificación de los herbicidas inhibidores de la ALS utilizados en la experimentación	9
Tabla 3. Características físicas y químicas del suelo utilizado en la experimentación	12
Tabla 4. Secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS, momentos de aplicación y número de herbicidas aplicados en la fase barbecho químico/soja	13
Tabla 5. Secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS, momentos de aplicación y número de herbicidas aplicados durante la fase completa barbecho químico/soja/barbecho químico/cultivos invernales	15
Tabla 6. Manejo de los cultivos utilizados en la experimentación	16
Tabla 7. Condiciones meteorológicas mensuales, temperatura, precipitaciones, evapotranspiración y déficit de agua (DA) de la serie histórica 1985-2013.....	24
Tabla 8. Condiciones meteorológicas mensuales, temperatura, precipitaciones, evapotranspiración y déficit de agua (DA) durante la fase experimental completa 2014-2015.....	24
Tabla 9. Fitotoxicidad visual en el cultivo de soja a los 7, 14, 21, 28 días después de la aplicación de postemergencia	28
Tabla 10. Fitotoxicidad y materia seca del cultivo de soja a los 39, 60 y 90 días después de la emergencia para diferentes secuencias de herbicidas.	31
Tabla 11. Fitotoxicidad (%) y altura del cultivo de soja en los estadios fenológicos V2, R2 y R7 en las ocho (8) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo .	33
Tabla 12. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC), radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFAi), eficiencia de uso de la radiación (EUR) durante el período de crecimiento R2-R6 y rendimiento del cultivo de soja para las ocho (8) secuencias herbicidas y el testigo durante la campaña 2014-2015 en Balcarce	36
Tabla 13. Rendimiento, peso de grano (PG) y número de granos m ⁻² (NG) del cultivo de soja para las ocho (8) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo	38
Tabla 14. Fitotoxicidad visual (%) a los 71 y 83 días después de la siembra (DDS), altura, biomasa y longitud de espigas a los 95 DDS para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo, en cebada.....	42

Tabla 15. Fitotoxicidad visual (%) a los 71 y 83 días después de la siembra (DDS), altura, biomasa y longitud de espigas a los 104 DDS para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo, en trigo.....	44
Tabla 16. Rendimiento en grano (RTO), peso por grano (PG) y número de granos m ⁻² (NG) de cebada y trigo para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo	49
Tabla 17. Coeficientes de determinación (R ²) entre el Rendimiento (g m ⁻²) y el Número de granos (NG) y/o el Peso de grano (PG) para Cebada y Trigo incluyendo todas las secuencias herbicidas	50
Tabla 18. Número de espigas m ⁻² y granos por espiga en cebada y trigo para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo	55
Tabla 19. Tasa de crecimiento (TCC), radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) y eficiencia de uso de la radiación (EUR), para cebada y trigo, en las 10 secuencias herbicidas y el testigo, en el período comprendido entre los dos muestreos de biomasa.....	59
Tabla 20. Coeficientes de determinación de las regresiones lineales de la tasa de crecimiento (g MS m ⁻²) sobre la eficiencia de uso de la radiación (g MJ ⁻¹) y sobre la radiación interceptada acumulada (MJ m ⁻² día ⁻¹) durante el período crítico de definición del rendimiento incluyendo todas las secuencias herbicidas para trigo y cebada	61
Tabla 21. Altura promedio y biomasa promedio de cebada y trigo en cada secuencia herbicida en el bioensayo en cámara de crecimiento.....	62
Tabla 22. Altura, biomasa, longitud de raíz y síntomas en raíces del cultivo de cebada en el bioensayo en cámara de crecimiento.	63
Tabla 23. Altura, biomasa y síntomas en raíces del cultivo de trigo en el bioensayo en cámara de crecimiento.	64
Tabla 24. Matriz de correlaciones entre las variables determinadas en el bioensayo y las variables de campo para el cultivo de cebada.	67
Tabla 25. Matriz de correlaciones entre las variables altura de trigo, biomasa de trigo y longitud de raíz en cebada determinadas en el bioensayo y distintas variables de trigo determinadas en condiciones de campo.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Promedios decádicos de precipitaciones y de evapotranspiración potencial (ETP) durante la fase experimental julio 2014 - junio 2015, y sus respectivos valores históricos para la serie 1985-2013 calculados a partir de los datos de la Estación Meteorológica de la EEA INTA Balcarce..	22
Figura 2. Promedios decádicos de precipitaciones y de evapotranspiración potencial (ETP) durante la fase experimental enero 2015 - diciembre 2015, y sus respectivos valores históricos para la serie 1985-2013 calculados a partir de los datos de la Estación Meteorológica de la EEA INTA Balcarce.	22
Figura 3. Figura 3. Promedios decádicos de temperatura máxima, mínima y media del aire en abrigo meteorológico durante la fase experimental julio 2014 – junio 2015 y sus respectivos valores históricos (serie 1985-2013).	23
Figura 4. Promedios decádicos de temperatura máxima, mínima y media del aire en abrigo meteorológico durante la fase experimental enero 2015 – diciembre 2015 y sus respectivos valores históricos (serie 1985-2013).	23
Figura 5. Materia seca acumulada del cultivo de soja en función de los días después de la emergencia para las ocho (8) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.	30
Figura 6. Radiación interceptada (RFA) por el cultivo de soja, expresada como % de la radiación incidente, en función de los días después de la emergencia para las ocho (8) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo	34
Figura 7. Relación entre el rendimiento y el número de granos m ⁻² en cebada y para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo	50
Figura 8. Relación entre el rendimiento y el número de granos m ⁻² en trigo y para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.	51
Figura 9. Relación entre el número de granos m ⁻² y el número de espigas m ⁻² en el cultivo de cebada para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.	53

Figura 10. Relación entre el número de granos m^{-2} y el número de espigas m^{-2} en el cultivo de trigo para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.....	53
Figura 11. Rendimiento del cultivo de cebada en función del número de espigas m^{-2} para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.	56
Figura 12. Rendimiento del cultivo de trigo en función del número de espigas m^{-2} para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.	56
Figura 13. Rendimiento del cultivo de cebada en función de la tasa de crecimiento del cultivo durante el período entre muestreos de biomasa para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.	60
Figura 14. Rendimiento del cultivo de trigo en función de la tasa de crecimiento del cultivo durante el período entre muestreos de biomasa para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.	60
Figura 15. Longitud de raíces en cebada en el bioensayo en cámara de crecimiento para el testigo (1) y las secuencias herbicidas Metsulfurón/Imazetapir (4), Metsulfurón/Diclosulam (6), Metsulfurón/Diclosulam/Imazetapir (7) y Metsulfurón/Diclosulam/Imazetapir/Clorsulfuron+Metsulfuron (10).	65
Figura 16. Síntomas de fitotoxicidad por residualidad y acumulación de herbicidas inhibidores de la ALS (engrosamiento, menor volumen de pelos radiculares, menor longitud radicular) en cebada en una secuencia que incluyó Metsulfurón/Diclosulam/Imazetapir (secuencia 7).....	65
Figura 17. Síntomas de engrosamiento y de menor longitud radicular en trigo en la secuencia Metsulfurón/Diclosulam/Imazetapir (7) en relación a la secuencia testigo (1).	66

RESUMEN

Los objetivos de este trabajo fueron determinar los efectos residuales de aplicaciones en secuencia de herbicidas inhibidores de la acetolactato sintetasa (ALS) sobre el crecimiento y rendimiento de soja, trigo y cebada, y validar la metodología de bioensayo en cámara de crecimiento como predictora de la residualidad por herbicidas para los cultivos de invierno. Fueron evaluadas secuencias de herbicidas (SH) usualmente utilizadas en el sudeste bonaerense en una rotación soja/trigo o cebada. El ensayo se realizó en siembra directa y en secano, en un suelo Argiudol típico, en la EEA INTA Balcarce, desde julio de 2014 a diciembre de 2015. Se sembraron los cultivares de soja DM 3810, de trigo Baguette 601 y Andreia de cebada cervecera. En soja se evaluaron las siguientes SH: 1) Testigo, 2) Metsulfuron, 3) Metsulfuron/Imazetapir, 4) Metsulfuron/Clorimuron, 5) Metsulfuron/Diclosulam, 6) Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir, 7) Metsulfuron/Clorimuron/Imazetapir, 8) Metsulfuron/Clorimuron/Clorimuron, 9) Metsulfuron/Diclosulam/Clorimuron. Se empleó un diseño en bloques con cuatro (4) repeticiones.

En los cultivos invernales (CI) las SH evaluadas fueron: 1) Testigo, 2) Metsulfuron, 3) Metsulfuron/Metsulfuron, 4) Metsulfuron/Imazetapir/ Metsulfuron, 5) Metsulfuron/Clorimuron/Metsulfuron, 6) Metsulfuron/Diclosulam/Metsulfuron, 7) Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Metsulfuron, 8) Metsulfuron/Clorimuron/Imazetapir/Metsulfuron, 9) Metsulfuron/Clorimuron/Clorimuron/Metsulfuron, 10) Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/(Clorsulfuron+Metsulfuron)/Metsulfuron) y 11) Metsulfuron/Diclosulam/Clorimuron/(Clorsulfuron+Metsulfuron)/Metsulfuron. Se utilizó un diseño en bloques divididos con cuatro (4) repeticiones.

Las SH inhibidores de la ALS no causaron efectos negativos sobre la biomasa ($p > 0,05$), la altura final ($p > 0,05$) y el rendimiento ($p > 0,05$) de soja. Sólo las secuencias que incluyeron la aplicación de Imazetapir causaron fitotoxicidad ($p < 0,05$). La radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) y la eficiencia de uso de la radiación (EUR) no difirieron entre las SH durante el período R2-R6, en consecuencia, la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) no fue afectada ($p > 0,05$).

La cebada y el trigo fueron afectados por la residualidad de los herbicidas. Se determinó efecto de interacción entre las SH y los CI para la fitotoxicidad visual ($p < 0,05$), la biomasa ($p < 0,05$) y la altura ($p < 0,05$). La fitotoxicidad se correlacionó en

forma negativa con la altura y la biomasa de cebada ($r = -0,89$; $r = -0,9$) y trigo ($r = -0,79$; $r = -0,76$). Se determinó efecto de interacción entre las SH y los CI sobre la TCC ($p < 0,05$). La disminución de la TCC en cebada fue explicada principalmente por reducciones en la RFAi y en trigo, por reducciones en la EUR. En secuencias con igual cantidad de herbicidas, la inclusión de Clorimuron resultó menos fitotóxica que Diclosulam o Imazetapir. Las secuencias que incluyeron Diclosulam/Imazetapir resultaron más fitotóxicas para trigo y cebada. Se determinó efecto de interacción entre las SH y los CI para el rendimiento ($p < 0,05$), el número de granos m^{-2} (NG) ($p < 0,05$) y el número de espigas m^{-2} (NESP) ($p < 0,05$). De los componentes numéricos del rendimiento, el NG fue el que mayormente explicó las variaciones, principalmente por la reducción en el NESP. La máxima disminución del rendimiento respecto del testigo sin ALS fue 11,4% en trigo y 33,7% en cebada ($p < 0,05$) y se obtuvo en la secuencia Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/(Clorsulfuron+Metsulfuron)/Metsulfuron. Los daños causados por residualidad en los CI se asociaron a las condiciones de sequía ocurridas durante el cultivo antecesor. Cebada resultó más sensible que trigo para todas las variables estudiadas.

Los efectos negativos de las SH sobre los CI fueron bien predichos por el bioensayo. En cebada, la longitud radicular fue la variable que mejor se correlacionó con las variables de campo, mientras que en trigo, la altura y la biomasa presentaron leves asociaciones con las variables de campo.

Palabras claves: residualidad, acumulación de herbicidas en suelo, fitotoxicidad, cultivos de verano, cultivos de invierno

ABREVIATURAS

ALS: Acetolactato sintetasa

BIOCC: Bioensayo en cámara de crecimiento

BQC: Barbecho químico corto

BQ invernol: Barbecho químico invernol

BQL: Barbecho químico largo

Clorim: Clorimuron

Clors+Met: Clorsulfuron+Metsulfuron

DA: Déficit de agua

DDA: Días después de la aplicación

DDE: Días después de la emergencia

DDS: Días después de la siembra

Diclos: Diclosulam

DT₅₀: Vida media herbicida

EUR: Eficiencia de uso de la radiación

g MS MJ⁻¹: Gramos de materia seca por megajoule interceptado

ia: Ingrediente activo

Imaz: Imazetapir

MDS: Mínima diferencia significativa

Met: Metsulfuron

MO: Materia orgánica

NESP: Número de espigas por metro cuadrado

NG: Número de granos por metro cuadrado

NGESP: Número de granos por espiga

NS: No significativo

PG: Peso por grano

POE: Postemergencia

Vn ó Rn: Estadío de desarrollo de soja según escala Fehr y Caviness

RFA: Radiación fotosintéticamente activa

RFAi: Radiación fotosintéticamente activa interceptada

RI: Radiación interceptada

SEB: Sudeste bonaerense

Sig: Significativo

TCC: Tasa de crecimiento de cultivo

Z n: Estadío fenológico de trigo o cebada según escala Zadoks *et al.*

EFECTO DE APLICACIONES SECUENCIALES DE HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA ACETOLACTATO SINTETASA SOBRE SOJA, TRIGO Y CEBADA

ABSTRACT

The objectives of this work were to determine carryover effects of sequential applications of acetolactate synthetase inhibitor (ALS) herbicides on the growth and yield of soybean, wheat and barley, and to validate the growth chamber bioassay methodology as a predictor of herbicide residues for winter crops. Herbicides sequences (HS) usually used in southeastern Buenos Aires were evaluated in a soybean / wheat or barley rotation. The experiment was carried out under no tillage and under rain-fed, in a Typic Argiudoll soil, in the EEA INTA Balcarce, from July 2014 to December 2015. Cultivars of soybean DM 3810, wheat Baguette 601 and malting barley Andreia were planted. The following SH were evaluated in soybean: 1) Control check, 2) Metsulfuron, 3) Metsulfuron/Imazethapyr, 4) Metsulfuron/Chlorimuron, 5) Metsulfuron/Diclosulam, 6) Metsulfuron/Diclosulam/Imazethapyr, 7) Metsulfuron/Chlorimuron /Imazethapyr, 8) Metsulfuron/Chlorimuron/Chlorimuron, 9) Metsulfuron/Diclosulam/Chlorimuron. A design in complete and randomized blocks with four (4) replications was used.

Herbicide sequences evaluated in winter crops (CI) were: 1) Control check, 2) Metsulfuron, 3) Metsulfuron/Metsulfuron, 4) Metsulfuron/Imazethapyr/Metsulfuron, 5) Metsulfuron/Chlorimuron/Metsulfuron, 6) Metsulfuron/Diclosulam/Metsulfuron, 7) Metsulfuron/Diclosulam/Imazethapyr/Metsulfuron, 8) Metsulfuron/Chlorimuron/Imazethapyr/Metsulfuron, 9) Metsulfuron/Chlorimuron/Chlorimuron/Metsulfuron, 10) Metsulfuron/Diclosulam/Imazethapyr/(Chlorsulfuron+Metsulfuron)/Metsulfuron, 11) Metsulfuron/Diclosulam/Chlorimuron/(Chlorsulfuron+Metsulfuron)/Metsulfuron. A divided block design with four (4) replications was used.

Sequences of ALS inhibitor herbicides did not cause negative effects on biomass ($p > 0.05$), final height ($p > 0.05$) and yield ($p > 0.05$) of soybean. Only sequences including application of Imazethapyr caused phytotoxicity ($p < 0.05$). Intercepted photosynthetically active radiation (RFAi) and radiation use efficiency (EUR) did not differ among SH during the R2-R6 period, consequently the crop growth rate (TCC) was not affected ($p > 0.05$).

Barley and wheat were affected by the herbicide carryover. Interaction effect between SH and CI for visual phytotoxicity ($p < 0.05$), biomass ($p < 0.05$) and height (p

< 0.05) were determined. Visual phytotoxicity was negatively correlated with height and biomass in barley ($r = -0.89$; $r = -0.9$) and wheat ($r = -0.79$, $r = -0.76$), respectively. Interaction effect between SH and CI on TCC ($p < 0.05$) was determined. Decrease of TCC in barley was mainly explained by reductions in RFAi, while in wheat, by reductions in EUR. Inclusion of Chlorimuron in sequences with equal amount of accumulated herbicides, was less phytotoxic than Diclosulam or Imazethapyr. Sequences including Diclosulam/Imazethapyr were more phytotoxic for wheat and barley. Interactions effect between SH and CI on yield ($p < 0.05$), number of seeds m^{-2} (NG) ($p < 0.05$) and number of spikes m^{-2} (NESP) ($p < 0.05$) were determined. Variations of yield, were mainly explained by NG, because of the reduction in the NESP. Maximum yield decrease as compared from the control check was 11.4% in wheat and 33.7% in barley ($p < 0.05$) and was determined in the sequence Metsulfuron/Diclosulam/Imazethapyr/(Chlorsulfuron+Metsulfuron)/Metsulfuron. Damages caused by herbicide residues in winter crops were associated with the drought conditions during soybean crop. Barley was more sensitive than wheat for all the studied variables.

Negative effects of SH on CI were well predicted by the growth chamber bioassay. In barley, root length was the variable that best correlated with field variables, while in wheat, height and biomass showed slight associations with field variables.

Key words: carryover, soil herbicide accumulation, phytotoxicity, summer crops, winter crops.

INTRODUCCIÓN

Los inhibidores de la acetolactato sintetasa (ALS) constituyen uno de los principales grupos de herbicidas más difundidos a nivel mundial y con mayor cantidad de activos disponibles en el mercado (Cole *et al.*, 2000). En los últimos años creció su uso debido a la proliferación de biotipos de malezas tolerantes o resistentes a glifosato, a la consolidación del barbecho químico como primer momento para el control de malezas (CASAFE 2015-2017) y al vencimiento de sus patentes. Son herbicidas residuales, es decir, controlan malezas después del momento de aplicación y, muchos de ellos, han sido reportados como causantes de daños fitotóxicos sobre distintos cultivos de importancia económica, en Argentina (Bedmar y Gianelli, 2014). Además, a nivel mundial, son herbicidas reconocidos por causar problemas de residualidad o “carryover” en amplia escala (Cantwell *et al.*, 1989; Goetz *et al.*, 1990).

La residualidad es definida como el tiempo en días en el cual un herbicida permanece activo a concentraciones fitotóxicas para las plantas. La longitud de tiempo que permanecen activos no es una variable simple de predecir debido a que hay muchos factores que influyen en la residualidad, tales como, las características edafoclimáticas del suelo (pH, contenido de materia orgánica, textura y composición, contenido de humedad y temperatura) (Helling, 2005), las características químicas del herbicida y factores de la aplicación (Moyer y Hamman 2001), que pueden modificar la toxicidad hacia los cultivos.

En los últimos años se han incrementado los problemas de residualidad a nivel mundial, situación que se refleja anualmente con el número creciente de publicaciones científicas asociadas a esta problemática (Mueller y Senseman, 2015). Particularmente, en Argentina se han agravado los problemas de residualidad por el uso desmedido de estos herbicidas y/o por desvíos de uso (dosis incorrectas, momentos de aplicación inadecuados, aditividad, mezclas herbicidas inapropiadas o secuencias de aplicación, etc.) (Salzman y Renner, 1992; Papa y Massaro, 2005).

La versatilidad de uso de los herbicidas inhibidores de la ALS permite que puedan aplicarse en períodos de barbecho, en preemergencia y/o postemergencia de diferentes cultivos (Shaner, 2014; Vigna *et al.*, 2014). A consecuencia de ello, se pueden suceder aplicaciones en un mismo lote durante una misma campaña de producción. Tal práctica, es ampliamente difundida en la región del sudeste bonaerense (SEB) en rotaciones de soja y cultivos invernales y, como en otras partes

del mundo, es objeto de control de malezas difíciles (Watts *et al.*, 1997; Shaw *et al.*, 1999; Reddy, 2000). Estas aplicaciones en secuencia pueden causar la acumulación de residuos herbicidas en el suelo, incrementando los daños hacia los cultivos. Esta problemática es conocida como acumulación o “stacking”, y ha sido reportada previamente en cultivos extensivos y hortícolas en otras partes del mundo (Moyer y Hamman, 2001; Johnson *et al.*, 2005; Geisel, 2007; Robinson, 2008), pero localmente la información es limitada. La acumulación se define como un aumento de la fitotoxicidad (de forma aditiva o sinérgica) en los cultivos en rotación, producto de aplicaciones repetidas de herbicidas residuales (Johnson *et al.*, 2005). La misma podría ser explicada por la interacción aditiva o sinérgica de pequeñas cantidades de residuos herbicidas en el suelo que incrementarían la fitotoxicidad hacia los cultivos (Nash, 1981).

En soja las aplicaciones de herbicidas inhibidores de la ALS en el barbecho previo al cultivo, pueden incrementar el riesgo de fitotoxicidad de herbicidas del mismo modo de acción aplicados en presembrado (Diclosulam o Clorimuron) y/o postemergencia (Clorimuron o Imazetapir) debido a la posibilidad de interacciones entre pesticidas. Algunos antecedentes han reportado interacciones entre herbicidas y/o entre herbicidas e insecticidas (Kapusta y Krausz, 1992; Diel *et al.*, 1995) con efectos fitotóxicos sobre los cultivos. Adicionalmente Askew *et al.* (1999) determinaron diferencias en la fitotoxicidad de soja en función de la combinación de herbicidas aplicados en pre-sembrado y postemergencia. Otros estudios demostraron una mayor fitotoxicidad sobre soja por aplicaciones en secuencia, en preemergencia y postemergencia (Shaw *et al.*, 1999) o por mezclas de herbicidas inhibidores de la ALS (Simpson y Stoller, 1996) respecto de aplicaciones simples de cada herbicida. Vidrine *et al.* (2002) reportaron daños por aplicaciones de postemergencia de herbicidas inhibidores de la ALS, con lo cual, la utilización durante el barbecho de herbicidas de igual modo de acción podría incrementar los daños sobre el cultivo debido a que comparten las rutas metabólicas de detoxificación. Sin embargo, en numerosos casos, los efectos fitotóxicos por estos herbicidas no se traducen en mermas del rendimiento (Krausz *et al.*, 1992; Corrigan y Harvey, 2000). A pesar de estos antecedentes de fitotoxicidad a nivel mundial, es necesario generar información sobre el efecto de secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS utilizadas en la región del SEB en el cultivo de soja.

Por su parte, los cultivos de trigo (*Triticum aestivum*) y cebada cervecera (*Hordeum vulgare*), suelen sembrarse a continuación del cultivo de soja en nuestra región y pueden ser afectados por la residualidad de los herbicidas aplicados en este cultivo. Investigaciones previas han determinado daños por residualidad debido a la aplicación, en el cultivo antecesor, de un solo herbicida inhibidor de la ALS sobre trigo (Ball *et al.*, 2003; Bedmar y Gianelli, 2012) y cebada (Istilart, 2005), con lo cual, la aplicación repetida de herbicidas de igual modo de acción, podría incrementar el daño hacia los cultivos invernales (Moyer y Hamman, 2001) debido a los efectos acumulados de residuos herbicidas. Secuencias de aplicación que incluyan herbicidas de moderada-larga persistencia (Diclosulam o Imazetapir), en comparación con aquellas que incluyan herbicidas menos persistentes (Clorimuron), podrían causar mayor fitotoxicidad en los cultivos siguientes, debido al mayor potencial carryover que presentan (Shaner, 2014). También podría considerarse que la aplicación de un mayor número de herbicidas inhibidores de la ALS en el cultivo previo puede resultar más fitotóxica sobre los cultivos en rotación, respecto de secuencias herbicidas con menor número de aplicaciones. Algunos antecedentes citaron diferencias en el daño fitotóxico en cultivos sensibles que continuaron la rotación, en función del activo herbicida empleado en soja, (Walsh *et al.*, 1993; O' Sullivan *et al.*, 1998). Asimismo reportes previos determinaron mayores daños fitotóxicos por residualidad, en cultivos sensibles, en secuencias que utilizaron dos herbicidas respecto de las que emplearon un solo herbicida (Soltani *et al.*, 2005; Robinson *et al.*, 2006; Robinson, 2008). Sin embargo, no hay suficiente información bibliográfica sobre los efectos de secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS empleadas en la región del SEB, sobre los cultivos de trigo y cebada.

Estos herbicidas pueden causar fuertes reducciones del crecimiento y del rendimiento en cultivos sensibles, síntomas relacionados con su modo de acción en las plantas (Gunsolus y Curran, 2007; Arregui y Puricelli, 2008). En condiciones de estrés temporario o prolongado debido a la aplicación de herbicidas, los cultivos pueden disminuir su tasa de crecimiento (Larcher, 2000, en Pinto de Carvalho *et al.*, 2009) y, consecuentemente, sufrir mermas en el rendimiento. Los efectos fitotóxicos sobre el rendimiento pueden ser analizados desglosando sus componentes principales en número de granos m^{-2} (NG) y el peso de granos (PG), como ya ha sido analizado previamente para herbicidas de otro modo de acción (Robinson *et al.*, 2013). En cultivos que crecen sin limitaciones, normalmente el NG es el componente que mejor

explica las variaciones en el rendimiento (Andrade *et al.*, 2000), situación similar a lo que ocurre en cultivos creciendo en ambientes restrictivos.

La sensibilidad a los residuos de herbicidas inhibidores de la ALS varía con las especies cultivadas (Ball *et al.*, 2003; Greenland, 2003; Alister y Kogan, 2005; Bedmar *et al.*, 2006) e incluso con los cultivares de cada especie (Rabaey y Harvey, 1997). Las respuestas de los cultivos están relacionadas intrínsecamente con la selectividad respecto a la molécula herbicida (Devine *et al.*, 1993 en Pinto de Carvalho *et al.*, 2009), existiendo diferencias muy importantes en el metabolismo de la misma (Cole, 1994; Hatton *et al.*, 1996). Estudios previos han determinado mayor sensibilidad a herbicidas inhibidores de la ALS, como las imidazolinonas, en cebada cervecera que en trigo (Istilart, 2005; Dipiano y Waimann, 2015), mientras que, en otros estudios, no han encontrado daños en ninguno de los dos cultivos (Suzer y Buyuk, 2010). Adicionalmente en las últimas campañas, los productores del SEB han consultado mayormente por problemas de residualidad en cebada. Estos antecedentes en los cultivos invernales hacen suponer que cebada es más sensible que trigo a los residuos de herbicidas inhibidores de la ALS. En la actualidad y para la región del SEB, hay pocos estudios sobre la respuesta comparada de estos cultivos, ante una misma situación de residualidad en condiciones de campo.

Los problemas de residualidad causados por herbicidas pueden ser detectados mediante la realización de un bioensayo, que es una metodología de diagnóstico utilizada para la detección de distintos herbicidas (Leguizamón, 2014). Los herbicidas inhibidores de la ALS tienen un alto potencial para inhibir el crecimiento radicular y la producción de biomasa en los cultivos sensibles, variables que pueden ser cuantificadas mediante esta técnica (Alonso-Prados *et al.*, 2002). Numerosos estudios han utilizado bioensayos para detectar la presencia de estos herbicidas en el suelo (Greenland, 2003; Bedmar *et al.*, 2006; Geisel *et al.*, 2008). Sin embargo, existen casos en los cuales los resultados no se relacionan con las respuestas de los cultivos en el campo, con lo cual se pone en duda su potencial predictivo (Cervellini y Fantini, 2015), resultando consecuente generar información adicional para cada zona productiva para continuar validando la metodología en forma local.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Modo de acción de herbicidas: Inhibidores de la acetolactato sintetasa

Su modo de acción es inhibir la enzima acetolactato sintetasa, enzima clave en la formación de aminoácidos esenciales para el crecimiento de las plantas (Arregui y Puricelli, 2008; Shaner, 2014). Inhiben la formación de los aminoácidos aromáticos leucina, isoleucina y valina (Brown, 1990; Hall *et al.*, 1999; Whitcomb, 1999; Tan *et al.*, 2006). Los síntomas típicos en plantas sensibles incluyen la anulación o reducción del crecimiento (Arregui y Puricelli, 2008), enrojecimiento de nervaduras, clorosis y necrosis foliar, y en algunos casos se puede llegar a la muerte de las plantas. La tolerancia de algunas especies se debe a la rápida metabolización de estos herbicidas a formas inactivas (Brown, 1990).

Los inhibidores de la ALS incluyen diferentes grupos químicos herbicidas, las imidazolinonas (Shaner *et al.*, 1984), las sulfonilureas (Blair y Martin, 1988; Brown, 1990), las triazolpirimidinas (Jabusch y Tjeerdema, 2008) y las sulfonilamino-carbonil triazolinonas (Whitcomb, 1999; Arregui y Puricelli, 2008; Shaner, 2014).

2.2 Persistencia de herbicidas en el suelo

Los herbicidas inhibidores de la ALS pueden persistir en el suelo y su tiempo de persistencia depende de complejas interacciones entre los herbicidas y los factores de suelo y ambiente (Helling, 2005; Bedmar y Gianelli, 2014). La persistencia de un herbicida puede ser caracterizada a través de su vida media (DT_{50}), que indica la cantidad de tiempo en días en que un herbicida se degrada hasta la mitad de la dosis original. Resulta un índice práctico que se puede utilizar en condiciones de campo o laboratorio para estimar la residualidad de un activo herbicida (Helling, 2005). Herbicidas con mayor DT_{50} son potencialmente más riesgosos para causar fitotoxicidad en cultivos en rotación. Actualmente no se dispone de una clasificación universal de herbicidas basada en persistencia ambiental. Roberts (1996) sugiere utilizar una clasificación basada en la DT_{50} en el suelo para caracterizar los herbicidas, clasificándolos en: 1) Impersistentes ($DT_{50} < 5$ días), 2) Levemente persistentes ($DT_{50} = 5 - 21$ días), 3) Moderadamente persistentes ($DT_{50} = 22 - 60$ días) y 4) Muy persistentes ($DT_{50} > 60$ días). Sin embargo este autor consideró que herbicidas con $DT_{50} > 40$ días presentan moderada a larga persistencia en el suelo.

2.3 Factores que afectan la residualidad de los herbicidas

Los principales factores que influyen sobre la persistencia de los herbicidas en el suelo, incluyen factores de suelo, condiciones climáticas, propiedades de los herbicidas (Bedmar y Gianelli, 2014) y factores de manejo, como la dosis o superposición de aplicaciones (Helling, 2005), además de las complejas interacciones entre sí. De los factores de suelo, los más importantes son la materia orgánica (MO), la textura y el pH. De los factores climáticos, los más determinantes son la humedad, la temperatura y la radiación solar. Por último, las propiedades de los herbicidas más importantes, son la solubilidad en agua, la adsorción al suelo, la presión de vapor y la susceptibilidad de la molécula a la degradación química o microbiana.

La mayoría de los herbicidas son degradados por reacciones químicas o por una combinación de reacciones químicas y degradación microbiana. En la Tabla 1 se presentan los principales mecanismos de degradación, así como, los factores que incrementan la persistencia de los grupos químicos herbicidas utilizados en esta experimentación.

Tabla 1. Factores de suelo y climáticos que incrementan la persistencia de las sulfonilureas, imidazolinonas y triazolpirimidinas.

Grupo químico	Principal vía de degradación	Factores climáticos	Factores de suelo
Sulfonilureas	Hidrólisis química y microbiana	Baja temperatura y humedad	pH > 7
Imidazolinonas	Microbiana	Bajas precipitaciones y temperaturas	pH < 6. Elevados contenidos de arcilla y MO
Triazolpirimidinas	Microbiana	Bajas precipitaciones	Baja humedad Elevados valores de pH

Extraído de Bedmar y Gianelli, 2014.

En general, los suelos con mayores niveles de MO y % de arcillas tienen mayor potencial para retener a los herbicidas, disminuyendo potencialmente la fitotoxicidad en los cultivos. La degradación de los herbicidas en el suelo aumenta con mayores niveles de humedad (Goetz *et al.*, 1990), y temperatura, ya que favorecen las

reacciones químicas y la actividad microbiana. La adsorción de los herbicidas al suelo es fuertemente afectada por el pH. Bedmar y Gianelli (2014) sugieren que pH del suelo ≥ 7 incrementa la persistencia de las sulfonilureas al disminuir su adsorción y degradación química. Sin embargo, cuando las condiciones son predisponentes, los problemas de residualidad por herbicidas pueden manifestarse en cualquier tipo de suelo.

2.4 Recomendaciones de uso de herbicidas inhibidores de la ALS estudiados

2.4.1 Metsulfuron

Es un herbicida recomendado para el control de malezas de hoja ancha en períodos de barbecho previo al cultivo de soja, así como, para pre-siembra y/o postemergencia de trigo y cebada (Shaner, 2014; CASAFE, 2015-2017). Estudios previos han determinado daños fitotóxicos en el cultivo de soja con aplicaciones cercanas a la siembra (Sánchez *et al.*, 2011). Trigo y cebada toleran las aplicaciones de postemergencia porque metabolizan rápidamente el activo.

Metsulfuron presenta baja adsorción a las arcillas pero alta adsorción a la materia orgánica (MO). Es moderadamente residual con una DT_{50} de 30 días (Shaner, 2014). Su dosis de uso recomendada en barbechos es de 4,2 g de ingrediente activo (ia) por hectárea (ha), mientras que, en los cultivos invernales suele utilizarse en dosis de 1,7 a 4,2 g ia ha⁻¹. Se recomienda no aplicar más de 6 g ia ha⁻¹año⁻¹ para evitar problemas de fitotoxicidad en los cultivos (CASAFE 2015-2017).

2.4.2 Clorimuron

Es un herbicida utilizado para el control de malezas de hoja ancha en pre-siembra y/o postemergencia de soja (Vigna *et al.*, 2014). Es un herbicida selectivo para soja y su tolerancia ha sido demostrada previamente sobre distintos cultivares (Wilcut *et al.*, 1989; Moseley *et al.*, 1993). Tiene una DT_{50} en condiciones de campo de 40 días (Shaner, 2014). Su dosis de uso recomendada es de 10 a 12 g ia ha⁻¹ (Shaner, 2014; CASAFE, 2015-2017). La persistencia de Clorimuron está directamente relacionada con el pH del suelo (Brown, 1990). Se recomienda un período de, al menos, tres (3) meses entre la aplicación de Clorimuron y la siembra de trigo y cebada para evitar problemas de residualidad (Devlin *et al.*, 1992).

2.4.3 Clorsulfuron+Metsulfuron metil (Finesse)

Es una mezcla comercial, que se compone de un 62,5% de Clorsulfuron y un 12,5% de Metsulfuron. Es utilizada para el control de malezas de hoja ancha en períodos previos a la siembra de trigo y cebada. La DT_{50} de Clorsulfuron es de 40 días (Shaner, 2014) y puede ser adsorbido moderadamente por la MO de los suelos. La dosis recomendada de uso por la empresa comercializadora es de 15 a 24 g ha⁻¹ de formulado.

2.4.4 Diclosulam

Es un herbicida utilizado para el control de malezas de hoja ancha en pre-siembra y/o preemergencia del cultivo de soja (Papa y Ciampitti, 2009; Vigna *et al.*, 2014; CASAFE, 2015-2017). Es un herbicida selectivo para el cultivo (Jabusch y Tjeerdema, 2008) y una opción adicional a otros herbicidas para el manejo de malezas (Reddy, 2000). La DT_{50} es de 33-65 días. La degradación microbiana es el principal mecanismo de degradación en los suelos (Shaner, 2014). La aplicación de Diclosulam en soja no presenta restricciones para la siembra posterior de trigo (CASAFE 2015-2017) en la pampa húmeda, sin embargo, no hay recomendaciones para el cultivo de cebada.

2.4.5 Imazetapir

Es un herbicida selectivo (Teclé *et al.*, 1993) para el cultivo de soja y utilizado para el control de malezas de hoja ancha y en postemergencia (Papa y Ciampitti, 2009; Vigna *et al.*, 2014; CASAFE, 2015-2017). La tolerancia del cultivo de soja a Imazetapir ha sido demostrada por Cole *et al.* (1989) y Krausz *et al.* (1992), sin embargo, algunos estudios han determinado niveles de fitotoxicidad de hasta 29% en sojas convencionales con aplicaciones en postemergencia temprana (Simpson y Stoller, 1996). Tiene una DT_{50} de 60-90 días (Shaner, 2014). Numerosos estudios citan que la residualidad de Imazetapir es mayor a un año para distintos cultivos sensibles.

Los herbicidas inhibidores de la ALS más utilizados en la región del SEB para rotaciones de soja con cultivos invernales se detallan en la Tabla 2. Usualmente se combinan con glifosato para mejorar los controles de malezas (Vangessel *et al.*, 2001) en períodos de barbecho y en aplicaciones de pre y/o postemergencia de cultivos de soja resistentes a glifosato.

Tabla 2. Clasificación de los herbicidas inhibidores de la ALS utilizados en esta experimentación.

Herbicida	Grupo químico	Nombre Comercial	Formulación (% ia)	³ DT ₅₀	⁴ Carryover potencial
Metsulfuron	Sulfonilureas	Met. Nufarm	WG ¹ (60%)	30	MP ⁵
Clorimuron	Sulfonilureas	C. Classic	WG ¹ (25%)	40	MP ⁵
Diclosulam	Triazolpirimidinas	Spider	WG ¹ (84%)	33-65	MP ⁵
Imazetapir+Glifosato	Imidazolinonas ⁸	Alteza	SL ² (2%)	60-90	MuyP ⁶
Clorsulfuron +Metsulfuron	Sulfonilureas	Finesse	WG ¹ (75%)	40 ⁷	MP ⁵

¹ Gránulos dispersables; ² Concentrado soluble; ³ Vida media, datos obtenidos de Shaner, 2014; ⁴ Clasificación según Robert 1996; ⁵ Moderadamente persistente; ⁶ Muy persistente; ⁷DT₅₀ de Clorsulfuron; ⁸ Grupo químico de Imazetapir

2.5 Residualidad y acumulación de residuos herbicidas en el suelo y efectos en cultivos en rotación

Los herbicidas de acción residual pueden causar efectos negativos en cultivos sensibles en rotación. Pinto de Carvalho *et al.* (2009) consideran que los daños fitotóxicos pueden ser estructurales (clorosis, necrosis, epinastía, retorcimiento de hojas) o pueden ser daños fisiológicos que causen reducciones de la tasa de crecimiento o del ciclo productivo. El daño en los cultivos podría ser explicado por la intensidad de uso de herbicidas (Papa y Masaro, 2005), por su persistencia e interacción en el suelo (Geisel, 2007), por la sensibilidad de los cultivos (Helling, 2005) y por las condiciones ambientales post aplicación (Maurice, 2005).

La cinética de degradación que presentan Metsulfuron (Paul *et al.*, 2009), Clorimuron, Imazetapir (Mills y Witt, 1989; Goetz *et al.*, 1990), Diclosulam (Zabick *et al.*, 2001) y Clorsulfuron, sumado a las aplicaciones en secuencia, pueden causar un potencial incremento de los residuos herbicidas y de la fitotoxicidad sobre cultivos sensibles. Por ejemplo, Moyer y Hamman (2001) determinaron que los residuos de Sulfosulfuron combinados con Imazetapir, Metsulfuron o Triasulfuron resultaron en efectos fitotóxicos aditivos sobre remolacha (*Beta vulgaris L.*). Por su parte, Geisel *et al.* (2008) determinaron que las aplicaciones en secuencia de herbicidas inhibidores de la ALS causaron efectos fitotóxicos aditivos sobre cultivos sensibles como canola y trigo. En otro estudio Robinson (2008) determinó que las aplicaciones combinadas de

herbicidas residuales incrementaron los daños de fitotoxicidad sobre los cultivos sensibles en secuencia.

En la actualidad, en la región del SEB se realizan aplicaciones en secuencia de herbicidas inhibidores de la ALS en rotaciones de soja y cultivos invernales, con lo cual, los daños por residualidad en los cultivos de invierno se han incrementado en los últimos años. Tal situación, se ha reflejado en el aumento de consultas recibidas en el grupo de Manejo de Malezas y herbicidas de la Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce sobre los efectos negativos de fitotoxicidad por acumulación de residuos inhibidores de la ALS en el suelo. Sin embargo, se dispone de muy poca información en la literatura internacional y nacional sobre los efectos combinados de diferentes residuos herbicidas en el suelo sobre la fitotoxicidad en cultivos. Los resultados citados en investigaciones previas y los crecientes problemas de residualidad, acrecientan la incertidumbre de productores y asesores acerca del riesgo fitotóxico de esta práctica. En esta investigación se estudiaron los efectos de aplicaciones en secuencia de herbicidas inhibidores de la ALS sobre el crecimiento y los componentes del rendimiento en los cultivos de soja, trigo y cebada para la región del SEB. Asimismo se validó la técnica de bioensayo como predictora de residualidad en condiciones de campo.

2.6 HIPÓTESIS

1-El rendimiento de soja no es afectado por ninguna secuencia de herbicidas inhibidores de la ALS aplicados en el barbecho y/o post-emergencia, independientemente de que pudiesen ocasionar fitotoxicidad en el cultivo.

2-El cultivo de cebada cervecera es más sensible que el trigo a igual secuencia de aplicación de herbicidas inhibidores de la ALS.

3-La fitotoxicidad en cebada y trigo es mayor en aquellas secuencias que utilizan en la fase de barbecho corto de soja, postemergencia de soja y barbecho invernal, tres herbicidas inhibidores de la ALS, respecto de las que utilizan uno o dos herbicidas dependiendo de los ingredientes activos considerados.

4-En secuencias con igual número de herbicidas aplicados, la fitotoxicidad en cebada y trigo es mayor cuando se utilizan herbicidas de mayor persistencia.

5-La residualidad de las secuencias herbicidas reduce la tasa de crecimiento de cebada y trigo durante el período crítico de definición del rendimiento, respecto de cada secuencia testigo.

6-Los bioensayos predicen la fitotoxicidad de aplicaciones secuenciales de herbicidas inhibidores de la ALS en trigo y cebada sembrados a campo.

2.7 OBJETIVOS

1-Determinar los efectos fitotóxicos de aplicaciones en secuencia de herbicidas inhibidores de la ALS, en los cultivos de soja, trigo y cebada, sobre el crecimiento y rendimiento.

2-Characterizar la sensibilidad de cebada y trigo a las secuencias de aplicación planteadas.

3-Utilizar los bioensayos como herramientas de diagnóstico de residuos herbicidas inhibidores de la ALS y comparar los resultados con las respuestas de los cultivos en condiciones de campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Características de los ensayos de campo

Se realizaron dos ensayos en condiciones de campo en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce (latitud 27°45 S, longitud 58° 18 O, altitud 130 msnm) durante las campañas 2014/2015 y 2015/2016, bajo condiciones de secano. El primer ensayo abarcó el estudio durante la fase barbecho químico/soja y el segundo incluyó la fase completa barbecho químico/ soja/ barbecho químico/ cultivos invernales. El suelo utilizado fue un Argiudol típico, sin limitaciones de profundidad y cuyas características se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Características físicas y químicas del suelo utilizado en la experimentación.

Materia orgánica	pH	Fósforo Bray I (0-20)	Nitratros (0-20cm)	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural
(%)		ppm	ppm		%		
4,8	5,9	39,6	7,6	44,2	34,9	20,9	Franco

Los ensayos fueron realizados en siembra directa, empleando una rotación de soja y cultivos invernales, abarcando el período desde julio de 2014 a diciembre de 2015. En el primer ensayo se definieron tres (3) momentos de aplicación de herbicidas, barbecho químico largo (BQL), barbecho químico corto (BQC) y postemergencia del cultivo (POE). Durante el BQL se empleó Metsulfuron, en el BQC se empleó Diclosulam o Clorimuron y en POE se utilizó Imazetapir o Clorimuron. El 5 de diciembre de 2014 se sembró el cultivo de soja, utilizando un diseño en bloques completos y aleatorizados con cuatro repeticiones. Las parcelas presentaban una superficie de 25 m² (2,5 m x 10 m). Se caracterizó la cobertura de malezas en cada bloque (bloque 1: 39% de cobertura, bloque 2: 33%, bloque 3: 32% y bloque 4: 40%) y se identificaron las especies más relevantes, que fueron *Stellaria media* (70% de la cobertura), *Lolium multiflorum* (20% de la cobertura), *Conyza sumatrensis* (4 % de la cobertura), *Poa annua* (3 % de la cobertura), *Cirsium vulgare*, *Carduus acanthoides*, *Sonchus oleraceus* y *Gamochaeta spicata*. Se aplicaron ocho (8) tratamientos utilizando herbicidas inhibidores de la acetolactato sintetasa (ALS) y adicionalmente se contó con un tratamiento testigo sin aplicación de estos herbicidas (Tabla 4), el cual

fue mantenido libre de malezas con cuatro aplicaciones de 1080 g ia ha⁻¹ glifosato a lo largo del tiempo. Esta secuencia testigo fue clave a fin de realizar comparaciones (Mueller y Senseman, 2015).

Tabla 4: Secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS, momentos de aplicación y número de herbicidas aplicados en la fase barbecho químico/soja.

Secuencia Herbicida	Momento de aplicación			N° Herbicidas Inhibidores de la ALS
	BQ largo ^a	BQ corto ^b	Postemergencia ^c	
1				0
2	Metsulfuron ¹			1
3	Metsulfuron ¹		Clorimuron ²	2
4	Metsulfuron ¹		Imazetapir ⁴	2
5	Metsulfuron ¹	Diclosulam ³		2
6	Metsulfuron ¹	Diclosulam ³	Imazetapir ⁴	3
7	Metsulfuron ¹	Clorimuron ²	Imazetapir ⁴	3
8	Metsulfuron ¹	Clorimuron ²	Clorimuron ²	3
9	Metsulfuron ¹	Diclosulam ³	Clorimuron ²	3

¹Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹; ²Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹; ³Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹; ⁴Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹; ^aBarbecho químico largo, aplicado el 17 de julio de 2014; ^bBarbecho químico corto, aplicado el 17 de octubre de 2014; ^cAplicación realizada el 29 de diciembre de 2014.

Durante el ensayo de soja, también se delimitaron dos (2) parcelas adicionales en cada bloque para constituir el total de tratamientos evaluados posteriormente en los cultivos invernales esas parcelas adicionales se consideraron en el análisis estadístico para soja, como repeticiones de la secuencia testigo y de la secuencia Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir).

A continuación del cultivo de soja, se realizó el segundo ensayo de campo sobre el mismo lote con los cultivos invernales, trigo y cebada, durante la campaña 2015 utilizando un diseño en bloques divididos con cuatro (4) repeticiones. Después de la cosecha de soja, el día 5/6/2015 se realizó una aplicación de glifosato (1080 g ea ha⁻¹) en todo el ensayo para controlar malezas y el día de la aplicación del barbecho invernal (4/7/2015) también se aplicó Glifosato en la secuencia testigo (1080 g ea ha⁻¹). En cada bloque las parcelas delimitadas en el ensayo del año anterior tenían

asignadas las secuencias herbicidas y ocuparon una superficie de 25 m² (2,5 m x 10 m).

Para constituir el segundo ensayo los boques fueron divididos en dos franjas o sectores, en cada uno de los cuales se sembró trigo o cebada, de tal forma que estos sectores atravesaron perpendicularmente a las parcelas con las secuencias herbicidas.

La siembra fue realizada el día 16/7/2015. Cada franja de cultivo cubrió entonces una superficie de 137,5 m². Se realizaron dos aplicaciones más de herbicidas, utilizando la mezcla comercial Clorsulfuron+Metsulfuron (Clors+Met) en el barbecho químico invernal (BQ Invernal) y Metsulfuron en POE de trigo y cebada. Las secuencias herbicidas resultantes se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5: Secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS, momentos de aplicación y número de herbicidas aplicados durante la fase completa barbecho químico/soja/barbecho químico/cultivos invernales.

Secuencia Herbicida	Momentos de aplicación					N° de Herbicidas inhibidores de ALS
	BQL ^a	BQC ^b	POE soja ^c	BQ Invernal ^d	POE ^e	
1						0
2					Met ⁶	1
3	Met ¹				Met ⁶	2
4	Met ¹		Imazetapir ⁴		Met ⁶	3
5	Met ¹		Clorimuron ²		Met ⁶	3
6	Met ¹	Diclosulam ³			Met ⁶	3
7	Met ¹	Diclosulam ³	Imazetapir ⁴		Met ⁶	4
8	Met ¹	Clorimuron ²	Imazetapir ⁴		Met ⁶	4
9	Met ¹	Clorimuron ²	Clorimuron ²		Met ⁶	4
10	Met ¹	Diclosulam ³	Imazetapir ⁴	Clors+Met ⁵	Met ⁶	5
11	Met ¹	Diclosulam ³	Clorimuron ²	Clors+Met ⁵	Met ⁶	5

¹Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹; ²Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹; ³Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹; ⁴Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹; ⁵Finesse: mezcla comercial de Clorsulfuron+ Metsulfuron (13 + 2,4 g ia ha⁻¹); ⁶Metsulfuron aplicado en postemergencia de cultivos invernales (4,02 g ia ha⁻¹); ^aBarbecho químico largo, aplicado el 17 de julio de 2014; ^bBarbecho químico corto, aplicado el 17 de octubre de 2014; ^cAplicación realizada en postemergencia de soja, el 29 de diciembre de 2014; ^dAplicación realizada en el barbecho químico invernal, el 4 de julio de 2015; ^eAplicación realizada en postemergencia de trigo y cebada, el 2 de septiembre de 2015.

Ambos ensayos fueron mantenidos libres de malezas para poder determinar el efecto simple de las secuencias herbicidas sobre el daño y rendimiento del cultivo (Hagood *et al.*, 1980; Kapusta *et al.*, 1986; Edwards y Purcell, 2005). Para aplicar los tratamientos herbicidas a campo se utilizó un equipo pulverizador de mochila manual de presión constante (40 lb/pulg²) a base de CO₂, provisto de pastillas ADI ISO 11001 que arrojó un volumen de 128 L/ha. Todos los herbicidas inhibidores de la ALS fueron aplicados en mezcla con glifosato (este último en dosis de 1080 g ea ha⁻¹) durante las fases BQL, BQC, POE de soja y BQ Invernal. En los cultivos invernales el control de malezas en la secuencia testigo se realizó en postemergencia con una mezcla de Dicamba y 2,4 D éster (86 g ia ha⁻¹ y 250 g ia ha⁻¹).

Cada secuencia difirió en la intensidad de uso de herbicidas inhibidores de la ALS, variando desde cero (0) a tres (3) en el cultivo de soja y de cero (0) a cinco (5) en los cultivos invernales. Todos los herbicidas se emplearon en dosis y momentos recomendados, y adicionalmente se respetaron los tiempos de restricción para los

cultivos y las dosis máximas anuales por hectárea de cada activo herbicida (CASAFE, 2015-2017).

Los cultivares utilizados en ambos ensayos son de amplia difusión en la región sudeste de Buenos Aires y su manejo se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6. Manejo de los cultivos utilizados en la experimentación.

Cultivo	Cultivar	Siembra	Densidad	Fertilización
			pl m ⁻²	Kg ha ⁻¹
Soja	Don Mario 3810	5/12/2014	40	90 ¹
Cebada	Andreia	16/7/2015	250	90 ¹ +150 ²
Trigo	Baguette 601	16/7/2015	320	90 ¹ +150 ²

¹ Fosfato diamónico aplicado a la siembra; ² Urea aplicada al voleo y en macollaje

Los datos meteorológicos (temperatura máxima y mínima, radiación solar y precipitaciones) de la campaña 2014-2015 y de la serie 1985-2013 fueron obtenidos de los registros de la Estación Meteorológica de INTA Balcarce. Los cultivos fueron monitoreados periódicamente a fin de mantenerlos libres de plagas y enfermedades.

3.2 Muestreos y determinaciones

3.2.1 Cultivo de soja

Se realizaron tres muestreos de biomasa para caracterizar la evolución del peso seco del cultivo en los estadios fenológicos V4, R2 y R6 según la escala de Fehr y Caviness (1977). Las muestras fueron tomadas de los surcos centrales de cada parcela, dejando 30 cm de distancia entre muestreos sucesivos. Todos los cortes de biomasa se realizaron al ras del suelo con una tijera de podar, abarcando una superficie de 0,5 m². Posteriormente las muestras fueron secadas, al menos, durante 48 horas en estufa a 60°C para alcanzar su peso seco constante y pesadas, posteriormente, en una balanza analítica.

En pos-madurez del cultivo se efectuó la cosecha en forma manual de una superficie de 2 m². Posteriormente las muestras fueron trilladas con una máquina estacionaria. Luego de la trilla los granos fueron venteados y pesados para conocer el

rendimiento de cada parcela. La humedad de los granos fue determinada con un humidímetro digital. El rendimiento del cultivo de soja se expresó de acuerdo a las características comerciales del cultivo para Argentina, expresando su valor en rendimiento húmedo al 13,5% de humedad según lo establecido por las normas de comercialización.

Para determinar el peso de granos, se tomó una submuestra de cada parcela, se determinó la humedad y posteriormente se contabilizaron 800 granos por muestra. El número de granos por metro cuadrado (NG) se determinó realizando el cociente entre el rendimiento (gr m^{-2}) y el peso de mil granos (mg) (Board, 2000).

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC, $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) fue caracterizada durante el período reproductivo R2-R6 y se determinó como el cociente entre la diferencia en la producción de biomasa en esos estadios fenológicos y el intervalo en días entre muestreos (Board, 2000).

La proporción de radiación interceptada por el cultivo se obtuvo a través de mediciones con un ceptómetro lineal (Cava-Devices, Buenos Aires, Argentina) cuya longitud fue múltiplo del entresurco. En seis (6) momentos durante el ciclo del cultivo (28, 34, 61, 73, 82 y 105 días después de la emergencia) se midió la radiación que atravesó al cultivo (I') e inmediatamente la incidente por encima del mismo (I_0) alrededor del mediodía (entre las 11:00 a.m y las 13:30 p.m) y en días sin nubes. Se realizaron cinco (5) mediciones por parcela, en cada momento, atravesando los surcos en forma perpendicular. Para cada medición la proporción de radiación interceptada por el cultivo se calculó como: $1 - (I' / I_0)$. La fracción interceptada en los días restantes se estimó interpolando linealmente a través del tiempo calendario entre mediciones sucesivas. La radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) por el cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) se calculó como el producto entre la radiación interceptada por el cultivo y la RFA incidente de cada día para el período analizado ($\text{RFAi} = 0,48 \times \text{Radiación total}$) (Abbate *et al.*, 1995; Andrade, 1995). La RFAi acumulada se calculó por sumatoria de la RFAi diaria. La eficiencia de uso de la radiación (EUR) interceptada (g MJ^{-1}) para cada tratamiento se calculó como el cociente entre la TCC y la RFAi media durante un mismo período.

Se determinó la altura de las plantas de cada unidad experimental, en los estadios fenológicos V2, R2 y R7. Para ello se tomaron 8 plantas al azar de cada parcela y se

midió la altura desde la base al último trifolio y/o vaina desarrollada según correspondiese el estadio (Bleiholder, 1996).

Se realizó la evaluación de fitotoxicidad utilizando la escala visual propuesta por la Southern Weed Science Society (SWSS) (Truelove, 1977) a los 7, 14, 21 y 28 días después de la aplicación (DDA) de herbicidas en postemergencia del cultivo.

3.2.2 Cultivos invernales

Se realizó la evaluación de fitotoxicidad utilizando la escala visual propuesta por la SWSS (Truelove, 1977) a los 71 y 83 días después de la siembra (DDS).

Se realizaron dos muestreos de biomasa para caracterizar el peso seco total de los cultivos invernales en el período crítico para la definición del rendimiento. En cada muestreo se determinó el estadio fenológico del cultivo según la escala de Zadoks *et al.* (1974). En cebada los muestreos de biomasa fueron realizados a los 95 DDS y a los 118 DDS. Por su parte en trigo, el primer muestreo se realizó a los 104 DDS y el segundo muestreo a los 125 DDS. Fenológicamente en el primer muestreo de biomasa, las secuencias testigos se encontraban en Zadoks 33 en ambos cultivos y en el segundo muestreo en antesis en trigo y completada la espigazón en cebada. Las muestras fueron tomadas de los surcos centrales de las parcelas. Todos los cortes se realizaron al ras del suelo, sobre un total de 5 surcos (abarcando una superficie de 0,5 m²). En todos los muestreos, cada muestra fue pesada para obtener el peso fresco total y luego se tomaron dos alícuotas. Con la primera alícuota se determinó el porcentaje de humedad de la muestra cosechada. Con la segunda alícuota, se caracterizó el largo de la espiga después de extraer al azar quince (15) tallos con espigas y fraccionar su inflorescencia. El secado de las muestras se realizó en estufa a 60 °C durante, al menos, 48 hs para alcanzar el peso constante.

Para la determinación del rendimiento de los cultivos, en pos-madurez se cosechó en forma manual 1 m² de cada parcela. Posteriormente las espigas fueron trilladas con una máquina estacionaria. Los granos fueron venteados y posteriormente pesados. Se determinó la humedad de cada parcela con el humidímetro digital y el peso fue corregido al 14% de humedad.

Para determinar el peso de mil granos, la TCC y la EUR se siguió la misma metodología que en el cultivo de soja. La RFAi se determinó igual que en soja, pero abarcando el período crítico de ambos cultivos, con cuatro (4) momentos de medición

de intercepción ubicados durante el período entre muestreos de biomasa. La altura de ambos cultivos fue medida en cada muestreo sobre un total de cuarenta (40) plantas por parcela. Se midió con un metro desde la base hasta la lígula de la última hoja desarrollada en el primer muestreo y hasta el raquis de la espiga en el segundo muestreo.

El NG se determinó como la relación entre el rendimiento y el peso de grano. Para determinar el número de granos por espiga (NGESP), se tomó una muestra de 20 espigas por parcela en pos-madurez. Las espigas fueron trilladas con una máquina estacionaria y posteriormente se contabilizaron los granos. El número de espigas m^{-2} (NESP) se estimó como la relación entre el NG y el NGESP.

3.2.3 Bioensayo

Para la realización del bioensayo en cámara de crecimiento (BIOCC) se obtuvieron muestras de suelo del mismo lugar en que se realizó la experimentación de campo. Se colectó de cada parcela, una muestra de suelo de 0-20 cm de profundidad tomada con un muestreador de suelos de campo, seis (6) días antes de la siembra de trigo y cebada. Hasta ese momento, las secuencias herbicidas habían recibido las aplicaciones de BQL, BQC, POE de soja y BQ invernada, con lo cual, las muestras de suelo representaron la residualidad de cada secuencia hasta la siembra de los cultivos invernada.

Las muestras fueron realizadas el 10/7/2015 y llevadas a freezer (-18 °C) para su conservación (este acondicionamiento evitó la degradación de los herbicidas luego de su extracción) hasta la realización del bioensayo.

En abril de 2016, las muestras fueron descongeladas el día previo a la siembra del bioensayo. El día 15/4/2016 cada muestra de suelo fue tamizada (tamiz de 0,5 cm x 0,5 cm) y distribuida en 4 vasos de plástico de 330 cm^3 de capacidad por parcela. Posteriormente, 2 vasos de plástico fueron sembrados con 8 semillas de trigo cada uno y los otros dos, con 8 semillas de cebada cada uno. A continuación, los vasos de plástico fueron colocados en una cámara de crecimiento con condiciones controladas de temperatura (21°C de noche y 24 °C de día) y luz (14 horas de luz). Una vez emergidas las plantas de cada cultivo se realizó el raleo, dejando tres (3) plantas por vaso de plástico. La humedad fue mantenida con riegos diarios en forma manual.

El diseño experimental utilizado fue en bloques divididos con 4 repeticiones. Se emplearon los mismos cultivares de trigo y cebada que en el ensayo de campo.

Cuando los cultivos alcanzaron el estado de desarrollo de dos hojas, se realizaron las evaluaciones. La altura de cada planta fue medida desde la base hasta la inserción de la segunda hoja desarrollada (lígula visible en la segunda hoja) y posteriormente se cortaron al ras del suelo y se llevaron a secar a estufa a 60°C durante 48 hs. Posteriormente se cuantificó el peso seco de cada muestra. Al día siguiente se determinó la presencia de síntomas en raíces (engrosamiento y/o acortamiento radicular). Para ello se humedecieron los vasos de plásticos que contenían tierra y se lavó con abundante agua hasta obtener cada raíz en forma individual. Las raíces fueron colocadas en papel absorbente. Los síntomas fitotóxicos en las raíces (engrosamientos y necrosis), fueron testeados en todas las secuencias herbicidas y en ambos cultivos. En cebada se determinó la longitud radicular, mientras que en trigo no fue posible realizar la determinación porque resultó muy dificultosa la separación de las raíces.

3.3 Análisis estadísticos

Para comparar las medias de los tratamientos se utilizó el método de mínima diferencia significativa (MDS), solo cuando la prueba F del análisis de la varianza dio diferencia significativa. También se realizaron análisis de regresión entre variables. Con los datos del bioensayo se realizaron correlaciones con las variables de campo. En todas las pruebas estadísticas se utilizó un nivel de significancia del 5 % realizando los análisis con el programa estadístico R (R Core Team, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Condiciones climáticas durante la experimentación

El período de barbecho, previo a la siembra de soja, se caracterizó por abundantes precipitaciones. Este tiempo abarcó los meses desde julio hasta la primera década de diciembre. En dicho período, en el 60% de las décadas, las precipitaciones ocurridas en el año de experimentación fueron superiores respecto de la mediana de precipitación histórica para cada década (serie 1985-2013, Figura 1). Las precipitaciones acumuladas (mm totales) en la campaña 2014-2015 también fueron muy superiores en dicho período (499 mm vs 281 mm).

En cambio, durante el ciclo del cultivo de soja, desde diciembre hasta abril, para el 73 % de las décadas, los registros de precipitaciones durante la campaña fueron inferiores comparados con la mediana histórica de precipitación para cada década (Figura 1). Los milímetros acumulados durante el ciclo del cultivo, fueron un 12 % inferior a la mediana de precipitación histórica para ese período. Durante diciembre, enero y marzo se registraron menores precipitaciones durante la campaña en comparación con los registros históricos (Tabla 7 y 8).

La escasez de precipitaciones durante el ciclo del cultivo de soja, junto con una evapotranspiración por encima de la media histórica (Figura 1), hicieron que el cultivo se presentara ante situaciones de déficit hídrico durante casi toda la campaña.

Por otro lado, el ciclo de crecimiento de trigo y cebada no presentó déficits de agua importantes como para limitar el crecimiento, presentando abundantes precipitaciones al inicio del ciclo y durante el período crítico de definición de rendimiento de ambos cultivos (Figura 2).

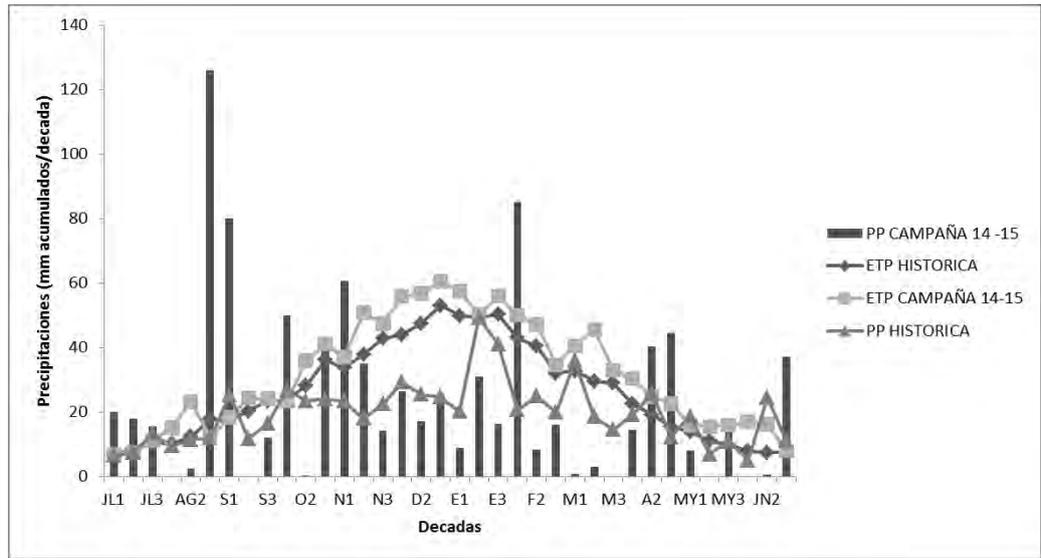


Figura 1. Promedios decádicos de precipitaciones y de evapotranspiración potencial (ETP) durante la fase experimental julio 2014 - junio 2015, y sus respectivos valores históricos para la serie 1985-2013 calculados a partir de los datos de la Estación Meteorológica de la EEA INTA Balcarce.

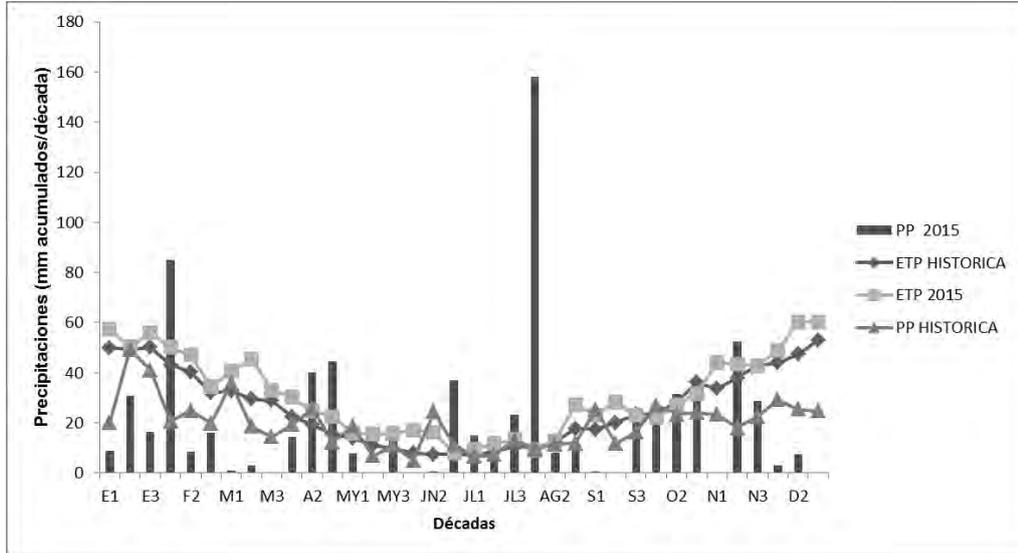


Figura 2. Promedios decádicos de precipitaciones y de evapotranspiración potencial (ETP) durante la fase experimental enero 2015 - diciembre 2015, y sus respectivos valores históricos para la serie 1985-2013 calculados a partir de los datos de la Estación Meteorológica de la EEA INTA Balcarce.

Las temperaturas máximas, mínimas y medias durante las fases experimentales de barbecho previo a soja, cultivo de soja y barbecho invernal fueron superiores a los valores históricos medios de cada variable (Figura 3, Figura 4, Tabla 7 y 8). No

obstante durante el crecimiento de trigo y cebada los registros de temperaturas fueron similares a los registros históricos (Figura 4, Tabla 7 y 8).

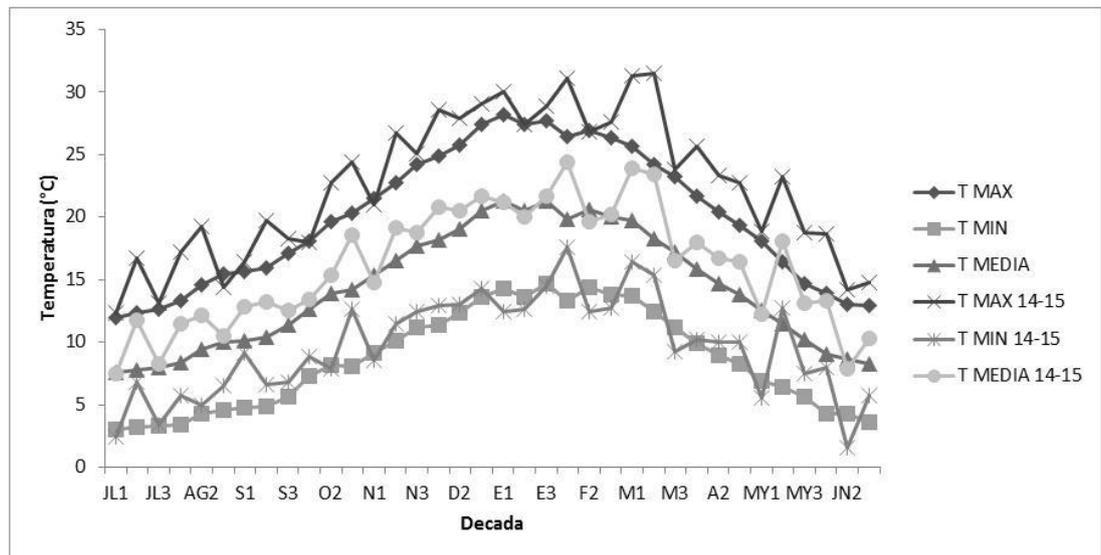


Figura 3. Promedios decádicos de temperatura máxima, mínima y media del aire en abrigo meteorológico durante la fase experimental julio 2014 – junio 2015 y sus respectivos valores históricos (serie 1985-2013).

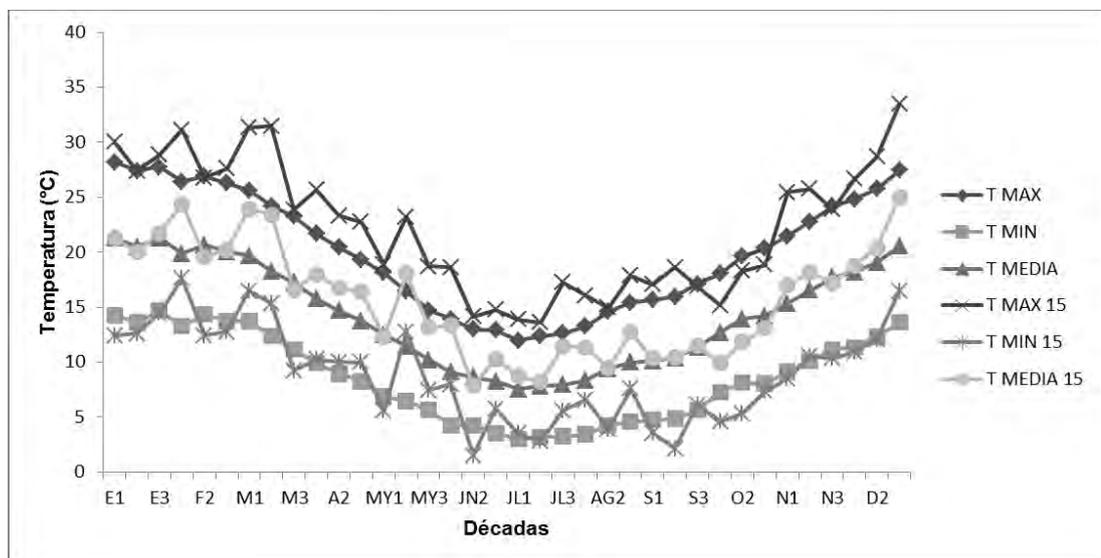


Figura 4. Promedios decádicos de temperatura máxima, mínima y media del aire en abrigo meteorológico durante la fase experimental enero 2015 – diciembre 2015 y sus respectivos valores históricos (serie 1985-2013).

Tabla 7. Condiciones meteorológicas mensuales, temperatura, precipitaciones, evapotranspiración y déficit de agua (DA) de la serie histórica 1985-2013.

Mes	Temperatura (°C)			Precipitaciones mm	Evapotranspiración mm	DA ^a mm
	Max	Min	Media			
Julio	12,3	3,2	7,8	27	26	1
Agosto	14,4	4,1	9,2	32,9	40,4	-7,6
Septiembre	16,2	5,1	10,6	53,5	61	-7,6
Octubre	19,3	7,8	13,6	74,5	88	-13,6
Noviembre	22,8	10,2	16,5	63,8	114,4	-50,6
Diciembre	26,0	12,4	19,3	79,3	144,5	-65,2
Enero	27,8	14,2	21,0	110,3	149,6	-39,3
Febrero	26,6	13,8	20,2	65,4	115,5	-50,1
Marzo	24,4	12,4	18,4	68,9	91,3	-22,4
Abril	20,5	9,0	14,8	57,2	57,2	-0,1
Mayo	16,4	6,3	11,4	36,4	34,8	1,6
Junio	13,3	4,0	8,7	40,7	22,8	17,9

^a Déficit de agua= Precipitaciones-Evapotranspiración

Tabla 8. Condiciones meteorológicas mensuales, temperatura, precipitaciones, evapotranspiración y déficit de agua (DA) durante la fase experimental completa 2014-2015.

Mes	Temperatura (°C)			Precipitaciones mm	Evapotranspiración mm	DA ^a mm
	Max	Min	Media			
Julio ¹	14,1	4,2	9,2	53,4	25,4	28
Agosto ¹	17,0	5,7	11,4	128,3	50,5	77,8
Septiembre ¹	18,2	7,5	12,9	92	66,8	25,2
Octubre ¹	21,7	9,8	15,8	89,3	100,2	-10,9
Noviembre ¹	24,3	10,8	17,6	109,5	135,2	-25,7
Diciembre ¹	28,5	13,4	21,0	69	173,1	-104,1
Enero ²	28,8	13,2	21,0	56	163,7	-107,7
Febrero ²	28,5	14,3	21,4	109,4	131,7	-22,3
Marzo ²	28,9	13,7	21,3	3,9	119,1	-115,2
Abril ²	23,9	10,1	17,0	99,1	77,7	21,4
Mayo ²	20,3	8,6	14,5	24,5	47,4	-22,9
Junio ²	15,9	5,1	10,5	37,5	41,4	-3,9
Jullio ²	14,9	4,0	9,5	49,8	34,6	15,2
Agosto ²	16,3	6,0	11,2	175,5	49,3	126,2
Septiembre ²	17,5	3,9	10,8	23,3	74,7	-51,4
Octubre ²	17,4	5,7	11,6	86,2	81,2	5,0
Noviembre ²	25,0	9,8	17,4	81,3	130,3	-49
Diciembre ²	29,6	13,2	21,4	10,5	169,5	-159,0

^a Déficit de agua= Precipitaciones-Evapotranspiración; ¹ Año 2014; ² Año 2015

Durante la etapa que abarcó el barbecho químico previo a soja y sus primeros estadios de desarrollo (meses desde julio a diciembre), el déficit de agua acumulado durante la campaña 2014-2015 fue menor comparado con el déficit acumulado

histórico (-9,7 mm vs -143,6 mm; Tablas 7 y 8). Estas mejores condiciones de humedad en el año experimental pudieron incidir fuertemente en la disipación de los herbicidas aplicados durante la fase de barbecho, y principalmente, sobre Metsulfuron que es un herbicida no selectivo para el cultivo.

En cambio, durante el ciclo de soja y el barbecho previo a la siembra de cultivos invernales, que comprendió los meses de diciembre a junio, el déficit acumulado durante la campaña fue muy superior al déficit acumulado histórico (-354,7 mm vs -157,6 mm; Tablas 7 y 8). Los déficits de agua más importantes se registraron durante los meses de diciembre, enero y marzo. En diciembre, después de la emergencia del cultivo, ocurrió un único evento de precipitación relevante (19 mm), mientras que los restantes mm de precipitación correspondieron a eventos de menor milimetraje. Por su parte el mes de enero fue muy seco y únicamente existió una precipitación importante el día 20 (25,4 mm). En el mes de febrero, la principal precipitación aportó 85 mm en la primera década y luego se desencadenó nuevamente una fuerte sequía que finalizó en el mes de abril (44 días sin precipitaciones de relevancia). Las condiciones de temperatura y humedad ocurridas durante esta fase fueron predisponentes para la ocurrencia de residualidad sobre los cultivos invernales. Johnson *et al.* (2005) concluyeron que bajo condiciones de sequía y en suelos con baja MO, las aplicaciones en secuencia de herbicidas inhibidores de la ALS causaron la acumulación de residuos en el suelo en cortos períodos de tiempo. Ello podría explicarse porque las principales variables climáticas que influyen en la degradación de los herbicidas en el suelo son la humedad, la temperatura y la luz solar (Bedmar y Gianelli, 2014). Las bajas temperaturas y bajas precipitaciones tienen un importante impacto en la degradación microbiana de un amplio grupo de herbicidas, como las triazolpirimidinas, las imidazolinonas y las sulfonilureas (Shaner, 2014). Durante el ciclo del cultivo de soja, las temperaturas medias en los meses de diciembre a marzo, fueron levemente superiores a los 20 °C, condición que favoreció posiblemente la temperatura de suelo, la cual pudo ser favorable para la actividad microbiana. Sin embargo, dicho período se conjugó con un fuerte déficit hídrico (Tabla 8) que posiblemente detuvo o redujo las tasas de degradación de herbicidas de los grupos químicos de las imidazolinonas y triazolpirimidinas, principalmente. Según Anderson (1981), condiciones de sequía reducen la actividad microbiana y la supervivencia, así como, la cantidad de herbicida presente en la solución del suelo. Por ejemplo Goetz *et al.* (1990) determinaron una mayor persistencia de Imazetapir en un año seco respecto de un año húmedo. Adicionalmente, las temperaturas de suelo por debajo de los 15 °C reducen el

metabolismo de los microorganismos, disminuyendo su capacidad de degradar los sustratos herbicidas, mientras que, temperaturas entre 20 y 30°C resultan óptimas (Sikkema y Robinson, 2005). Asimismo, las menores temperaturas de ambiente en los meses de abril a junio del año 2015, posiblemente se relacionaron con menores temperaturas de suelo que las ideales para el metabolismo microbiano.

Maurice (2005) sugiere que las condiciones de sequía aumentan el riesgo de fitotoxicidad sobre cultivos en rotación, determinando una fuerte correlación entre el total de precipitaciones acumuladas, en el período posterior a la aplicación de los herbicidas de acción residual y los daños fitotóxicos sobre cultivos sensibles. Esto se debe a que durante ese lapso de tiempo ocurre la disipación de los mismos. En esta experiencia desde la aplicación hasta la siembra de los cultivos invernales se acumularon 865,2 mm para Metsulfuron (aplicado en BQL); 579 mm para Clorimuron y Diclosulam (aplicados en BQC); 355,5 mm para Clorimuron e Imazetapir (aplicados en POE de soja) y 11,5 mm para Clorsulfuron+Metsulfuron (aplicado en BQ invernacional). Sin embargo, la humedad es un factor más que debe ser considerado para determinar el riesgo de residualidad y acumulación de estos herbicidas. La información debe complementarse con datos de temperatura, pH, MO, textura, y factores de manejo productivo.

4.2. Efectos en el crecimiento y rendimiento del cultivo de soja

4.2.1 Fitotoxicidad sobre el cultivo de soja

Se determinó efecto diferencial de fitotoxicidad entre las secuencias herbicidas sobre el cultivo de soja ($p < 0,05$) a los 7, 14, 21 y 28 días después de la aplicación (DDA) de postemergencia (POE) (Tabla 9). La respuesta del cultivo fue diferente según la secuencia herbicida considerada.

La secuencia que incluyó Metsulfuron no se diferenció del testigo ya que no causó efectos fitotóxicos sobre soja (secuencia 1 vs secuencia 2, Tabla 9). Al analizar las secuencias que acumularon dos (2) herbicidas se detectó que la aplicación adicional de Diclosulam o Clorimuron sobre Metsulfuron (secuencia 4 vs secuencia 2; secuencia 5 vs secuencia 2) tampoco resultó fitotóxica (Tabla 9). Sin embargo, la aplicación adicional de Imazetapir sobre Metsulfuron (secuencia 3 vs secuencia 2) causó daños sobre el cultivo (Tabla 9). La fitotoxicidad se manifestó a través de una clorosis foliar y

en algunos casos con necrosis de nervaduras en el envés de las hojas, síntomas típicos del daño por Imazetapir (Johnson *et al.*, 2002).

Una respuesta similar se observó sobre soja en las secuencias que acumularon tres (3) herbicidas. La aplicación adicional de Imazetapir en postemergencia sobre Metsulfuron/Diclosulam (secuencia 6 vs secuencia 5) o sobre Metsulfuron/Clorimuron (secuencia 7) causó fitotoxicidad en todos los momentos de evaluación. No obstante, se determinó una respuesta diferente al aplicar Clorimuron en postemergencia, el cual no resultó fitotóxico independientemente del antecesor herbicida (secuencia 4 vs secuencia 2; secuencia 9 vs secuencia 5; secuencia 8) (Tabla 9). La respuesta del cultivo por aplicaciones de Clorimuron en postemergencia es diferente a la determinada por Askew *et al.* (1999), ya que estos observaron daños fitotóxicos (10-16%) en el cultivo en función del herbicida aplicado previamente (Trifluralina, Trifluralina/Flumetsulam, Trifluralina/Clorimuron/Metribusín, Trifluralina/Imazaquin).

Todas las secuencias que resultaron fitotóxicas incluyeron la aplicación de Imazetapir y manifestaron una evolución de los efectos fitotóxicos similar, independientemente de la cantidad final de herbicidas aplicados (secuencias 3, 6 y 7; Tabla 9). La fitotoxicidad alcanzó un valor medio de 22,9 % a los 7 DDA y disminuyó a 5,4 % a los 28 DDA. Valores de fitotoxicidad levemente más altos, que los determinados en este estudio, fueron reportados por Simpson y Stoller (1996) con aplicaciones de Imazetapir en postemergencia. Por su parte Kapusta *et al.* (1986) trabajando con Imazetapir y Corrigan y Harvey (2000) empleando Glifosato+Imazetapir, determinaron una tendencia similar de dilución de los daños fitotóxicos sobre el cultivo, con aplicaciones en postemergencia, en la medida que trascurrieron los días después de la aplicación. En otro estudio Buhler y Proost (1992) determinaron que los daños fitotóxicos por Imazetapir, en el cultivo de soja, desaparecieron a los treinta y cinco (35) DDA.

De los herbicidas aplicados en POE de soja, se comprobó mayor fitotoxicidad en las secuencias que incluían Imazetapir respecto de las que incluían Clorimuron, al comparar sobre los mismos antecesores herbicidas (secuencia 7 vs secuencia 8; secuencia 6 vs secuencia 9, Tabla 9). Esa respuesta diferente podría explicarse porque, según Brown *et al.* (1990), Clorimuron es metabolizado rápidamente por el cultivo, con una vida media de 1 a 3 horas post aplicación. En cambio, Imazetapir es rápidamente absorbido por el cultivo en las primeras 3 a 6 horas y luego es traslocado

vía simplástica y apoplástica, para ser metabolizado en diferentes partes de la planta, con una vida media en hojas de 6,6 días (Cole *et al.*, 1989).

Wilcut *et al.* (1989) y Krausz *et al.* (1992) determinaron una respuesta similar, a la encontrada en este trabajo, con aplicaciones de Clorimuron en postemergencia de soja. Clorimuron es rápidamente absorbido por el cultivo, pudiendo alcanzar un 89 % de absorción en las primeras 72 horas post-aplicación, luego es traslocado vía simplástica y apoplástica y rápidamente metabolizado a formas inactivas (Wilcut *et al.*, 1989). Sin embargo, los resultados en esta experiencia difieren de los hallados por Vidrine *et al.* (2002) quienes determinaron valores de fitotoxicidad entre 6% y 30% en distintas localidades de Louisiana, con aplicaciones tempranas de postemergencia.

Tabla 9: Fitotoxicidad visual en el cultivo de soja a los 7, 14, 21, 28 días después de la aplicación de postemergencia.

Secuencia Herbicida	Fitotoxicidad visual (0-100%) ^a			
	7 DDA ^b	14 DDA ^b	21 DDA ^b	28 DDA ^b
1. Testigo	0	0	0	0
2. Metsulfuron ¹	0	0	0	0
3. Metsulfuron ¹ /Imazetapir ⁴	25	8,3	7,8	5,8
4. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵	0	0	0	0
5. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³	0	0	0	0
6. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Imazetapir ⁴	22,5	11,9	6	5,4
7. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ² /Imazetapir ⁴	21,3	9,5	5	5
8. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵	0	0	0	0
9. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Clorimuron ⁵	0	0	0	0
MDS ^c (5%)	5,8 ^d	3,3 ^d	2,1 ^d	1,3 ^d
MDS ^c (5%)	4,1 ^e	2,3 ^e	1,5 ^e	0,9 ^e
MDS ^c (5%)	5,0 ^f	2,9 ^f	1,8 ^f	1,2 ^f

¹Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico largo, el 17 de julio de 2014; ²Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico corto el 17 de octubre de 2014; ; ³Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico corto el 17 de octubre de 2014; ⁴Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ^a0=Sin síntomas, 100=Muerte; ^bDDA= días después de la aplicación; ^cMínima diferencia significativa; ^dpara comparar los tratamientos 2, 3, 4, 5, 7, 8 y 9 entre sí; ^epara comparar los tratamientos 1 y 6 entre sí; ^fpara comparar los tratamientos 1 ó 6 contra 2 ó 3 ó 4 ó 5 ó 7 ó 9.

No se comprobó un aumento de fitotoxicidad sobre el cultivo con mayor número de aplicaciones de herbicidas inhibidores de la ALS, debido a que algunas secuencias que acumularon hasta tres (3) herbicidas no se diferenciaron del testigo (secuencia 8 y 9 vs secuencia 1) ni de secuencias con menor cantidad de herbicidas (secuencia 8 vs secuencia 4; secuencia 9 vs secuencia 5). Asimismo las secuencias que manifestaron fitotoxicidad por la aplicación en postemergencia de Imazetapir, alcanzaron valores similares de daño, independientemente si eran precedidos por uno o dos herbicidas (secuencia 6 y 7 vs secuencia 3, Tabla 9), y una dilución fuerte de la fitotoxicidad con el transcurso de los días desde la aplicación. Es decir, independientemente de la secuencia herbicida aplicada durante el barbecho, se comprobó únicamente el efecto de fitotoxicidad de Imazetapir sobre el cultivo. Daños por aplicaciones de Imazetapir en postemergencia de soja también han sido reportados por Arregui *et al.* (2005).

4.2.2 Producción de materia seca del cultivo

La figura 5 muestra la evolución en la producción de materia seca del cultivo de soja hasta los 90 días después de la emergencia (DDE). Los patrones de acumulación de materia seca para todas las secuencias herbicidas fueron similares al registrado por la secuencia testigo (Figura 5). No se evidenciaron efectos negativos de residualidad y/o acumulación de residuos herbicidas sobre la producción de biomasa a los 39 DDE ($p > 0,05$), como así tampoco hasta los 60 DDE ($p > 0,05$) y los 90 DDE ($p > 0,05$), con una producción de materia seca media del testigo de 85,8; 195,8 y 429,7 g MS m⁻², respectivamente (Tabla 10). La ausencia de efectos negativos sobre la acumulación de biomasa de soja presume un crecimiento normal del cultivo.

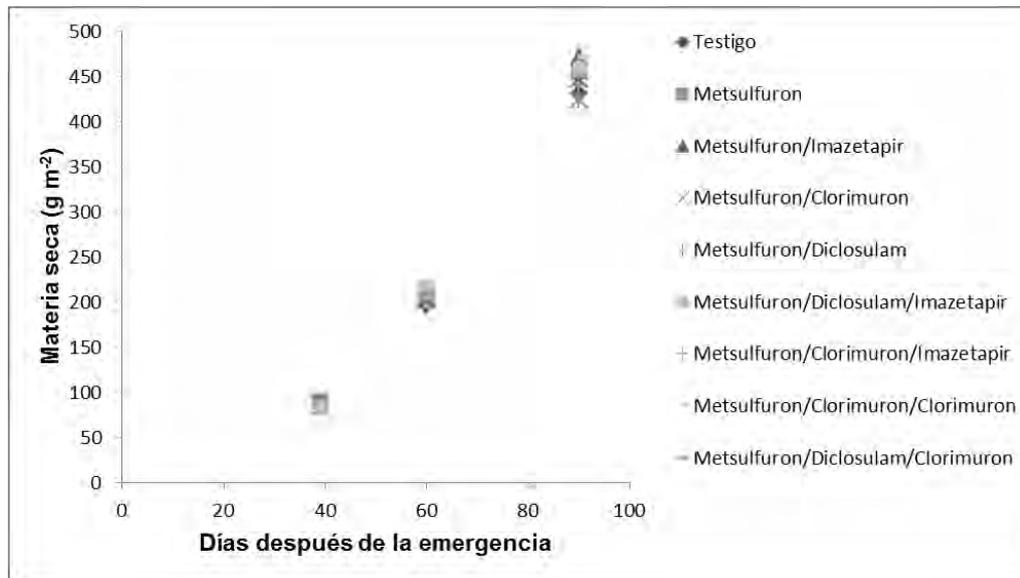


Figura 5. Materia seca acumulada del cultivo de soja en función de los días después de la emergencia para las ocho (8) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.

La fitotoxicidad (manifestada principalmente como clorosis en hojas) observada en las secuencias que incluyeron Imazetapir, no se correlacionó con disminuciones de la biomasa del cultivo de soja (Tabla 10) a los 39 DDE ($r = 0,04$; $p=0,81$), ni tampoco a los 60 ($r = 0,19$; $p = 0,21$) y 90 DDE ($r = 0,1$; $p=0,5$). A diferencia de este estudio, Nelson y Renner (1998) observaron daños fitotóxicos en soja que causaron leves disminuciones de la biomasa del cultivo (10-16%), cuando trabajaron con imidazolinonas aplicadas en postemergencia. Los valores de biomasa acumulada hasta el estadio R2 (60 DDE) para las secuencias herbicidas están cercanos al valor propuesto por Board y Modali (2005) de 200 g m^{-2} , con el cual los cultivos alcanzan altos rendimientos.

Tabla 10. Fitotoxicidad (%) y materia seca del cultivo de soja a los 39, 60 y 90 días después de la emergencia para diferentes secuencias de herbicidas.

Secuencia Herbicida	Fitotoxicidad ^a	Biomasa (g MS m ⁻²)		
	7 DDA %	39 DDE ^b	60 DDE ^b	90 DDE ^b
1. Testigo	0	85,8	195,8	429,7
2. Metsulfuron ¹	0	88,5	203,5	455,6
3. Metsulfuron ¹ /Imazetapir ⁴	25	90,6	214,3	471,5
4. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵	0	83,3	202,3	446,1
5. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³	0	89,3	211,1	423,1
6. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Imazetapir ⁴	22,5	83,1	216,3	457,0
7. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ² /Imazetapir ⁴	21,3	85,3	207,8	439,5
8. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵	0	84,0	220,9	471,7
9. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Clorimuron ⁵	0	90,9	204,6	450,2
MDS ^c (5%)	-	NS ^d	NS ^d	NS ^d
√CME ^e	-	10,2	19,4	50,9

¹Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico largo, el 17 de julio de 2014; ²Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico corto el 17 de octubre de 2014; ; ³Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico corto el 17 de octubre de 2014; ⁴Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ^a0=Sin síntomas, 100=Muerte; ^bDDE= días después de la emergencia; ^cMínima diferencia significativa; ^dNo significativo; ^eError residual estándar.

Por otro lado, las secuencias herbicidas no afectaron la altura del cultivo en etapas avanzadas del ciclo de crecimiento. En la evaluación a los 24 DDE, coincidente con el estadio V2, se determinó una reducción de altura en las secuencias Metsulfuron/Imazetapir y Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir (secuencias 3 y 6) en relación a la secuencia testigo ($p < 0,05$). Sin embargo esas diferencias se diluyeron en las evaluaciones en los estadios de desarrollo R2 (60 DDE) y R7 (105 DDE) ($p > 0,05$; Tabla 11). La disminución de altura en evaluaciones cercanas a la aplicación (5 semanas después) y la posterior recuperación (19 semanas después de la aplicación), ha sido reportada previamente por Protsko *et al.* (1996) quienes utilizaron mezclas de sulfonilureas y aplicaciones en pre-siembra. Asimismo Krausz *et al.* (1992) trabajando con herbicidas inhibidores de la ALS tampoco determinaron efectos negativos sobre la altura final del cultivo, incluso, utilizando hasta dosis triples de Clorimuron o Imazetapir. La disminución de altura del cultivo por efectos fitotóxicos puede ser esperable cuando el cultivar manifiesta sensibilidad a los herbicidas (Swantek *et al.*,

1998; Al-Khatib y Peterson, 1999), por excesos de humedad luego de la aplicación, que aumenta la disponibilidad de herbicidas inhibidores de la ALS (Newson y Shaw, 1992) superando la capacidad de destoxificación de las plantas o por el uso de dosis por encima de las recomendadas (Krausz *et al.*, 1994). De forma similar a este estudio, Krausz y Young (2001) concluyeron que la altura del cultivo a madurez, no fue consistentemente influenciada por los daños fitotóxicos ocurridos en etapas tempranas.

Tabla 11. Fitotoxicidad (%) y altura del cultivo de soja en los estadios fenológicos V2, R2 y R7 en las ocho (8) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.

Secuencia Herbicida	Fitotoxicidad ^a (%)	Altura (cm)		
		7 DDA ^b	V2 ^c	R2 ^c
1. Testigo	0	8,2	48,8	68,5
2. Metsulfuron ¹	0	8,4	49,4	70,1
3. Metsulfuron ¹ /Imazetapir ⁴	25	7,8	45,9	62,3
4. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵	0	8,0	48,9	66,2
5. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³	0	8,2	49,8	70,8
6. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Imazetapir ⁴	22,5	7,7	49,8	69,5
7. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ² /Imazetapir ⁴	21,3	7,9	48,5	66,4
8. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵	0	8,2	48,5	64,8
9. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Clorimuron ⁵	0	7,9	49,8	66,0
MDS ^d (5%)	5,8 ^e	0,5 ^e	NS ^h	NS ^h
MDS ^d (5%)	4,1 ^f	0,3 ^f		
MDS ^d (5%)	5,0 ^g	0,4 ^g		
$\sqrt{\text{CME}}^i$			2,0	4,1

¹Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico largo, el 17 de julio de 2014; ²Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico corto el 17 de octubre de 2014; ; ³Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico corto el 17 de octubre de 2014; ⁴Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ^a0=Sin síntomas, 100=Muerte; ^bDDA= días después de la aplicación; ^cEstadios fenológicos de soja, según la escala de Fehr y Caviness (1977); ^dMínima diferencia significativa; ^epara comparar los tratamientos 2, 3, 4, 5, 7, 8 y 9 entre sí; ^fpara comparar los tratamientos 1 y 6 entre sí; ^gpara comparar los tratamientos 1 ó 6 contra 2 ó 3 ó 4 ó 5 ó 7 ó 9; ^hNo significativo; ⁱError residual estándar.

Estudios previos de tolerancia del cultivo de soja a aplicaciones de herbicidas han encontrado similares respuestas del cultivo. Haggod *et al.* (1980) y Weidenhamer *et al.* (1989) sugirieron que el cultivo de soja tiene la habilidad de recuperarse de los daños causados por herbicidas cuando estos suceden en estadios tempranos del crecimiento del cultivo.

4.2.3 Intercepción de radiación

La figura seis (6) muestra la intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) para el cultivo de soja en las ocho (8) secuencias herbicidas y el testigo, a través de la estación de crecimiento.

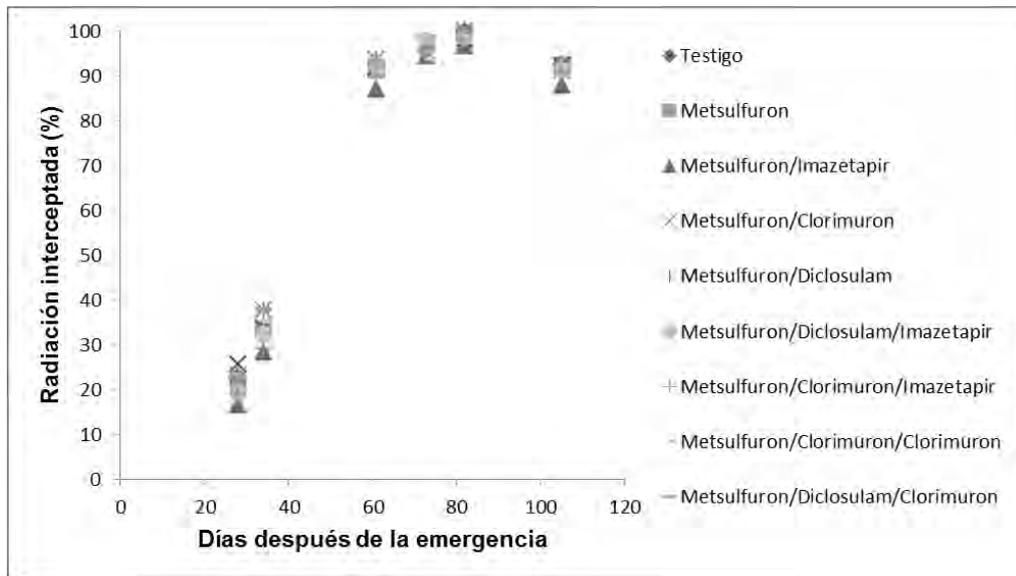


Figura 6. Radiación interceptada (RFA) por el cultivo de soja, expresada como % de la radiación incidente, en función de los días después de la emergencia para las ocho (8) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.

No se encontraron efectos negativos de las secuencias herbicidas sobre la radiación interceptada (RI) a los 28, 61, 73, 82 y 105 DDE ($p > 0,05$). Sin embargo a los 34 DDE, se determinó una leve reducción de la RI en la secuencia Metsulfuron/Imazetapir ($p < 0,05$). Esta diferencia se diluyó en las siguientes evaluaciones. Los valores más altos de RI se alcanzaron durante el período comprendido entre los 61 y 105 DDE. En las cuatro (4) evaluaciones de ese período, la RI fue superior al 91,1%. Los máximos valores de RI se dieron en las evaluaciones de los 73 y 82 DDE, con una intercepción media de 96 % y de 98,6 %, respectivamente. Board (2000) determinó un patrón de RI similar a este estudio con valores de intercepción superiores al 85% en el estadio R1 y superiores al 97% en el estadio R5.

4.2.4 Tasa de crecimiento del cultivo y eficiencia de conversión de la radiación interceptada

El crecimiento de los cultivos está estrechamente relacionado con su capacidad para interceptar radiación y convertirla en materia seca (Andrade, 1995). Estudios previos en Balcarce han demostrado que la biomasa producida por el cultivo de soja es función lineal de la RFAi acumulada durante todo el ciclo, llegando a interceptar 720

MJ m⁻² de RFA, creciendo sin limitaciones hídricas y nutricionales (Andrade *et al.*, 2000). A su vez, la tasa de crecimiento del cultivo (TCC, g MS m⁻² día⁻¹), durante el período crítico de rendimiento, comprendido entre los estadíos fenológicos R3 y R6 (Andrade *et al.*, 2000) tiene una estrecha asociación con el rendimiento. Estudios previos en el cultivo de soja han determinado que reducciones en la RFAi se relacionan con disminuciones en la TCC y con reducciones del rendimiento (Egli, 1988; Board y Tan, 1995).

En esta experimentación, el crecimiento del cultivo de soja desde los 39 hasta los 90 DDE evidenció una fuerte asociación entre la RFAi y la producción de biomasa (g m⁻²) ($r = 0,97$) para todas las secuencias herbicidas. Este tipo de respuesta lineal entre ambas variables ha sido previamente documentada en soja (Muchow *et al.*, 1993; Andrade, 1995; Edwards y Purcell, 2005).

Todas las secuencias herbicidas alcanzaron una intercepción de radiación igual o superior al 95% durante el período R2-R6, no encontrándose diferencias en la RFAi acumulada en dicho período respecto al testigo ($p > 0,05$, Tabla 12). En otros estudios Edwards y Purcell (2005) determinaron leves efectos negativos de fitotoxicidad sobre la RFAi acumulada por el cultivo por aplicaciones de herbicidas postemergentes en etapas iniciales, con reducciones entre el 2 y 5%. Sin embargo en el estudio mencionado, la situación de estrés hídrico del cultivo pudo haber incrementado el efecto negativo sobre la RFAi. Asimismo, las secuencias de aplicación de herbicidas inhibidores de la ALS tampoco afectaron la EUR ($p > 0,05$; Tabla 12).

Tabla 12. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC), radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFAi), eficiencia de uso de la radiación (EUR) durante el período de crecimiento R2-R6 y rendimiento en grano (13,5% de humedad) del cultivo de soja para las ocho (8) secuencias herbicidas y el testigo durante la campaña 2014-2015 en Balcarce.

Secuencia Herbicida	TCC	RFAi	EUR ^c	Rendimiento
	g m ⁻² día ⁻¹	MJ	g MJ ⁻¹	g m ⁻²
1. Testigo	7,8	259	0,91	217,0
2. Metsulfuron ¹	8,4	258	0,97	222,2
3. Metsulfuron ¹ /Imazetapir ⁴	8,6	250	1,03	202,1
4. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵	8,1	257	0,95	218,4
5. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³	8,4	261	0,81	217,4
6. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Imazetapir ⁴	8,7	259	0,93	208,6
7. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ² /Imazetapir ⁴	7,7	259	0,90	219,5
8. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵	8,4	254	0,99	214,8
9. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Clorimuron ⁵	8,2	257	0,96	209,2
Significancia (5%)	NS ^a	NS ^a	NS ^a	NS ^a
√CME ^b	1,4	5,7	0,2	26,1

¹Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico largo, el 17 de julio de 2014; ²Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico corto el 17 de octubre de 2014; ; ³Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico corto el 17 de octubre de 2014; ⁴Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ^aNo significativo; ^bError residual estándar; ^c Eficiencia de uso de la radiación: relación entre la diferencia de peso seco y la RFAi.

Los valores de RFAi a lo largo del ciclo del cultivo alcanzados en esta experimentación, son similares a los reportados por Rochette *et al.* (1995) y Giayetto *et al.* (2015). Johnson *et al.* (2002) y Edwards y Purcell (2005) observaron que, en ciertos casos, leves reducciones de la RFAi por efectos de fitotoxicidad no se relacionaron con disminuciones del rendimiento, ya que el cultivo puede compensar a través de un aumento del índice de cosecha. Por otro lado, valores de EUR similares a los determinados en este estudio han sido reportados por Rochette *et al.* (1995), Sinclair y Muchow (1999), Molino (2011) y Giayetto *et al.* (2015).

La TCC no fue afectada por ninguna secuencia de herbicidas inhibidores de la ALS ($p > 0,05$; Tabla 12), durante el período R2-R6. De forma similar a esta experiencia Adcock y Banks (1991) empleando herbicidas inhibidores de la ALS (Clorimuron) no

determinaron efectos negativos sobre la TCC de soja. Los valores de TCC de este estudio resultaron similares a los reportados Cox y Joliff (1986), y levemente inferiores a los citados por Egli y Zhen Wen (1991) y Pedersen y Lauer (2004).

4.2.5 Rendimiento del cultivo de soja

El rendimiento del cultivo de soja se expresó de acuerdo a las características comerciales del cultivo para Argentina, expresando su valor en rendimiento húmedo al 13,5% de humedad según lo establecido por las normas de comercialización. Normalmente, el rendimiento se asocia con variaciones en el número de granos por metro cuadrado, componente que se define durante la fase de floración y fructificación del cultivo (Egli, 1998). El segundo componente del rendimiento del cultivo, el peso de granos, tiene menor variabilidad (Sadras, 2007) y es altamente sensible a la disponibilidad de fotoasimilados en pos-floración (Borras *et al.*, 2004).

No se determinaron efectos negativos de las secuencias herbicidas sobre el rendimiento del cultivo ($p > 0,05$), ni sobre el NG y el PG ($p > 0,05$; Tabla 13).

Tabla 13. Rendimiento húmedo (13,5%), peso de grano (PG) y número de granos m⁻² (NG) del cultivo de soja para las ocho (8) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.

Secuencia Herbicida	Rendimiento	PG	NG
	g m ⁻²	mg	
1. Testigo	217,0	141,7	1534
2. Metsulfuron ¹	222,2	147,2	1513
3. Metsulfuron ¹ /Imazetapir ⁴	202,1	139,8	1465
4. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵	218,4	143,5	1521
5. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³	217,4	146,2	1493
6. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Imazetapir ⁴	208,6	142,1	1472
7. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ² /Imazetapir ⁴	219,5	145,6	1517
8. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵	214,8	143,4	1502
9. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Clorimuron ⁵	209,2	138,8	1528
Significancia (5%)	NS ^a	NS ^a	NS ^a
√CME ^b	26,1	10,9	214,9

¹Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico largo, el 17 de julio de 2014;; ²Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico corto el 17 de octubre de 2014; ; ³Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado en barbecho químico corto el 17 de octubre de 2014; ⁴Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ^aNo significativo; ^bError residual estándar.

En este estudio, la ausencia de efectos negativos en el rendimiento de soja en las secuencias que incluyeron Clorimuron o Imazetapir, es acorde a la determinada por otros autores que trabajaron con aplicaciones de postemergencia de estos activos (Mills y Witt, 1989; Vidrine *et al.*, 2002; Arregui *et al.*, 2005), e incluso con dosis crecientes de estos herbicidas (Krausz *et al.*, 1992). De forma similar a este estudio, Kapusta *et al.* (1986) determinaron daños fitotóxicos decrecientes (desde los 7 DDA hasta los 21 DDA) de herbicidas postemergentes que no afectaron el rendimiento.

No siempre, los efectos fitotóxicos sobre soja se relacionan con disminuciones del rendimiento (Hagood *et al.*, 1980; Shaw y Wixson, 1991; Prostko *et al.*, 1996; Johnson *et al.*, 2002). Las pérdidas de rendimiento en el cultivo podrán ser esperables cuando

los efectos fitotóxicos de los herbicidas sean prolongados (Hart y Roskamp, 1998; Al-Khatib y Peterson, 1999), causen reducciones de la RFAi acumulada (Edwards y Purcell, 2005), o del crecimiento vegetativo (Young *et al.*, 2003).

4.2.6 Disipación de los herbicidas en el suelo y tolerancia del cultivo

La ausencia de efectos negativos sobre el cultivo de soja después de su implantación y emergencia permite aseverar que el herbicida Metsulfuron, aplicado durante el barbecho, fue disipado en forma adecuada. Este herbicida puede causar daños fitotóxicos en el cultivo con aplicaciones cercanas a la siembra, 1 a 2 meses antes (Avendaño *et al.*, 2006; Sánchez *et al.*, 2011), sin embargo, en esta experimentación el lapso entre la aplicación y la siembra fue mayor. Además, las abundantes precipitaciones ocurridas durante el barbecho previo a la siembra de soja, aseguraron un adecuado nivel de humedad del suelo favoreciendo su disipación. Metsulfuron es móvil en el suelo y se ha determinado que con lluvias de más de 100 mm después de la aplicación se puede lixiviar a más de 16 cm de profundidad (James *et al.*, 2004). En este caso, las precipitaciones acumuladas entre la aplicación y la siembra de soja, fueron de 499 mm lo que seguramente favoreció tal lixiviación y, en consecuencia, no se produjeron daños en el cultivo. Estudios previos también determinaron que después de 148 días desde la aplicación, bajos niveles de residuos de Metsulfuron fueron hallados a 30-40 cm de profundidad (Walker y Welch, 1989).

Por su parte Ritter *et al.* (1988) no encontraron efectos negativos sobre el rendimiento de soja cuando aplicaron Metsulfuron tres (3) meses antes de la siembra en dosis de 4,5 g iaha⁻¹, 9 g iaha⁻¹ y 18 g iaha⁻¹. Asimismo Salamanca (2011) no observó daños fitotóxicos en el cultivo de soja al utilizar Metsulfuron en barbechos previos a la siembra del cultivo, aún con dosis doble de la normal.

El pH ácido del suelo utilizado en la experimentación y las temperaturas en aumento hasta la siembra del cultivo de soja favorecieron la degradación de Metsulfuron. Estudios previos en condiciones de laboratorio han determinado que la degradación de Metsulfuron fue más rápida en pH ácidos (pH=5,2) respecto de pH alcalinos (pH=8,1) y con temperaturas de suelo de 30°C respecto de 10°C, ya que en esas condiciones se favorece la actividad microbiana y la hidrólisis del activo (Pons y Barriuso, 1998).

La aplicación adicional de Imazetapir, Clorimuron o Diclosulam sobre Metsulfuron, así como, la aplicación adicional de Clorimuron o Imazetapir sobre

Metsulfuron/Diclosulam o Metsulfuron/Clorimuron no causó efectos fitotóxicos sobre la biomasa y el rendimiento, demostrando una excelente tolerancia del cultivo a la aplicación en secuencia de estos herbicidas. La tolerancia del rendimiento del cultivo a estos activos herbicidas, ya demostrada previamente para aplicaciones simples (Cole *et al.*, 1989; Krausz *et al.*, 1992), también se manifestó con aplicaciones en secuencia.

4.3 Efectos en el crecimiento y en el rendimiento de los cultivos invernales

4.3.1 Fitotoxicidad sobre trigo y cebada

Trigo y cebada se desarrollaron normalmente hasta los 50 días después de la siembra (DDS). A partir de allí, los síntomas fitotóxicos se manifestaron y se acrecentaron conforme avanzó el ciclo de los cultivos. Wixon y Shaw (1992) y Alister y Kogan (2005) determinaron una respuesta similar utilizando herbicidas inhibidores de la ALS. La absorción de los herbicidas residuales por las plantas se realiza desde la solución del suelo. Varios modelos que explican la absorción de agua por las raíces, establecen una relación entre la absorción de agua y la densidad de la longitud radicular (root length density). Dardanelli *et al.*, (1997) han determinado que la velocidad de profundización de raíces (VPR) para un cultivo de trigo, creciendo en suelos sin limitaciones físicas fue de 21 mm día⁻¹. En consecuencia, la manifestación de síntomas por parte del cultivo es porque cuenta con mayor volumen radicular (mayor volumen y mayor profundidad) para extraer herbicidas desde la solución del suelo, viendo superada su capacidad de metabolización. Lemerle y Cousens (1993) concluyeron que la absorción de herbicidas inhibidores de la ALS desde la raíz es muy importante en cultivos como cebada.

Las secuencias herbicidas y los cultivos mostraron interacción para la fitotoxicidad a los 71 DDS ($p < 0,05$) y a los 83 DDS ($p < 0,05$). Es decir, trigo y cebada se diferenciaron en la respuesta a las secuencias herbicidas en ambos momentos de evaluación.

En cebada, a los 71 y 83 DDS las secuencias Metsulfuron, Metsulfuron/Metsulfuron, Metsulfuron/Clorimuron/Metsulfuron y Metsulfuron/Clorimuron/Clorimuron/Metsulfuron no resultaron fitotóxicas y no difirieron con respecto a la secuencia testigo (Tabla 14). El resto de las secuencias herbicidas causó fitotoxicidad sobre el cultivo con intensidades de daño de 9,5% a 30% a los 71 DDS y de 7,8 a 42,5% a los 83 DDS. Las secuencias herbicidas que resultaron más fitotóxicas a los 83 DDS incluyeron

Diclosulam/Imazetapir en el barbecho corto y en postemergencia de soja (secuencias 7 y 10, Tabla 14).

Los síntomas fitotóxicos detectados en el cultivo incluyeron clorosis, detención del crecimiento y atraso en el desarrollo fenológico. La fitotoxicidad a los 71 DDS se correlacionó en forma negativa con la altura ($r = -0,89$; $y = -0,356x + 23,16$) y la biomasa ($r = -0,9$; $y = 404,7 e^{-0,034x}$) determinadas a los 95 DDS (Tabla 14). Asimismo, la altura del cultivo fue estadísticamente menor en todas las secuencias herbicidas respecto del testigo, excepto en la que incluyó Metsulfuron (secuencia 2). La secuencia que incluyó Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met/Metsulfuron redujo la altura un 44% y la biomasa un 68,7% en relación al testigo, resultando la más fitotóxica (Tabla 14). También las secuencias Metsulfuron/Diclosulam/Metsulfuron, Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Metsulfuron, Metsulfuron/Clorimuron/Imazetapir/Metsulfuron y Metsulfuron/Diclosulam/Clorimuron/Clors+Met/Metsulfuron causaron reducciones de la biomasa respecto del testigo. El atraso fenológico observado en las secuencias que incluyeron Diclosulam/Imazetapir (secuencias 7 y 10) y Diclosulam/Clorimuron/Clors+Met se evidenció en las menores longitudes que alcanzaron las espigas al momento del muestreo (Tabla 14).

Tabla 14. Fitotoxicidad visual (%) a los 71 y 83 días después de la siembra (DDS), altura, biomasa y longitud de espigas a los 95 DDS para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo, en cebada.

Secuencia Herbicida	Fitotoxicidad		Altura cm	Biomasa g MS ⁻²	Long espigas cm
	71 DDS	83 DDS			
1. Testigo	0	0	25	435	2,8
2. Metsulfuron ¹	0	0	25	433	3,2
3. Metsulfuron ¹ /Metsulfuron ⁷	0	0	23	417	2,8
4. Metsulfuron ¹ /Imazetapir ⁴ /Metsulfuron ⁷	9,5	7,8	17	269	2,4
5. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵ /Metsulfuron ⁷	0	0	23	424	3
6. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Metsulfuron ⁷	11,5	10	17	293	2,2
7. Met ¹ /Diclosulam ³ /Imazetapir ⁴ /Met ⁷	22	22,5	15	183	1,2
8. Met ¹ /Clorimuron ² /Imazetapir ⁴ /Met ⁷	10	10	18	215	2,1
9. Met ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵ /Met ⁷	0	0	23	427	3
10. Met ¹ /Diclos ³ /Imaz ⁴ /Clors+Met ⁶ /Met ⁷	30	42,5	14	136	1,2
11. Met ¹ /Diclos ³ /Clorim ⁵ /Clors+Met ⁶ /Met ⁷	25	17,5	16	214	1,7
MDS ^a (5%)	3,7	5,7	1,6	45,3	0,45

¹Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de julio de 2014; ²Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ³Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ⁴Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁶Finesse: mezcla comercial de Clorsulfuron+ Metsulfuron (13 + 2,4 g ia ha⁻¹) aplicado el 4 de julio de 2015; ⁷Metsulfuron: 4,02 g ia ha⁻¹ aplicado en postemergencia de cultivos invernales el 2 de septiembre de 2015; ^a Mínima diferencia significativa.

En trigo se registró una tendencia al aumento de fitotoxicidad a los 83 DDS respecto de la evaluación previa. Las secuencias Metsulfuron, Metsulfuron/Metsulfuron, Metsulfuron/Clorimuron/Metsulfuron y Metsulfuron/Clorimuron/Clorimuron/Metsulfuron no causaron efectos de fitotoxicidad y no se diferenciaron de la secuencia testigo (Tabla 15). Las restantes secuencias de herbicidas causaron fitotoxicidad sobre el cultivo con intensidades de daño de 1,3% a 23,8% a los 83 DDS. Las secuencias herbicidas con Diclosulam/Imazetapir (secuencias 7 y 10) resultaron las más fitotóxicas (Tabla 15).

Los síntomas fitotóxicos se tradujeron en reducciones de la altura y detenciones del crecimiento, no resultando tan notoria la clorosis. Al igual que en cebada, la fitotoxicidad determinada a los 71 DDS se correlacionó en forma negativa con la altura ($r = -0,79$; $y = -0,704x + 25,96$) y la biomasa ($r = -0,76$; $y = 389,1 e^{-0,038x}$) del cultivo (Tabla 15) determinadas a los 104 DDS. Las secuencias Metsulfuron/Imazetapir/Metsulfuron, Metsulfuron/Diclosulam/Metsulfuron, Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Metsulfuron,

Metsulfuron/Clorimuron/Imazetapir/Metsulfuron,
Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met/Metsulfuron y
Metsulfuron/Diclosulam/Clorimuron/Clors+Met/Metsulfuron causaron disminuciones de la biomasa y de la altura, respecto del testigo. La secuencia que incluyó Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met también resultó la más fitotóxica causando una reducción de 29,6% y de 39,9% en la altura y la biomasa, respectivamente, al comparar contra el testigo (Tabla 15). También se evidenció un atraso fenológico en las secuencias que incluyeron Diclosulam/Imazetapir, evidenciado en las menores longitudes de espiga al momento del muestreo.

Tabla 15. Fitotoxicidad visual (%) a los 71 y 83 días después de la siembra (DDS), altura, biomasa y longitud de espigas a los 104 DDS para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo, en trigo.

Secuencia Herbicida	Fitotoxicidad		Altura cm	Biomasa g MS ⁻²	Long espiga cm
	71 DDS	83 DDS			
1. Testigo	0	0	27	438	1,7
2. Metsulfuron ¹	0	0	26	434	1,7
3. Metsulfuron ¹ /Metsulfuron ⁷	0	0	28	429	2,0
4. Metsulfuron ¹ /Imazetapir ⁴ /Metsulfuron ⁷	1,5	1,3	23	383	1,4
5. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵ /Metsulfuron ⁷	0	0	28	393	1,9
6. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Metsulfuron ⁷	0	6,3	23	319	1,4
7. Met ¹ /Diclosulam ³ /Imazetapir ⁴ /Met ⁷	6,5	14,5	21	295	1,1
8. Met ¹ /Clorimuron ² /Imazetapir ⁴ /Met ⁷	1,3	10	23	314	1,2
9. Met ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵ /Met ⁷	0	0	27	398	2,0
10. Met ¹ /Diclos ³ /Imaz ⁴ /Clors+Met ⁶ /Met ⁷	10	23,8	19	263	0,9
11. Met ¹ /Diclos ³ /Clorim ⁵ /Clors+Met ⁶ /Met ⁷	5,5	6,3	22	320	1,4
MDS ^a (5%)	3,7	5,7	1,6	45,3	0,45

¹Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de julio de 2014; ²Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ³Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ⁴Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁶Finesse: mezcla comercial de Clorsulfuron+ Metsulfuron (13 + 2,4 g ia ha⁻¹) aplicado el 4 de julio de 2015; ⁷Metsulfuron: 4,02 g ia ha⁻¹ aplicado en postemergencia de cultivos invernales el 2 de septiembre de 2015; ^a Mínima diferencia significativa.

4.3.1.1 Fitotoxicidad y su relación con los activos herbicidas

En ambos cultivos invernales, la ausencia de efectos fitotóxicos en las secuencias que recibieron la aplicación de Metsulfuron (secuencia 2) o de Metsulfuron/Metsulfuron (secuencia 3) es factible debido a que este activo es selectivo para ambos y su uso está recomendado para la postemergencia (Vigna *et al.*, 2014; CASAFE, 2015-2017). Una respuesta similar a este estudio, en trigo y cebada, fue determinada por Moyer (1995) con aplicaciones de Metsulfuron en dosis de 6 g ia ha⁻¹ el año previo a la siembra. Asimismo Vicari *et al.* (1994) no detectaron la acumulación de Metsulfuron en el suelo después de aplicaciones repetidas durante 3 años, de dosis de 8 g ia ha⁻¹ mediante el uso de bioensayos. En dicha experimentación los residuos de Metsulfuron de la primera aplicación solo fueron detectados en el mes posterior a la aplicación.

Para las secuencias con tres (3) herbicidas inhibidores de la ALS, las cuales sólo diferían en el herbicida aplicado en soja, se determinó que la inclusión de Diclosulam o

Imazetapir resultó más fitotóxica que Clorimuron, en los dos cultivos invernales (secuencia 4 vs secuencia 5, secuencia 6 vs secuencia 5, Tablas 14 y 15).

Para las secuencias con cuatro (4) herbicidas inhibidores de la ALS, las cuales diferían en los herbicidas aplicados en el barbecho corto y en postemergencia de soja, se determinó que la aplicación en secuencia de Diclosulam/Imazetapir, resultó más fitotóxica que Clorimuron/Imazetapir (secuencia 7 vs secuencia 8, Tablas 14 y 15) y que Clorimuron/Clorimuron (secuencia 7 vs secuencia 9, Tablas 14 y 15). Es destacable que la utilización de Clorimuron/Clorimuron no resultara fitotóxica, sin diferenciarse de sus testigos respectivos en ambos momentos de evaluación (secuencia 9 vs secuencia 1, Tablas 14 y 15).

Para las secuencias con cinco (5) herbicidas inhibidores de la ALS, las cuales diferían en el herbicida aplicado en postemergencia de soja, se determinó que la inclusión de Imazetapir fue más fitotóxica que Clorimuron en ambos cultivos invernales y en ambos momentos de evaluación (secuencia 10 vs secuencia 11, Tablas 14 y 15). Posiblemente estas diferencias se deban a una más rápida degradación en el suelo de Clorimuron que de Imazetapir, como lo indican estudios previos (Schmitz *et al.*, 2001).

Por lo expuesto, la fitotoxicidad en los cultivos invernales se manifestó por la aplicación adicional de Diclosulam, Imazetapir, Clorsulfuron+Metsulfuron, o sus combinaciones sobre Metsulfuron/Metsulfuron (secuencias 4, 6, 7, 8, 10 y 11, Tablas 14 y 15).

4.3.1.2 Acumulación de residuos herbicidas inhibidores de la ALS y fitotoxicidad sobre los cultivos invernales

La aplicación en secuencia de herbicidas inhibidores de la ALS mostró una acumulación de efectos fitotóxicos sobre ambos cultivos invernales, pero dependió de los herbicidas utilizados, principalmente en el barbecho químico corto y en postemergencia de soja, así como, en el barbecho químico invernal. La secuencia que incluyó Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met/Metsulfuron expresó un incremento en la fitotoxicidad a medida que se adicionó un herbicida residual. Al reconstruir dicha secuencia herbicida, se determinó que la aplicación adicional de Metsulfuron, a la secuencia que contenía Metsulfuron no causó daños sobre los cultivos (secuencia 2 vs secuencia 3, Tablas 14 y 15). Sin embargo, la aplicación

adicional de Diclosulam, Imazetapir o Clorsulfuron+Metsulfuron acentuó el daño por fitotoxicidad respecto de cada secuencia que no los contenía (secuencia 6 vs secuencia 3; secuencia 7 vs secuencia 6, secuencia 10 vs secuencia 7, Tablas 14 y 15). El aumento de la fitotoxicidad en los cultivos en rotación, por las aplicaciones en secuencia de imidazolinonas y sulfonilureas, imidazolinonas y triazolpirimidinas o imidazolinonas e imidazolinonas, ya ha sido demostrado previamente en cultivos invernales (Alister y Kogan, 2005; Johnson *et al.*, 2005). Zhang *et al.* (1995) después de una extensa revisión de trabajos, sugieren que los herbicidas del mismo modo de acción aplicados en mezcla o en secuencia tienden a producir interacciones sinérgicas en mayor medida que interacciones antagónicas. Posiblemente una de las causas sería que dichos herbicidas comparten las rutas metabólicas de detoxificación y podrían competir por la acción de las enzimas detoxificantes.

Por otro lado, el efecto de acumulación herbicida no fue evidenciado para la secuencia que incluyó Metsulfuron/Clorimuron/Clorimuron/Metsulfuron (secuencia 3 vs secuencia 2; secuencia 5 vs secuencia 3; secuencia 9 vs secuencia 5, Tablas 14 y 15). La ausencia de efectos negativos fitotóxicos en las secuencias que incluyeron Metsulfuron y Clorimuron (secuencias 5 y 9) podría indicar que ambos herbicidas fueron disipados en forma adecuada. A pesar de las condiciones de sequía manifestadas en la campaña, que limitaron la degradación microbiana, estos herbicidas pudieron ser degradados químicamente. Fuesler y Hanafey (1990) determinaron que las condiciones de sequía limitaron en menor medida la hidrólisis química de Clorimuron, debido a que el aumento de temperatura del suelo favoreció la degradación química, compensando la disminución de la actividad microbiana. Asimismo el pH de suelo utilizado en esta experimentación es favorable para la hidrólisis química de ambas sulfonilureas.

4.3.2 Rendimiento de los cultivos invernales

Al analizar el rendimiento se determinó la existencia de interacción entre las secuencias herbicidas y los cultivos invernales ($p < 0,05$).

En cebada, las secuencias Metsulfuron, Metsulfuron/Metsulfuron y Metsulfuron/Clorimuron/Metsulfuron no presentaron disminuciones del rendimiento en relación a la secuencia testigo (Tabla 16), que alcanzó un rendimiento de 721 g m⁻². La respuesta del rendimiento encontrada en las secuencias dos (2) y tres (3) es

comparable con los resultados determinados por Ivany (1987), quien no observó disminuciones significativas del rinde por aplicaciones de Metsulfuron en postemergencia y en dosis de 9, 18, 36 y 72 g ia ha⁻¹.

Las restantes secuencias herbicidas afectaron en forma significativa el rendimiento respecto del testigo, con disminuciones que variaron entre el 6 y 33,7%. De tal forma, para las secuencias que acumularon tres (3) herbicidas inhibidores de la ALS, la inclusión de Diclosulam o Imazetapir causó mermas significativas del rendimiento, del orden del 13, 1 y 8,1% respectivamente, en comparación con la secuencia testigo (Tabla 16). De las secuencias con cuatro (4) herbicidas inhibidores de la ALS, la que incluyó Diclosulam/Imazetapir causó mayores mermas de rendimiento que Clorimuron/Imazetapir y que Clorimuron/Clorimuron. Las mermas de rinde en relación a la secuencia testigo fueron del 20,1%, 12,6% y 6%, respectivamente y a su vez, se diferenciaron estadísticamente entre sí (Tabla 16). Por último, las secuencias con cinco (5) herbicidas inhibidores de la ALS disminuyeron significativamente el rendimiento de cebada, entre un 18 y 33,7 % con respecto a la secuencia testigo. En estas secuencias, la inclusión de Imazetapir en postemergencia de soja, resultó más fitotóxica que Clorimuron, diferenciándose estadísticamente entre sí (secuencia 10 vs secuencia 11, Tabla 16).

Para trigo se determinó una menor disminución del rendimiento comparado con cebada. Las secuencias herbicidas que afectaron el rendimiento fueron Metsulfuron/Diclosulam/Clorimuron/Clors+Met/Metsulfuron, con una merma del 8,1 %, Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Metsulfuron con una disminución del 8,8% y Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met/Metsulfuron con una caída del 11,4% (Tabla 16). La ausencia de efectos negativos en el rendimiento en las secuencias que incluyeron Clorimuron o Imazetapir (secuencias 4, 5 y 9) como únicos herbicidas no selectivos, es comparable con la respuesta observada por Krausz *et al.* (1992) sobre este cultivo.

Por otro lado, las secuencias herbicidas que incluyeron Diclosulam/Imazetapir (secuencias 7 y 10) causaron las mayores mermas del rendimiento en ambos cultivos invernales. Esto podría explicarse porque ambos herbicidas son de moderada-larga persistencia y el período posterior a su aplicación se caracterizó por una fuerte sequía (Tabla 8), que posiblemente redujo la actividad microbiana e incrementó la residualidad de ambos herbicidas. El incremento de la residualidad de Imazetapir en años secos respecto de años húmedos, fue observado por O' Sullivan *et al.* (1998).

Por su parte, Vischetti (1995) demostró que la humedad de suelo influenció la persistencia de Imazetapir, incrementando su DT_{50} en suelos que estaban al 35% de su capacidad de campo respecto de suelos al 75 %. Adicionalmente, se registró un aumento de pérdida de rendimiento por la aplicación adicional de estos herbicidas (secuencias 7 vs secuencia 6, secuencia 10 vs secuencia 7, Tabla 16). A su vez, el incremento en la fitotoxicidad en las secuencias que incluyeron Diclosulam/Imazetapir puede deberse a una interacción (aditiva o sinérgica) entre los activos herbicidas. Alister y Kogan (2005) trabajando con imidazolinonas sugirieron que las mezclas de activos aumentaron la residualidad sobre distintos cultivos. Por su parte, Johnson *et al.* (2005) reportaron mayores pérdidas de rendimiento en trigo y colza por distintas combinaciones de imidazolinonas y sulfonilureas aplicados en secuencia, respecto de secuencias que utilizaron menos herbicidas o que no utilizaron herbicidas residuales. Por otro lado, Robinson (2008) determinó un aumento de la pérdida de rendimiento en distintos cultivos hortícolas (excepto en papa) con la aplicación en mezcla de Atrazina+ Mesotrione en comparación con la aplicación de Mesotrione solo. Dicho autor hipotetizó sobre un aumento de la residualidad en los cultivos producto de la combinación de estos herbicidas.

Tabla 16. Rendimiento en grano (RTO), peso por grano (PG) y número de granos m^{-2} (NG) de cebada y trigo para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.

Secuencia herbicida	Rendimiento					
	Cebada			Trigo		
	RTO	PG	NG	RTO	PG	NG
	$g\ m^{-2}$	mg	X1000	$g\ m^{-2}$	mg	X1000
1. Testigo	721	45	16	537	34,6	15,5
2. Metsulfuron ¹	697	44,1	15,8	540	34,1	15,9
3. Metsulfuron ¹ /Metsulfuron ⁷	737	44	16,8	540	33,9	16,0
4. Metsulfuron ¹ /Imazetapir ⁴ /Metsulfuron ⁷	663	44,5	14,9	524	33,6	15,6
5. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵ /Metsulfuron ⁷	700	44,2	15,8	530	33,6	15,8
6. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Metsulfuron ⁷	625	43,7	14,3	498	34,6	14,4
7. Met ¹ /Diclosulam ³ /Imazetapir ⁴ /Met ⁷	576	42,9	13,4	489	33,7	14,5
8. Met ¹ /Clorimuron ² /Imazetapir ⁴ /Met ⁷	630	43,8	14,4	503	33,8	14,9
9. Met ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵ /Met ⁷	678	44	15,4	525	34,3	15,3
10. Met ¹ /Diclos ³ /Imaz ⁴ /Clors+Met ⁶ /Met ⁷	478	43,4	11	475	34,0	14,0
11. Met ¹ /Diclos ³ /Clorim ⁵ /Clors+Met ⁶ /Met ⁷	591	43,1	13,8	493	32,8	15,0
MDS ^a (5%)	43,5	0,82	1,17	43,5	0,82	1,17

¹Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de julio de 2014; ²Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ³Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ⁴Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁶Finesse: mezcla comercial de Clorsulfuron+ Metsulfuron (13 + 2,4 g ia ha⁻¹) aplicado el 4 de julio de 2015; ⁷Metsulfuron: 4,02 g ia ha⁻¹ aplicado en postemergencia de cultivos invernales el 2 de septiembre de 2015; ^a Mínima diferencia significativa.

La mayor sensibilidad en el rendimiento que mostró cebada respecto de trigo también fue demostrada por Dipiano y Waimann (2015), aunque, trabajando con imidazolinonas aplicadas en un cultivo de girasol tolerante a este grupo químico herbicida. La diferente sensibilidad de los cultivos a residuos de herbicidas inhibidores de la ALS ha sido documentada en otros estudios (Ball, 2003; Alister y Kogan, 2005; Istilart, 2005) y puede explicarse por diferencias en la capacidad para metabolizar a los herbicidas (Teclé *et al.*, 1993). Por ejemplo, Frear *et al.* (1993) encontraron mayor actividad metabólica para detoxificar Flumetsulam (ALS), en las hojas de trigo comparadas con las de cebada y maíz, aunque a nivel radicular no existieron diferencias. Según Pinto de Carvalho *et al.* (2009) los grupos químicos de las sulfonilureas y algunos principios activos de las imidazolinonas son principalmente metabolizados por el citocromo P450, sin embargo, Frear *et al.* (1993) sugieren que las diferentes formas activas del citocromo, presentes en las plantas, pueden variar la capacidad de metabolización de herbicidas.

4.3.3 Componentes numéricos del rendimiento

El rendimiento de los cultivos invernales fue analizado como el producto entre el NG y PG. El rendimiento se asoció positivamente en mayor medida con el NG que con el PG (Tabla 17) tanto en cebada (Figura 7) como en trigo (Figura 8). Bahrampur y Sharifi Ziveh (2013) determinaron una respuesta similar a este estudio sobre los componentes del rendimiento, para cebada y trigo, al estudiar la residualidad de herbicidas inhibidores de la ALS (sulfonilureas) aplicados en el cultivo previo.

Tabla 17. Coeficientes de determinación (R^2) entre el Rendimiento (g m^{-2}) y el Número de granos (NG) y/o el Peso de grano (PG) para Cebada y Trigo incluyendo todas las secuencias herbicidas.

Cultivos	Rendimiento vs.	
	PG (mg)	NG
	R^2	
Cebada	0,09	0,96
Trigo	0,01	0,75

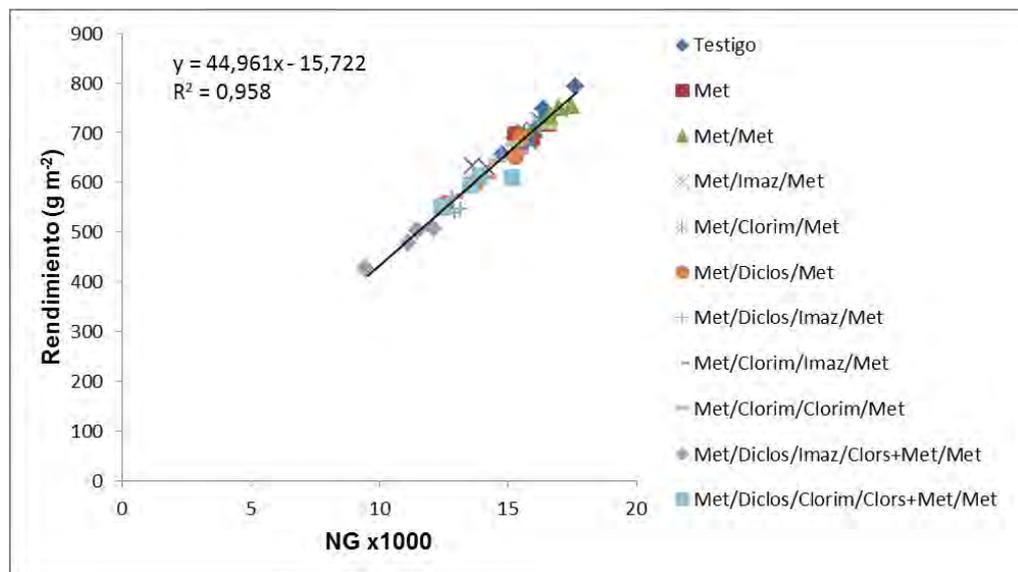


Figura 7: Relación entre el rendimiento y el número de granos m^{-2} en cebada y para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo. Ref: Met: Metsulfuron, Imaz: Imazetapir, Clorim: Clorimuron, Diclos: Diclosulam, Clors+Met: Clorsulfuron+Metsulfuron.

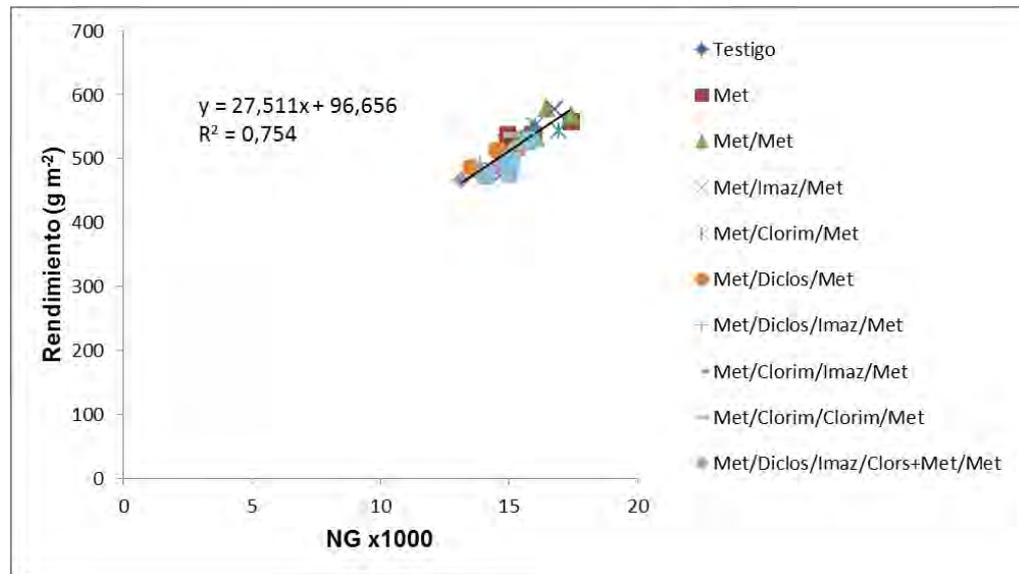


Figura 8: Relación entre el rendimiento y el número de granos m^{-2} en trigo y para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo. Ref: Met: Metsulfuron, Imaz: Imazetapir, Clorim: Clorimuron, Diclos: Diclosulam, Clors+Met: Clorsulfuron+Metsulfuron.

Esta fuerte relación entre el NG y el rendimiento de los cultivos ha sido ampliamente descrita en otros trabajos (Abeledo *et al.*, 2003; Moreyra, 2012). Si bien, respecto de esta investigación el factor que causa esas variaciones es diferente (genética vs daños por residualidad), se destaca que el NG es el principal componente que explicó las variaciones en los rendimientos de cultivos de grano.

La menor asociación del PG con el rendimiento es esperable ya que el PG es más estable ante variaciones en el ambiente. Por ejemplo Abeledo *et al.* (2003) reportaron que en cebada la selección genética a través de los años llevó a estabilizar el PG de los cultivares.

4.3.3.1 Número de granos

El NG fue el componente que más explicó las variaciones en el rendimiento de los cultivos invernales (Tablas 16 y 17). Se determinó efecto de interacción entre las secuencias herbicidas y los cultivos ($p < 0,05$) para esta variable (Tabla 16). Tanto en trigo como en cebada las secuencias herbicidas se diferenciaron entre aquellas que redujeron el NG y las que no lo afectaron, en relación a sus testigos respectivos.

En cebada, la secuencia testigo alcanzó un valor medio de NG de 16×10^3 . La reducción del NG con significancia estadística respecto de la misma, varió entre un

10,8% ($14,3 \times 10^3$ NG) y 31,1% (11×10^3 NG). La secuencia Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met/Metsulfuron fue la que más redujo el NG (Tabla 16).

En trigo, la única secuencia herbicida que causó disminuciones significativas del NG respecto de la secuencia testigo, con una reducción del 9,7% ($15,5 \times 10^3$ vs 14×10^3) fue Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met/Metsulfuron. Las restantes secuencias que presentaron fitotoxicidad en condiciones de campo (secuencias 6, 7, 8 y 11) mostraron una tendencia a disminuir el NG pero no difirieron significativamente con la secuencia testigo (Tabla 16).

Continuando el análisis, el NG fue interpretado como el producto entre el número de espigas m^{-2} (NESP) y el número de granos por espiga (NGESP). Las secuencias herbicidas no causaron efectos negativos sobre el NGESP en ninguno de los dos cultivos invernales ($p > 0,05$; Tabla 18). Consecuentemente la correlación entre el NG y el NGESP fue poco robusta en cebada ($r = 0,34$) y nula en trigo ($r = -0,14$). Contrariamente se determinó una asociación significativa y positiva entre el NG y el NESP para cebada (Figura 9) y trigo (Figura 10).

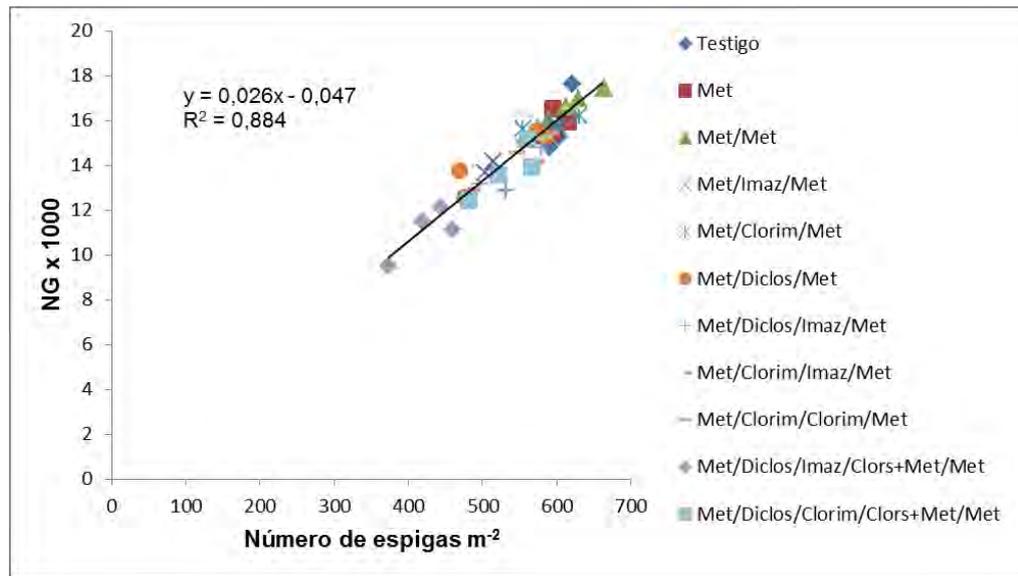


Figura 9. Relación entre el número de granos m^{-2} y el número de espigas m^{-2} en el cultivo de cebada para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo. Ref: Met: Metsulfuron, Imaz: Imazetapir, Clorim: Clorimuron, Diclos: Diclosulam, Clors+Met: Clorsulfuron+Metsulfuron.

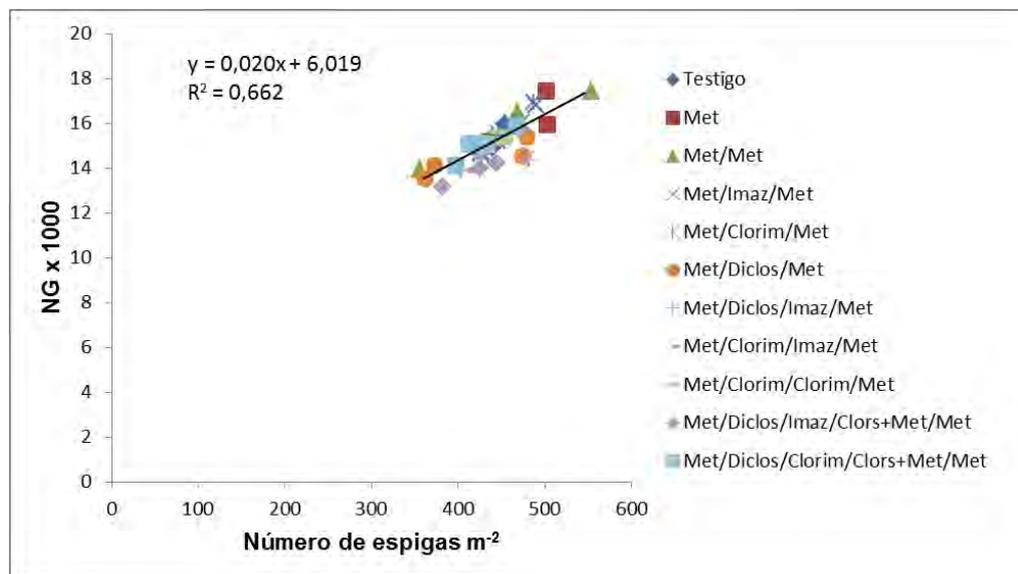


Figura 10. Relación entre el número de granos m^{-2} y el número de espigas m^{-2} en el cultivo de trigo para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo. Ref: Met: Metsulfuron, Imaz: Imazetapir, Clorim: Clorimuron, Diclos: Diclosulam, Clors+Met: Clorsulfuron+Metsulfuron.

Los cultivos de cebada y trigo se diferenciaron marcadamente en el NESP debido a la residualidad de las secuencias herbicidas. Esto se reflejó en el efecto de interacción

entre las secuencias herbicidas y los cultivos invernales para esta variable, (p interacción $< 0,05$) (Tabla 18).

En cebada las secuencias Metsulfuron, Metsulfuron/Metsulfuron, Metsulfuron/Clorimuron/Metsulfuron y Metsulfuron/Clorimuron/Clorimuron/Metsulfuron no difirieron en el NESP con respecto a la secuencia testigo, que alcanzó 604 espigas m^{-2} (Tabla 18). El resto de las secuencias herbicidas que habían causado fitotoxicidad sobre el cultivo, disminuyeron el NESP entre 8,2% y 29,8% respecto a la secuencia testigo. La secuencia que redujo el NESP en mayor medida fue Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met/Metsulfuron (Tabla 18).

En trigo, las secuencias herbicidas que causaron fitotoxicidad (secuencias 6, 7, 8, 10 y 11) tuvieron tendencia a disminuir el NESP hasta un máximo de 6,2% (447 vs 419), sin embargo, no se determinaron disminuciones significativas ($p > 0,05$) con respecto a la secuencia testigo (Tabla 18).

Tabla 18. Número de espigas m⁻² y granos por espiga en cebada y trigo para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo.

Secuencia Herbicida	Cebada		Trigo	
	Numero de espigas m ⁻²	Granos por espiga	Numero de espigas m ⁻²	Granos por espiga
1. Testigo	604	27	447	35
2. Metsulfuron ¹	597	27	468	34
3. Metsulfuron ¹ /Metsulfuron ⁷	624	27	460	35
4. Metsulfuron ¹ /Imazetapir ⁴ /Metsulfuron ⁷	554	27	454	34
5. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵ /Metsulfuron ⁷	592	27	458	34
6. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Metsulfuron ⁷	525	27	422	35
7. Met ¹ /Diclosulam ³ /Imazetapir ⁴ /Met ⁷	535	25	434	34
8. Met ¹ /Clorimuron ² /Imazetapir ⁴ /Met ⁷	548	26	428	35
9. Met ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵ /Met ⁷	578	27	446	34
10. Met ¹ /Diclos ³ /Imazetapir ⁴ /Clors+Met ⁶ /Met ⁷	424	26	419	33
11. Met ¹ /Diclos ³ /Clorim ⁵ /Clors+Met ⁶ /Met ⁷	532	26	427	35
MDS ^a (5%)	50,8	NS ^b	50,8	NS ^b

¹ Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de julio de 2014; ² Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ³ Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ⁴ Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵ Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁶ Finesse: mezcla comercial de Clorsulfuron+ Metsulfuron (13 + 2,4 g ia ha⁻¹) aplicado el 4 de julio de 2015; ⁷ Metsulfuron: 4,02 g ia ha⁻¹ aplicado en postemergencia de cultivos invernales el 2 de septiembre de 2015; ^a Mínima diferencia significativa; ^b No significativo.

El rendimiento de los cultivos invernales se asoció en forma positiva y lineal con el NESP, obteniéndose una mejor asociación en cebada (Figura 11) que en trigo (Figura 12). Por otro lado, el rendimiento no se correlacionó con el número de granos por espiga (NGESP) en ninguno de los dos cultivos. El hecho de trabajar con un solo cultivar por especie generó que las diferencias se dieran en el NESP. En estudios previos se ha demostrado que las variaciones en el ambiente pueden causar efectos sobre el NESP cuando se trabaja con un solo cultivar o sobre el NGESP cuando se trabaja con varios cultivares (Moreyra, 2012).

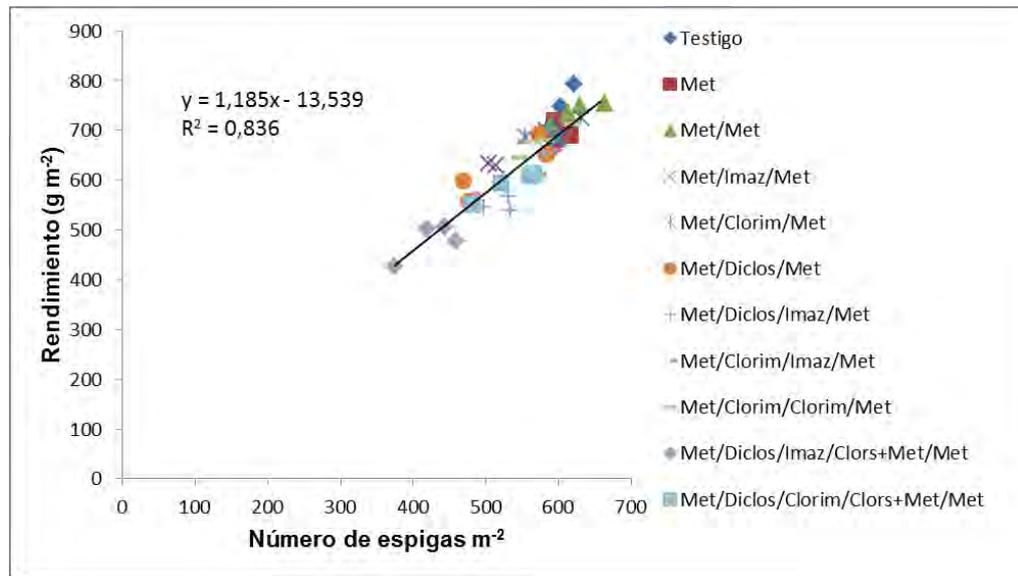


Figura 11. Rendimiento del cultivo de cebada en función del número de espigas m⁻² para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo. Ref: Met: Metsulfuron, Imaz: Imazetapir, Clorim: Clorimuron, Diclos: Diclosulam, Clors+Met: Clorsulfuron+Metsulfuron.

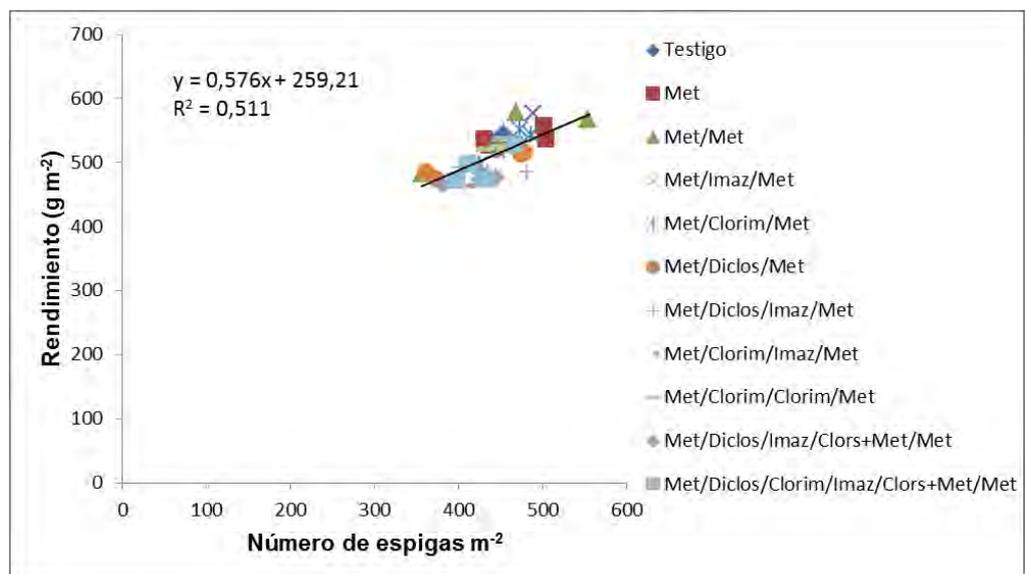


Figura 12. Rendimiento del cultivo de trigo en función del número de espigas m⁻² para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo. Ref: Met: Metsulfuron, Imaz: Imazetapir, Clorim: Clorimuron, Diclos: Diclosulam, Clors+Met: Clorsulfuron+Metsulfuron.

Esto permite concluir que la residualidad de las secuencias herbicidas afectó la producción de macollos, y en consecuencia, el NESP impactando negativamente en el rendimiento de ambos cultivos.

Particularmente en cebada, los efectos negativos de la residualidad se extendieron hasta el período crítico de formación de este componente del rendimiento, ubicado entre los 20 y 40 días previos a espigazón (Miralles *et al.*, 2011). Este fuerte efecto negativo en el rendimiento debido a la reducción del NESP podría ser debido a que los cultivares modernos explican sus variaciones de rendimientos a través de variaciones principalmente del NESP (Abeledo *et al.*, 2003). Adicionalmente la mayor sensibilidad de cebada podría explicarse porque los cultivares de dos hileras tienen poca plasticidad para modificar el número de granos por espiga, ya que en cada espiguilla se diferencia un solo primordio que posteriormente podrá ser o no una flor fértil (Miralles *et al.*, 2011). Por otro lado, el cultivar de cebada generó menor NESP que el de trigo, con lo cual, los efectos fitotóxicos resultan aún más negativos al disminuir el NESP.

4.3.3.2 Peso por grano

El peso de los granos depende de los genotipos y de las condiciones ambientales durante la fase de llenado de granos (Andrade *et al.*, 2000). No se determinó efecto de interacción entre las secuencias herbicidas y los cultivos invernales ($p > 0,05$) para el peso por grano (PG). Existieron efectos principales de los cultivos ($p < 0,05$) y de las secuencias herbicidas ($p < 0,05$) sobre esta variable.

El PG fue mayor en el cultivar de cebada que en el de trigo. En las secuencias testigos, los PG obtenidos fueron de 34,6 mg para trigo y 45 mg para cebada (Tabla 16). Las secuencias que afectaron en mayor medida el PG de ambos cultivos fueron Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met/Metsulfuron, con una disminución del 2,8% Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Metsulfuron, con una merma del 3,8%, y Metsulfuron/Diclosulam/Clorimuron/Clors+Met/Metsulfuron con una reducción del 4,7%, respecto del PG del testigo (Tabla 16).

La relación entre el NG y el PG en cebada no fue significativa ($r = 0,1$; $p > 0,05$). Abeledo *et al.* (2003) concluyeron que los cultivares de cebada lanzados al mercado argentino en la segunda mitad del siglo XX no presentaron correlación entre el NG y el PG. Por otro lado, en trigo se encontró una leve asociación negativa entre ambas variables ($r = -0,37$). Esta nula o leve correlación en ambos cultivos determina que

estos componentes no se compensen entre sí, con lo cual, el efecto negativo de la residualidad sobre uno u otro puede causar disminuciones en el rendimiento.

4.3.4 Relaciones entre el crecimiento y el rendimiento de los cultivos invernales

La tasa de crecimiento de los cultivos fue analizada, al igual que en soja, como el producto entre la RFAi y la EUR. En cebada, el período crítico de definición del rendimiento se extiende entre los 30 días previos a la aparición de aristas por sobre la vaina de la hoja bandera y dicho estado (Miralles *et al.*, 2011), mientras que, en trigo se halla entre los 20 días previos y los 10 días posteriores a floración (Slafer *et al.*, 2003). La TCC en dicho período se relaciona con el rendimiento final.

Se comprobó efecto de interacción entre las secuencias herbicidas y los cultivos invernales para el peso seco de los cultivos en el primer (p interacción $< 0,05$) y segundo muestreo (p interacción $< 0,05$). Consecuentemente, este efecto de interacción también se manifestó sobre la TCC (p interacción $< 0,05$) (Tabla 19).

En cebada, las variaciones en la TCC fueron explicadas mayormente por diferencias en la RFAi acumulada durante ese período (Tablas 19 y 20). Las secuencias Metsulfuron, Metsulfuron/Metsulfuron, Metsulfuron/Imazetapir/Metsulfuron no se diferenciaron en la RFAi acumulada respecto del testigo (Tabla 19). Las restantes secuencias herbicidas afectaron en forma significativa la RFAi con disminuciones entre el 5% y hasta el 37%. Las secuencias que incluían Diclosulam/Imazetapir en el barbecho corto y en postemergencia de soja fueron las que presentaron menor RFAi acumulada.

En trigo, en cambio, las variaciones en la TCC fueron explicadas mayormente por diferencias en la EUR (Tablas 19 y 20). Los efectos negativos de la residualidad herbicida afectaron en menor medida a este cultivo, alcanzando una máxima reducción en la RFAi acumulada del 12% para la secuencia Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met/Metsulfuron (Tabla 19).

Tabla 19. Tasa de crecimiento (TCC, g MS m⁻² día⁻¹), radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi, MJ m⁻²) y eficiencia de uso de la radiación (EUR, g MS MJ⁻¹), para cebada y trigo, en las 10 secuencias herbicidas y el testigo, en el período comprendido entre los dos muestreos de biomasa.

Secuencia Herbicida	Cebada			Trigo		
	TCC	RFAi	EUR ^b	TCC	RFAi	EUR
	gm ⁻² día ⁻¹	MJ	g/MJ ⁻¹	g m ⁻² día ⁻¹	MJ	g /MJ ⁻¹
1. Testigo	30	180	3,8	32	167	3,8
2. Metsulfuron ¹	30	180	3,8	32	163	3,7
3. Metsulfuron ¹ /Metsulfuron ⁷	31	176	3,9	32	161	3,9
4. Metsulfuron ¹ /Imaz ⁴ /Met ⁷	28	185	3,5	24	158	3,1
5. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵ /Met ⁷	28	171	3,8	28	151	3,6
6. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³ /Met ⁷	24	149	3,8	27	148	3,6
7. Met ¹ /Diclosulam ³ /Imaz ⁴ /Met ⁷	21	136	3,6	26	159	3,3
8. Met ¹ /Clorimuron ² /Imaz ⁴ /Met ⁷	29	144	4,3	27	151	3,5
9. Met ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵ /Met ⁷	26	169	3,6	32	153	3,9
10. Met ¹ /Diclos ³ /Imaz ⁴ /Clors+Met ⁶ /Met ⁷	18	114	3,5	24	147	3,3
11. Met ¹ /Diclos ³ /Clorim ⁵ /Clors+Met ⁶ /Met ⁷	26	160	3,8	27	156	3,5
MDS ^a (5%)	2,5	8,9	0,4	2,5	8,9	0,4

¹ Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de julio de 2014; ² Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ³ Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ⁴ Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵ Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁶ Finesse: mezcla comercial de Clorsulfuron+ Metsulfuron (13 + 2,4 g ia ha⁻¹) aplicado el 4 de julio de 2015; ⁷ Metsulfuron: 4,02 g ia ha⁻¹ aplicado en postemergencia de cultivos invernales el 2 de septiembre de 2015; ^a Mínima diferencia significativa; ^b Calculada como la relación entre la diferencia de peso seco y la RFAi.

En esta experiencia, el rendimiento de trigo y cebada se asoció en forma positiva y lineal con la TCC en el período que abarcaron los muestreos de biomasa (alrededor de la floración), obteniéndose una correlación más robusta en cebada (Figura 13) que en trigo (Figura 14). Cebada fue más afectada por la residualidad de las secuencias herbicidas respecto de trigo, obteniendo que por cada punto de aumento de la TCC, el rendimiento aumentó 14,7 g m⁻², mientras que en trigo, solo aumentó 4,8 g m⁻². Las menores TCC se dieron en las secuencias herbicidas que incluyeron Diclosulam/Imazetapir (secuencia 7 y secuencia 10), alcanzando una máxima caída en la TCC del 38 % en cebada (secuencia 10) y del 24,7% en trigo (secuencia 10), respecto de sus testigos.

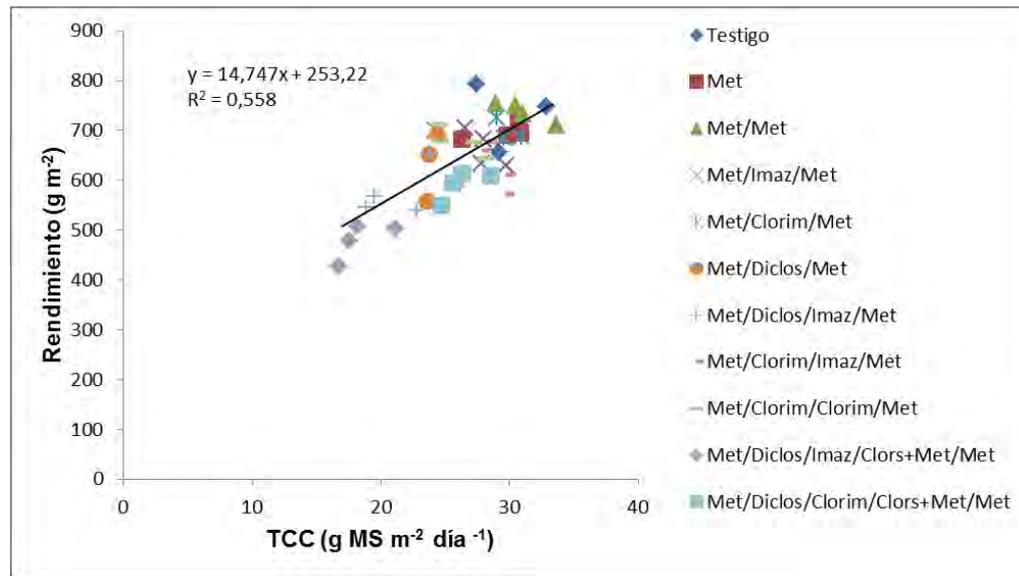


Figura 13. Rendimiento del cultivo de cebada en función de la tasa de crecimiento del cultivo durante el período entre muestreos de biomasa (desde los 95 DDS hasta los 118 DDS) para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo. Ref: Met: Metsulfuron, Imaz: Imazetapir, Clorim: Clorimuron, Diclos: Diclosulam, Clors+Met: Clorsulfuron+Metsulfuron.

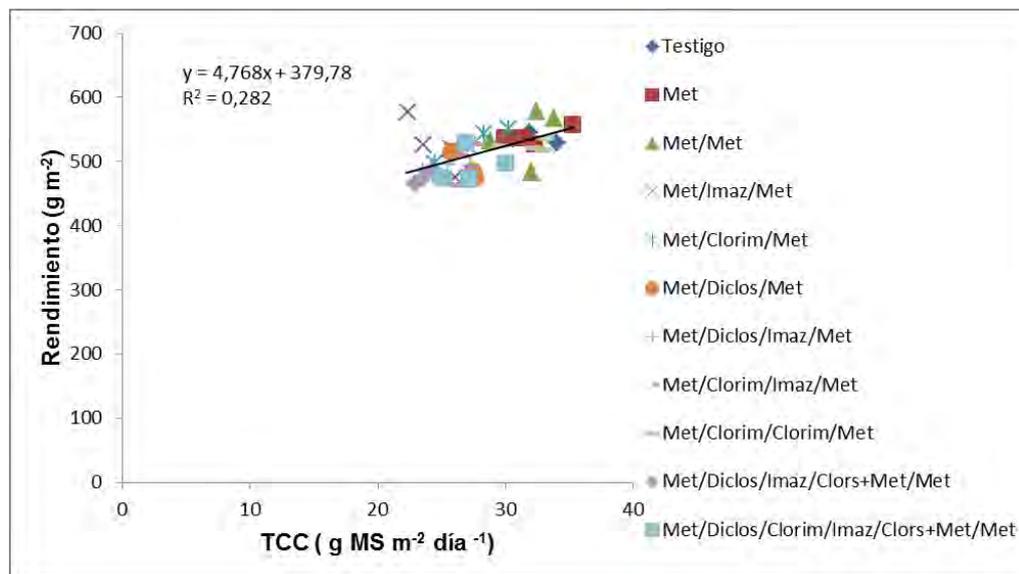


Figura 14. Rendimiento del cultivo de trigo en función de la tasa de crecimiento del cultivo durante el período entre muestreos de biomasa (desde los 104 DDS hasta los 125 DDS) para las diez (10) secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS y el testigo. Ref: Met: Metsulfuron, Imaz: Imazetapir, Clorim: Clorimuron, Diclos: Diclosulam, Clors+Met: Clorsulfuron+Metsulfuron.

Tabla 20. Coeficientes de determinación de las regresiones lineales de la tasa de crecimiento (g MS m^{-2}) sobre la eficiencia de uso de la radiación (g MJ^{-1}) y sobre la radiación interceptada acumulada ($\text{MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$) durante el período crítico de definición del rendimiento incluyendo todas las secuencias herbicidas para trigo y cebada.

Cultivos	Tasa de Crecimiento vs	
	EUR	RFAi
	R ²	
Cebada	0,37	0,65
Trigo	0,76	0,06

4.4 Bioensayos en cámara de crecimiento

El bioensayo en cámara de crecimiento (BIOCC) es una metodología de diagnóstico para prevenir el daño de herbicidas residuales sobre los cultivos. Es una determinación biológica basada en cuantificar la respuesta de crecimiento de un tejido u órgano sensible al herbicida (Leguizamón, 2014). Adicionalmente, bajas concentraciones de residuos herbicidas pueden ser detectadas en cortos períodos de tiempo (Riddle, 2012), 15 a 20 días, y en condiciones controladas de ambiente.

Mediante esta metodología, se caracterizó la residualidad de las secuencias herbicidas hasta la siembra de trigo y cebada (no incluyó la aplicación de Metsulfuron en POE en los cultivos invernales).

4.4.1 Resultados de los bioensayos

A través del BIOCC se determinaron efectos de residualidad sobre los cultivos invernales. No se detectó interacción para las variables altura y biomasa seca, entre las secuencias herbicidas y los cultivos (p interacción altura $> 0,05$; p interacción biomasa $> 0,05$). Solo existió efecto de las secuencias herbicidas sobre la altura ($p < 0,05$) y la biomasa seca ($p < 0,05$) de trigo y cebada.

Para la variable altura, en ambos cultivos, las secuencias 2 (Sin ALS) y 6 (Metsulfuron/Diclosulam) no causaron efectos negativos sobre esta variable y no se diferenciaron del testigo (Tabla 21). El resto de las secuencias herbicidas redujeron la altura en relación al testigo. Las secuencias que más afectaron esta variable fueron Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir, Metsulfuron/Clorimuron/Imazetapir y Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met, causando reducciones del 15,6%, 15,7% y 20%, respectivamente, al comparar contra el testigo. Estas secuencias herbicidas no se diferenciaron estadísticamente entre sí (Tabla 21).

Para la variable biomasa y en ambos cultivos invernales, las secuencias 2 (Sin ALS) y 3 (Metsulfuron) no causaron efectos negativos sobre esta variable. El resto de las secuencias herbicidas provocaron reducciones de la biomasa en relación al testigo. La secuencia que resultó más fitotóxica fue Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met provocando una reducción del 18,7% en relación al testigo (Tabla 21).

Tabla 21. Altura promedio y biomasa promedio de cebada y trigo en cada secuencia herbicida en el bioensayo en cámara de crecimiento.

Secuencia Herbicida	Altura promedio ^b	Biomasa promedio ^b
	cm	g MS
1.Testigo	6,85	0,164
2.Sin ALS	6,58	0,155
3.Metsulfuron ¹	6,20	0,153
4.Metsulfuron ¹ /Imazetapir ⁴	6,02	0,147
5.Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵	6,17	0,147
6.Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³	6,80	0,150
7.Met ¹ /Diclosulam ³ /Imazetapir ⁴	5,78	0,149
8 Met ¹ /Clorimuron ² /Imazetapir ⁴	5,77	0,148
9.Met ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵	6,12	0,151
10.Met ¹ /Diclos ³ /Imaz ⁴ /Clors+Met ⁶	5,47	0,130
11.Met ¹ /Diclos ³ /Clorim ⁵ /Clors+Met ⁶	6,17	0,145
MDS ^a (5%)	0,45	0,011

¹ Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de julio de 2014; ² Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ³Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ⁴ Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵ Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁶ Finesse: mezcla comercial de Clorsulfuron+ Metsulfuron (13 + 2,4 g ia ha⁻¹) aplicado el 4 de julio de 2015; ^a Mínima diferencia significativa; ^b Es el promedio que resulta para cada secuencia herbicida utilizando los datos de altura y biomasa de las tablas 22 y 23

Tabla 22. Altura, biomasa, longitud de raíz y síntomas en raíces del cultivo de cebada en el bioensayo en cámara de crecimiento.

Secuencia Herbicida	Altura	Biomasa	Longitud raíz	Síntomas ^b
	cm	g MS	cm	
1. Testigo	6,80	0,207	18,6	No
2. Sin ALS	6,58	0,194	18,1	No
3. Metsulfuron ¹	6,25	0,197	18,0	No
4. Metsulfuron ¹ /Imazetapir ⁴	6,22	0,188	15,3	Si
5. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵	6,22	0,183	17,2	No
6. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³	6,80	0,190	17,9	Si
7. Met ¹ /Diclosulam ³ /Imazetapir ⁴	6,00	0,193	14,1	Si
8. Met ¹ /Clorimuron ² /Imazetapir ⁴	6,08	0,195	14,6	Si
9. Met ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵	6,38	0,190	18,2	No
10. Met ¹ /Diclos ³ /Imaz ⁴ /Clors+Met ⁶	5,88	0,168	13,9	Si
11. Met ¹ /Diclos ³ /Clorim ⁵ /Clors+Met ⁶	6,10	0,180	17,3	Si
MDS ^a (5%)			1,5	

¹ Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de julio de 2014; ² Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ³ Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ⁴ Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵ Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁶ Finesse: mezcla comercial de Clorsulfuron+ Metsulfuron (13 + 2,4 g ia ha⁻¹) aplicado el 4 de julio de 2015; ^a Mínima diferencia significativa; ^b Presencia de síntomas de engrosamiento y de reducción de la longitud radicular.

Tabla 23. Altura, biomasa y síntomas en raíces del cultivo de trigo en el bioensayo en cámara de crecimiento.

Secuencia Herbicida	Altura	Biomasa	Síntomas ^a
	cm	g MS	
1. Testigo	6,90	0,120	No
2. Sin ALS	6,60	0,115	No
3. Metsulfuron ¹	6,15	0,109	No
4. Metsulfuron ¹ /Imazetapir ⁴	5,83	0,111	No
5. Metsulfuron ¹ /Clorimuron ⁵	6,13	0,109	No
6. Metsulfuron ¹ /Diclosulam ³	6,80	0,110	No
7. Met ¹ /Diclosulam ³ /Imazetapir ⁴	5,58	0,106	Si
8. Met ¹ /Clorimuron ² /Imazetapir ⁴	5,48	0,101	No
9. Met ¹ /Clorimuron ² /Clorimuron ⁵	5,88	0,111	No
10. Met ¹ /Diclos ³ /Imazetapir ⁴ /Clors+Met ⁶	5,08	0,093	Si
11. Met ¹ /Diclos ³ /Clorim ⁵ /Clors+Met ⁶	6,25	0,111	No

¹ Metsulfuron: 4,8 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de julio de 2014; ² Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ³ Diclosulam: 25,2 g ia ha⁻¹ aplicado el 17 de octubre de 2014; ⁴ Imazetapir: 80 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁵ Clorimuron: 12,5 g ia ha⁻¹ aplicado el 29 de diciembre de 2014; ⁶ Finesse: mezcla comercial de Clorsulfuron+ Metsulfuron (13 + 2,4 g ia ha⁻¹) aplicado el 4 de julio de 2015;^a Presencia de síntomas de engrosamiento y de reducción de la longitud radicular.

En cebada (Figuras 15 y 16), así como en trigo (Figura 17), también se determinaron efectos fitotóxicos a nivel radicular, manifestados a través de un engrosamiento radicular, menor cantidad de pelos radiculares y menor longitud comparadas contra el testigo.



Figura 15. Longitud de raíces en cebada en el bioensayo en cámara de crecimiento para el testigo (1) y las secuencias herbicidas Metsulfuron/Imazetapir (4), Metsulfuron/Diclosulam (6), Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir (7) y Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clorsulfuron+Metsulfuron (10).



Figura 16. Síntomas de fitotoxicidad por residualidad y acumulación de herbicidas inhibidores de la ALS (engrosamiento, menor volumen de pelos radiculares, menor longitud radicular) en cebada en una secuencia que incluyó Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir (secuencia 7).



Figura 17. Síntomas de engrosamiento y de menor longitud radicular en trigo en la secuencia Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir (7) en relación a la secuencia testigo (1).

En cebada, las secuencias herbicidas Metsulfuron/Imazetapir, Metsulfuron/Diclosulam, Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir, Metsulfuron/Clorimuron/Imazetapir, Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met y Metsulfuron/Diclosulam/Clorimuron/Clors+Met mostraron síntomas fitotóxicos en las raíces (Tabla 22). En trigo, en cambio, solo se detectaron síntomas radiculares en las secuencias Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir y Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met (Tabla 23). No obstante es de destacar que las secuencias que incluyeron Diclosulam/Imazetapir (secuencias 7 y 10) fueron las más fitotóxicas en ambos cultivos. Una de las posibles causas de estos efectos fitotóxicos es que los mm de agua acumulados después de la aplicación de Diclosulam y/o de Imazetapir no fueron suficientes para evitar daños por residualidad y menos aún, cuando estos herbicidas fueron aplicados en secuencia.

En cebada también se detectaron fuertes reducciones de la longitud radicular (Tabla 22). Las secuencias Metsulfuron/Imazetapir, Metsulfuron/Clorimuron/Imazetapir, Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir y Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir/Clors+Met redujeron la longitud radicular en relación al testigo. Las secuencias que más afectaron al cultivo fueron las que incluyeron Diclosulam/Imazetapir (secuencias 7 y 10) con una reducción máxima del 25,2% en la secuencia 10, respecto del testigo. También se podría inferir que existió un efecto de interacción (posiblemente aditivo o sinérgico) al comparar la secuencia Metsulfuron/Diclosulam o Metsulfuron/Imazetapir con

Metsulfuron/Diclosulam/Imazetapir, debido a que esta última secuencia herbicida resultó más fitotóxica (Tabla 22) y contaba con más herbicidas aplicados.

En las Tablas 24 y 25 se presentan las matrices de correlación de las variables determinadas en los BIOCC y las variables de campo para cebada y trigo.

Tabla 24. Matriz de correlaciones entre las variables determinadas en el bioensayo y las variables de campo para el cultivo de cebada.

Variable de campo	Variable del bioensayo					
	Altura		Biomasa		Longitud de raíz	
	r ³	p valor	r ³	p valor	r ³	p valor
Fitotoxicidad ¹	-0,37	0,01	-0,28	0,06	-0,56	<0,0001
Altura ²	0,38	0,01	0,28	0,07	0,61	<0,0001
Biomasa ²	0,40	0,006	0,35	0,02	0,73	<0,0001
Rendimiento	0,41	0,006	0,28	0,06	0,58	<0,0001

¹ Determinada a los 71 DDS en condiciones de campo; ² Determinada a los 95 DDS en condiciones de campo; ³ Coeficiente de correlación de Pearson.

Tabla 25. Matriz de correlaciones entre las variables altura de trigo, biomasa de trigo y longitud de raíz en cebada determinadas en el bioensayo y distintas variables de trigo determinadas en condiciones de campo.

Variable de campo en Trigo	Variable de bioensayo					
	Altura trigo		Biomasa trigo		Longitud raíz cebada	
	r ³	p valor	r ³	p valor	r ³	p valor
Fitotoxicidad ¹	-0,55	0,0001	-0,47	0,0013	-0,64	2,78 e ⁻⁷
Altura ²	0,51	0,0004	0,56	<0,0001	0,68	2,33 e ⁻⁷
Biomasa ²	0,58	<0,0001	0,59	<0,0001	0,66	7,8 e ⁻⁷
Rendimiento	0,24	0,11	0,32	0,03	0,43	0,002

¹ Determinada a los 71 DDS en condiciones de campo; ² Determinada a los 104 DDS en condiciones de campo; ³ Coeficiente de correlación de Pearson.

De ambas matrices se puede concluir que, en cebada, la longitud de raíz fue la variable que mejor correlacionó con las variables de campo. En trigo, la altura y la biomasa determinadas en el BIOCC, presentaron leves asociaciones con la fitotoxicidad, la biomasa y la altura en condiciones de campo. Asimismo la longitud de raíz de cebada también presentó buenas correlaciones con la altura, la biomasa y la fitotoxicidad de trigo (Tabla 25). De tal forma, esta variable puede ser utilizada para detectar problemas de residualidad en condiciones de campo, en cebada, así como, en trigo. No obstante, el grado de correlación entre la longitud de raíz de cebada y la variable de campo, depende de cuan sensible sea la variable a predecir.

Se concluye que el BIOCC permitió detectar secuencias que causaron fitotoxicidad en trigo y cebada en condiciones de campo. Al igual que en esta experimentación, Geisel *et al.* (2008) a través del uso de bioensayos también pudieron determinar efectos fitotóxicos por aplicaciones en secuencia de herbicidas inhibidores de la ALS.

Sin embargo, en este estudio, no todas las variables cuantificadas tuvieron una asociación robusta con las variables de campo. Posiblemente, los BIOCC sobreestimaron los daños de los herbicidas presentes en el suelo, porque se modifican las condiciones ambientales respecto de la situación en el campo. El mantenimiento de los suelos con humedad y una mayor temperatura puede generar una mayor disponibilidad del herbicida debido a la desorción desde los sitios de unión al suelo (Riddle, 2012). Otra razón posible es que la toma de las muestras de suelo, es previa a la siembra, y una vez tomada la muestra, en condiciones de campo continua la degradación química y microbiana de los herbicidas, y además, las raíces de los cultivos pueden escapar de la zona donde se concentran los herbicidas (Watson y Checkel, 2005) lo cual puede modificar el impacto sobre los cultivos. Asimismo la profundidad de suelo muestreada es de 0-20 cm, sin considerar estratos de suelo más profundos, donde, posiblemente puedan quedar residuos de herbicidas. De esta forma resulta difícil predecir pérdidas de rendimiento en cultivos a través de un BIOCC.

CONCLUSIONES

Con los datos obtenidos de un año y medio de experimentación en la localidad de Balcarce y bajo las condiciones ambientales de la campaña 2014-2015 y 2015-2016, se concluye que:

Hipótesis 1-El rendimiento de soja no es afectado por ninguna secuencia de herbicidas inhibidores de la ALS aplicados en el barbecho y/o post-emergencia, independientemente de que pudiesen ocasionar fitotoxicidad en el cultivo.

Se acepta la Hipótesis 1. Las secuencias de herbicidas inhibidores de la ALS causaron fitotoxicidad sobre el cultivo de soja sin afectar el rendimiento del cultivo.

Hipótesis 2-El cultivo de cebada cervecera es más sensible que el trigo a igual secuencia de aplicación de herbicidas inhibidores de la ALS.

Se acepta la Hipótesis 2. El cultivo de cebada resultó más sensible a los residuos de herbicidas inhibidores de la ALS generados por las aplicaciones en secuencia. Se observó mayor fitotoxicidad, mayor atraso fenológico, mayor reducción de biomasa y mayores pérdidas de rendimiento respecto del cultivo de trigo.

Hipótesis 3- La fitotoxicidad en cebada y trigo es mayor en aquellas secuencias que utilizan en la fase de barbecho corto de soja, postemergencia de soja y barbecho invernal, tres herbicidas inhibidores de la ALS, respecto de las que utilizan uno o dos herbicidas dependiendo de los ingredientes activos considerados.

Se acepta la Hipótesis 3. A mayor cantidad de herbicidas inhibidores de la ALS aplicados, se registraron mayores daños fitotóxicos sobre los cultivos invernales. Se evidenció la acumulación de residuos herbicidas en el suelo, por un aumento de daños sobre los cultivos, pero dependió de los herbicidas utilizados.

Hipótesis 4- En secuencias con igual número de herbicidas aplicados, la fitotoxicidad en cebada y trigo es mayor cuando se utilizan herbicidas de mayor persistencia.

Se acepta la Hipótesis 4. Para secuencias con igual cantidad de herbicidas, la inclusión de ingredientes activos más persistentes causó mayor daño por fitotoxicidad. Imazetapir y Diclosulam resultaron más fitotóxicos que Clorimuron.

Hipótesis 5. La residualidad de las secuencias herbicidas reduce la tasa de crecimiento de cebada y trigo durante el período crítico de definición del rendimiento, respecto de cada secuencia testigo.

Se acepta la hipótesis 5. Las secuencias herbicidas que causaron daños fitotóxicos afectaron la tasa de crecimiento durante el período crítico de trigo y cebada respecto de sus tratamientos testigos. La caída en la tasa de crecimiento de cebada fue mayor respecto de la de trigo.

Hipótesis 6- Los bioensayos predicen la fitotoxicidad de aplicaciones secuenciales de herbicidas inhibidores de la ALS en trigo y cebada sembrados a campo.

Se acepta la hipótesis 6. Los bioensayos resultaron predictivos de los problemas de residualidad observados en condiciones de campo.

Otras consideraciones:

- Se comprobó que existió la acumulación de residuos herbicidas inhibidores de la ALS en el suelo en un corto período de tiempo, manifestado a través de un incremento en la fitotoxicidad sobre los cultivos. Si bien en soja no se manifestó pérdida de rendimiento, existió fitotoxicidad sobre el cultivo y los daños en los cultivos invernales se incrementaron drásticamente. Las secuencias que combinaron Diclosulam e Imazetapir mostraron una fuerte fitotoxicidad sobre los cultivos invernales en condiciones de campo y de bioensayo. Se debería continuar investigando el tipo de interacción entre los residuos herbicidas de diferentes ia. También debe generarse información local sobre las consecuencias de aplicar en forma repetida herbicidas del mismo modo de acción para evitar pérdidas importantes de rendimiento en cultivos sensibles.

Aportes relevantes:

- Existen escasos estudios de acumulación de herbicidas en los que se haya realizado una comparación conjunta de los cultivos de trigo y cebada en un mismo ambiente y condición experimental. Este estudio permitió determinar diferencias en sensibilidad a residuos herbicidas entre cultivos y a su vez,

conocer cuál o cuáles son los componentes del rendimiento que más son afectados.

- Los resultados obtenidos en trigo y cebada aportan valiosos mensajes para la toma de decisiones en rotaciones de soja/cultivos invernales ante el uso de herbicidas de acción residual.
- Es uno de los pocos estudios que integra y relaciona conceptos de residualidad herbicida y de ecofisiología de cultivos.

Futuras investigaciones:

- Resultó evidente que los herbicidas inhibidores de la ALS se acumulan en el suelo cuando se realizan aplicaciones en secuencia. Sería interesante explorar el tipo de interacción (aditiva o sinérgica) que existe entre los activos herbicidas.
- Asimismo se plantea la necesidad de determinar diferencias en la sensibilidad a residuos herbicidas entre cultivares de una misma especie.
- Se debería ampliar el enfoque ecofisiológico sobre los cultivos en estudios de residualidad herbicida.
- En futuras experimentaciones, se debería generar información adicional a este estudio sobre los resultados de los bioensayos y los resultados productivos en condiciones de campo.

BIBLIOGRAFÍA

- ABBATE, P.E.; ANDRADE, F.H.; CULOT, J.P. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grain in wheat. *The Journal of Agricultural Science, Cambridge*. 124(3): 351-360.
- ABELED0, L.G.; CALDERINI, D.F.; SLAFER, G.A. 2003. Genetic improvement of barley yield potential and its physiological determinants in Argentina (1944–1998). *Euphytica*. 130(3): 325–334.
- ADCOCK, T.E.; BANKS, P.A. 1991. Effects of chlorimuron on soybean (*Glycine max*) and sicklepod (*Cassia obtusifolia*) as influenced by application timing. *Weed Science*. 39 (2):139-142.
- ALISTER, C.; KOGAN, M. 2005. Efficacy of imidazolinone herbicides applied to imidazolinone-resistant maize and their carryover effect on rotational crops. *Crop protection*. 24(4): 375-379.
- AL-KHATIB, K.; PETERSON, D. 1999. Soybean (*Glycine max*) response to simulated drift from selected sulfonylurea herbicides, dicamba, glyphosate and glufosinate. *Weed Technology*. 13(2): 264-270.
- ALONSO-PRADOS, J.L.; HERNANDEZ-SEVILLANO, E.; LLANOS, S.; VILLAROYA, M.; GARCIA-BAUDIN, J.M. 2002. Effects of sulfosulfuron soil residues on barley (*Hordeum vulgare*), sunflower (*Helianthus annuus*) and common vetch (*Vicia sativa*). *Crop Protection*. 21(10): 1061:1066.
- ANDERSON, J.P.E. 1981. Soil moisture and the rates of biodegradation of diallate and triallate. *Soil Biology and Biochemistry*. 13(2): 155-161.
- ANDRADE, F. H. 1995. Analysis for growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*. 41(1): 1-12.
- ANDRADE, F.H.; AGUIRREZÁBAL, L.A.N.; RIZALLI, R.H. 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. En Andrade, F.H.; Sadras, V.O. (eds.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. E.E.A. Balcarce INTA-FCA, UNMdP. Balcarce, Argentina. pp. 61-96.
- ARREGUI, M.C.; PURICELLI, E. 2008. *Mecanismos de acción de plaguicidas*. ISBN: 978-987-05-4191-2. Acquantic, Rosario, Argentina. 208 p.
- ARREGUI, M.C.; SCOTTA, R.; SANCHEZ, D. 2005. Improved weed control with broadleaved herbicides in glyphosate-tolerant soybean (*Glycine max*). *Crop Protection*. 25(7): 653-656.
- ASKEW, S.D.; WILCUT, J.W.; LANGSTON, V.B. 1999. Weed management in soybean (*Glycine max*) with preplant-incorporated herbicides and cloransulam-methyl. *Weed Technology*. 13 (2): 276-282.
- AVENDAÑO M., BIROLO J.M., BEDMAR F. 2006. Residualidad de herbicidas sulfonilureas aplicados en barbechos destinados a siembra de girasol, soja o maíz. Seminario de Actualización Técnica Manejo de Malezas, Ed. INIA, Uruguay, Serie de Actividades de Difusión 465: 15-16.

- BALL, D.A.; YENISH, J.P.; ALBY, T. 2003. Effect of imazamox soil persistence on dryland rotational crops. *Weed Technology*. 17(1): 161-165.
- BAHRAMPOR, T.; SHARIFI ZIVEH, P. 2013. Effects of residue sulfonylurea herbicide on wheat. *International Journal of Agronomy and Plant Production*.4 (10): 2707-2713.
- BEDMAR, F.; PERDIGÓN, J.A.; MOTERUBBIANESI, M.A. 2006. Residual phytotoxicity and persistence of chlorimuron and metsulfuron in soils of Argentina. *Journal of Environmental Biology*. 27 (2):175-179.
- BEDMAR, F.; GIANELLI, V. 2012. Efectos residuales de onduy y lightning sobre cultivos de invierno y forrajeras. Concurso premio Top Ciencia, BASF 12 y 13 de julio de 2012.
- BEDMAR, F.; GIANELLI, V. 2014. Comportamiento de los herbicidas en el suelo. En Fernandez, O.A.; Leguizamón, E.S.; Acciaresi, H.A. (eds). *Malezas e Invasoras de la Argentina*. Ed. Tomo I: ecología y manejo, 2014. Ed Universidad nacional de Sur. pp 361-389.
- BLAIR, A. M.; MARTIN, T. D. 1988. A review of the activity, fate and mode of action of sulfonylurea herbicides. *Pesticide Science*. 22(3): 195-219.
- BLEIHOLDER, H., 1996. Métodos de planeamiento y valoración de ensayos de campo con pesticidas. BASF, Linburgerhof. 397 p.
- BOARD, J.E.; TAN, Q. 1995. Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. *Crop Science*. 35(3):846-851.
- BOARD, J. 2000. Light interception efficiency and light quality affect yield compensation of soybean at low plant populations. *Crop Science*. 40(5):1285-1294.
- BOARD, J. E; MODALI, H. 2005. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. *Crop Science*. 45(5): 1790-1799.
- BORRAS, L; SLAFER, G.A.; OTEGUI, M.E. 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Research*. 86 (2): 131-146.
- BROWN, H.M. 1990. Mode of action, crop selectivity, and soil relations of the sulfonylureas herbicides. *Pest Management Science*. 29(3): 263-281.
- BROWN, H. M.; WITTENBACH, V. A.; FORNEY, D.R.Y STRACHAN, S.D. 1990. Basis for soybean tolerance to thiensulfurón methyl. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 37(3): 303-313.
- BUHLER, D.D.; PROOST, R.T. 1992. Influence of application time on bioactivity of imazethapyr in no-tillage soybean (*Glycine max*). *Weed Science*. 40 (1):122-126.

- CÁMARA DE SANIDAD AGROPECUARIA Y FERTILIZANTES, CASAFE 2015/2017. Versión Digital de la Guía de Productos Fitosanitarios - CASAFE - Edición 2015/2017 ISBN: 978-987-1563-08-1.
- CANTWELL, J.R.; LIEBL, R.A.; SLIFE, F.W. 1989. Biodegradation characteristics of imazaquin and imazethapyr. *Weed Science*. 37(6): 815-819.
- CERVELLINI, J.M.; FANTINI, F.G. 2015. Carryover de imidazolinonas aplicadas en el cultivo de girasol sobre cereales de invierno. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Facultad de agronomía. Universidad Nacional de La Pampa. 15 p.
- COLE, T.A.; WEHTJE, G.; WILCUT, J.W.; VINT HICKS, T. 1989. Behavior of imazethapyr in soybeans (*Glycine max*), peanuts (*Arachis hypogaea*), and selected weeds. *Weed Science*. 37(5):639-644.
- COLE, D.; PALLET, K; RODGERS, M. 2000. Discovering new modes of action for herbicides and the impact of genomics. *Pesticide Outlook*. 11(6): 223–229.
- COLE, D.J. 1994. Detoxification and activation of agrochemicals in plants. *Pest Management Science*. 42(3): 209-222.
- CORRIGAN, K.A.; HARVEY, R.G. 2000. Glyphosate with and without residual herbicides in no-till glyphosate-resistant soybean (*Glycine max*). *Weed Technology*. 14(3):569-577.
- COX, W.J.; JOLIFF, G.D., 1986. Growth and yield of sunflower and soybean under soil water deficits. *Agronomy Journal*. 78(2): 226-230.
- DARDANELLI, J.L.; BACHMEIER, O.A.; SERENO, R.; GIL, R.C. 1997. Potential soil water extraction parameters for several crops in a silty loam soil. *Field Crops Research*. 54: 29-38.
- DEVLIN, D.L.; PETERSON, D.E.; REGEHR, D.L. 1992. Residual herbicides, degradation, and recropping intervals. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. 11 p.
- DIEHL, K.E.; STOLEER, E.W.; BARRETT, M. 1995. In vivo and in vitro inhibition of nicosulfuron metabolism by terbufos metabolites in maize. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 51(2): 137-149.
- DIPIANO, A.V.; WAIMANN, E.A. 2015. Evaluación del efecto carryover de clearsol y clearsol plus sobre avena, trigo y cebada. Tesis de Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de La Pampa, Argentina. 19 p.
- EGLI, D.B. 1988. Alterations in plant growth and dry matter distribution in Soybean. *Agronomy Journal*. 80 (1): 86-90.
- EGLI, D. E.; ZHEN-WEN, Y. 1991. Crop growth rate and seeds per unit area in soybean. *Crop Science*. 31 (2): 439-442.
- EGLI, D.B. 1998. Seed biology and the yield of grain crops.' (CAB International: Oxford).

- EDWARDS, J.T.; PURCELL, L.C. 2005. Light interception and yield response of ultra-short-season soybean to diphenylether herbicides in the Midsouthern United States. *Weed Technology*. 19(1):168-175.
- FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Special Report, 80. 11p.
- FREAR, D.S.; SWANSON, H.R., TANAKA, F.S. 1993. Metabolism of flumetsulam (DE-498) in wheat, corn and barley. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 45(3):178-192.
- FUESLER, T.P.; HANAFEY, M.K. 1990. Effect of moisture on chlorimuron degradation in soil. *Weed Science*. 38 (3):256-261.
- GEISEL, B. 2007. The phytotoxic effect of ALS inhibiting herbicide combinations in prairie soils. *Magister Scientiae* thesis, Department of Plant Sciences, University of Saskatchewan. Canadá. 67p.
- GEISEL, B.; SCHOENAU, J.J.; HOLM, F.A.; JOHNSON, E.N. 2008. Interactions of ALS-inhibiting herbicide residues in three prairie soils. *Weed Science*. 56(4):624-627.
- GIAYETTO, O; CERIONI, G.A.; FERNANDEZ, E.M.; MORLA, F.D.; ROSSO, M.B.; VIOLANTE, M. G.; KEARNEY, M.I.T.; PASTORE, M.E. 2015. Comportamiento de genotipos de soja cultivados en seco y bajo riego en Río Cuarto. En actas del 7° congreso brasileiro de soja, Florianópolis, Santa Catalina, Brasil. 22 al 25 de junio. s.p.
- GOETZ, A. J.; LAVY, T. L.; GBUR, E.E. 1990. Degradation and field persistence of imazethapyr. *Weed Science*. 38(4-5): 421-428.
- GREENLAND, R.G. 2003. Injury to vegetable crops from herbicides applied in previous years. *Weed technology*. 17(1):73-78.
- GUNSOLUS, J.L.; CURRAN, W.S. 2007. Herbicide mode of action and injury symptoms. *Urbana* 51 (61801): 217-333.
- HAGOOD, Jr., E.S.; WILLIAMS, Jr., J.L.; BAUMAN, T.T. 1980. Influence of herbicide injury on the yield potential of soybeans (*Glycine max*). *Weed Science*. 28(1):40-45.
- HALL, L; BECKIE, H.; WOLF, T.M. 1999. How herbicides work: biology to application. Alberta agriculture, Food and Rural Development, Edmonton. 133 pp.
- HART, S.E.; ROSKAMP, G.K. 1998. Soybean (*Glycine max*) response to thifensulfuron and bentazon combinations. *Weed Technology*. 12 (1):179-184.
- HATTON, P.J.; DIXON, D.; COLE, D.J.; EDWARDS, R. 1996 Glutathione transferase activities and herbicide selectivity in maize and associated weed species. *Pest Management Science*. 46(3):267-275.
- HELLING, S.C. 2005. The science of soil residual herbicides. En Van Acker, R.C. (ed). *Soil Residual Herbicides: Science and Management*. Topics in Canadian

Weed Science, Volume 3. Sainte-Anne-de Bellevue, Québec: Canadian Weed Science Society – Société canadienne de malherbiologie. pp 3-22.

- ISTILART, C.M. 2005. Residualidad de Imidazolinonas sobre cereales de invierno. Tercer Congreso Argentino de Girasol, ASAGIR. 31 de mayo y 1º de junio de 2005. Buenos Aires. o INTA , Argentina. (en línea) < <http://www.inta.gob.ar>>. [Consulta: Diciembre de 2016]
- IVANY, J. A. 1987. Metsulfuron use in barley and residual effect on succeeding crops. Canadian Journal of Plant Science. 67(4): 1083-1088.
- JABUSCH, T.W.; TJEERDEMA, R.S. 2008. Chemistry and fate of triazolopyrimidine-sulfonamide herbicides. Environmental Contamination Toxicology. 193: 31-52.
- JAMES, T.K.; RAHMAN, A.; MELLISOP, J.M.; TROLOVE, M. 2004. Effect of rainfall on the movement and persistence of Metsulfuron-methyl and clopyralid applied to pasture. New Zealand Plant Protection, 57: 271- 276.
- JOHNSON, B.F.; BAILEY, W.A.; WILSON, H.P. HOLSHOUSER, D.L.; HERBERT JR., D.A.; HINES, T.E. 2002. Herbicide effects on visible injury, leaf area, and yield of glyphosate-resistant soybean (*Glycine max*). Weed Technology. 16(3):554-566.
- JOHNSON, E.N.; MOYER, J.R.; GORDON THOMAS, A.; LEESON, J.Y.; HOLM, F.; SAPSFORD, K.L.; CHOENEAU J.J.; SZMIEGIELSKI, A.M. ; HALL, L.M. ; KUCHURAN, M.E. ; HORNFORDE, R.G. 2005. Do repeated applications of residual herbicides result in herbicide stacking ? En Van Acker, R.C. (eds). The science of soil residual herbicide. Soil Residual Herbicides: Science and Management. Topics in Canadian Weed Science, Volume 3. Sainte-Anne-de Bellevue, Québec: Canadian Weed Science Society – Société canadienne de malherbiologie. 53-70 p.
- KAPUSTA, G. ; JACKSON, L.A. ; MASON, D.S. 1986. Yield response of weed-free soybeans (*Glycine max*) to injury from postemergence broadleaf herbicides. Weed Science. 34(2):304–307.
- KAPUSTA, G. ; KRAUSZ, R.F. 1992. Interaction of terbufos and nicosulfuron on corn (*Zea mays*). Weed Technology. 6: 999-1003.
- KRAUSZ, R. F.; KAPUSTA, G. ; KNAKE, E. L. 1992. Soybean (*Glycine max*) and rotation crop tolerance to chlorimuron, clomazone, imazaquin and imazethapyr. Weed Technology. 6(1): 77-80.
- KRAUSZ, R.F. ; KAPUSTA, G. ; MATTHEWS, J.L. 1994. Soybean (*Glycine max*) and rotational crop response to PPI chlorimuron, clomazone, imazaquin, and imazethapyr. Weed technology. 8 (2): 224-230.
- KRAUSZ, R.F.; YOUNG, B.G. 2001. Response of double-crop glyphosate-resistant soybean (*Glycine max*) to broadleaf herbicides. Weed Technology. 15(2): 300-305.
- LEGUIZAMÓN E.S. 2014. Determinación de un herbicida en tejidos vegetales o en el suelo. En Fernandez, O.A.; Leguizamón, E.S.; Acciaresi, H.A. (eds). En

Malezas e Invasoras de la Argentina. Ed. Tomo I: ecología y manejo. Ed Universidad Nacional del Sur. Caja conceptual N°2. pp 927-928.

- LEMERLE, D.; COUSENS, R.D. 1993. Responses of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) and spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to foliar or root entry of chlorsulfuron. *Weed Research*. 33(4): 335-344.
- MAURICE, D.C. 2005. Managing soil residual herbicide use in western Canada. En Van Acker, R.C. 2005. Soil Residual Herbicides: Science and Management. Topics in Canadian Weed Science, Volume 3. Sainte-Anne-de Bellevue, Québec: Canadian Weed Science Society – Société canadienne de malherbologie. 125 p.
- MILLS, J.A.; WITT, W.W. 1989. Efficacy, phytotoxicity, and persistence of imazaquin, imazethapyr, and clomazone in no-till double-crop soybeans (*Glycine max*). *Weed Science*. 37 (3): 353-359.
- MIRALLES, D.J.; ARISNABARRETA, S.; ALZUETA, I. 2011. Desarrollo ontogénico y generación del rendimiento. En Miralles, D.J.; Benech-Arnold, R.L.; Abeledo, L.G. (eds) Cebada cervecera. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. pp 1-34.
- MOLINO, J. 2011. Estrés térmico por alta temperatura en soja (*Glycine max* (L.) Merr.): análisis de la dinámica de producción y fijación de vainas y su efecto sobre la determinación del rendimiento. Tesis de *Magister Scientiae*. Universidad de Buenos Aires. 66 p.
- MOREYRA, F. 2012. Determinación del rendimiento en cultivares de cebada cervecera. Tesis de *Magister Scientiae*, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Noviembre 2012. 74 pp.
- MOSELEY, C.; HATZIOS, K.K.; HAGOOD, E.S. 1993. Uptake, translocation and metabolism of chlorimuron in soybean (*Glycine max*) and Morningglory (*Ipomoea spp.*). *Weed Technology*. 7(2):343-348.
- MOYER, J.R. 1995. Sulfonylurea herbicide effects on following crops. *Weed Technology*. 9(2): 373–379.
- MOYER, J.R.; HAMMAN, W.M. 2001. Factors affecting the toxicity of MON 37500 residues to following crops. *Weed Technology*. 15(1): 42-47.
- MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; PENGELLY, B.C. 1993. Radiation-use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions. *Field Crops Research*. 32(1-2): 1-16
- MUELLER, T.C.; SENSEMAN, S.A. 2015. Methods related to herbicide dissipation or degradation under field and laboratory conditions. *Weed Science*. 63 (Special Issue 1): 133-139.
- NASH, R.G. 1981. Phytotoxic interaction studies – techniques for evaluation and presentation of results. *Weed Science*. 29: 147-155.

- NELSON, K.A.; RENNER, K.A. 1998. Weed control in wide and narrow row soybean (*Glycine max*) with imazamox, imazethapyr, and CGA-277476 plus quizalofop. *Weed Technology*. 12 (1): 137-144.
- NEWSOM, L. J.; SHAW, D.R. 1992. Soybean (*Glycine max*) response to chlorimuron and imazaquin as influenced by soil moisture. *Weed Technology*. 6 (2): 389-395.
- O' SULLIVAN, J, THOMAS, R.J.; BOUW, W.J. 1998. Effect of imazethapyr and imazamox soil residues on several vegetable crops grown in Ontario. *Canadian Journal of Plant Science*. 78(4): 747-651.
- PAUL, R.; SHARMA, R.; KULSHRESTHAA, G.; BALA SINGHA, S. 2009. Analysis of metsulfuron-methyl residues in wheat field soil: a comparison of HPLC and bioassay techniques. *Pest Management Science*. 65(9): 963–968.
- PAPA, J.C.; CIAMPITTI, I.A. 2009. Identificación y manejo de malezas. En: Garcia, F. O.; Ciampitti, I.A.; Baigarri, H.E. (eds). *Manual de manejo del cultivo de soja*. Agroeditorial Alejandro Matthiess. pp.77-98
- PAPA, J.C.; MASSARO, R. 2005. Herbicida Metsulfuron metil en barbechos químicos. Información técnica de trigo, campaña 2005. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Publicación miscelánea N° 103, pp 54-56.
- PEDERSEN, P.; LAUER, J.G. 2004. Soybean growth and development in various management systems and planting dates. *Crop Science*. 44(2): 508-515.
- PINTO DE CARVALHO, S.J.; NICOLAI, M.; ROFRIGUES FERREIRA, R.; VARGAS DE OLIVEIRA FIGUEIRA, A.; CHRISTOFFOLETI, P. J. 2009. Herbicide selectivity by differential metabolism: considerations for reducing crop damages. *Science Agriculture*. 66(1):136-142.
- PROSTKO, E.P.; MAJEK, B.A.; INGERSON-MAHAR, J. 1996. The effect of chlorimuron/linuron combinations on soybean (*Glycine max*) growth and yield. *Weed Technology*. 10(3):519-521.
- PONS, N.; BARRIUSO, E. 1998. Fate of metsulfuron-methyl in soils in relation to pedo-climatic conditions. *Pesticide Science*. 53(4): 311-323.
- RABAEY, T.L.; HARVEY, R.G. 1997. Sweet corn (*Zea mays*) hybrids respond differently to simulated imazethapyr carryover. *Weed Technology*. 11(1): 92-97.
- R CORE TEAM. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. [Consulta: Agosto 2015]
- REDDY, K. N. 2000. Weed control in soybean (*Glycine max*) with cloransulam and diclosulam. *Weed Technology*. 14(2):293-297.

- RIDDLE, R.N. 2012. Field and greenhouse bioassays to determine rotational crop response to mesotrione residues. Thesis Master of Science in Crop Science. The University of Guelph. Guelph, Ontario, Canadá. 94p.
- RITTER, R. L.; HARRIS, T. C. Y KAUFMAN, L. M. 1988. Chlorsulfuron and metsulfuron residues on double-cropped soybeans (*Glycine max*). Weed Science. 2(1): 49-52.
- ROBERTS, T. R. 1996. Assessing the fate of agrochemicals. Journal of Environmental Science and Health. Part B, 31 (3): 325-335.
- ROBINSON, A.P.; DAVIS, V.M.; SIMPSON, D.M.; JOHNSON, W.G. 2013. Response of soybean yield components to 2,4-D. Weed Science. 61(1): 68-76.
- ROBINSON, D.E. 2008. Atrazine accentuates carryover injury from mesotrione in vegetable crops. Weed Technology. 22(4):641-645.
- ROBINSON, D. E.; SOLTANI, N.; SIKKEMA, P.H. 2006. Response of various market classes of dry bean (*Phaseolus vulgaris*) to foramsulfuron, isoxaflutole, and isoxaflutole plus atrazine applied in previous years. Weed Technology. 20(3):558-563.
- ROCHETTE, P.; DESJARDINS, R.L.; PATTEY, E.; LESSARD, R. 1995. Crop net carbon dioxide exchange rate and radiation use efficiency in Soybean. Agronomy Journal. 87(1):22-28.
- SADRAS, V.O. 2007. Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. Field Crops Research. 100 (2): 125-138.
- SALAMANCO, N. 2011. Efecto de la aplicación de herbicidas en barbechos de invierno sobre el rendimiento y variables reproductivas del cultivo de soja. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Marzo, 2011. 36 p.
- SALZMAN, E.P.; RENNER, K.A. 1992. Response of soybean to combinations of clomazone, metribuzin, linuron, alachlor, and atrazine. Weed Technology. 6:922-929.
- SANCHEZ, D.; ARREGUI, M.C.; SCOTTA, R.R.; LUTZ, A. 2011. Fitotoxicidad por Metsulfuron metil y 2,4-D empleados en barbechos químico en soja. Actas 5° Congreso de la soja del Mercosur. Rosario, Argentina, 14 al 16 de septiembre de 2011. s.p.
- SCHMITZ, G. L.; WITT, W. W.; MUELLER, T.C. 2001. The effect of wheat (*Triticum aestivum*) straw levels on chlorimuron, imazaquin, and imazethapyr dissipation and interception. Weed technology. 15(1): 129-136.
- SHANER, D. L.; ANDERSON, P.C.; STIDHAM, M. A. 1984. Imidazolinones potent inhibitors of acetohydroxyacid synthase. Plant Physiology. 76(2): 545-546.
- SHANER, D.L. (ed) 2014. Herbicide handbook. 10 th ed. Weed Science Society of America, Lawrence, KS, USA. 513 p.

- SHAW, D.R.; BENNETT, A.C.; GRANT, D.L. 1999. Weed control in soybean (*Glycine max*) with flumetsulam, cloransulam, and diclosulam. *Weed Technology*. 13 (4): 791-798.
- SHAW, D. R.; WIXSON, M.B. 1991. Combinations of imazaquin or imazethapyr with AC 263,222 for weed control in soybean (*Glycine max*). *Weed Science*. 39 (4): 644-649.
- SIKKEMA, P.H.; ROBINSON, D.E. 2005. Residual herbicides: An integral component of weed management systems in Eastern Canada. En Van Acker, R.C. *Soil Residual Herbicides: Science and Management. Topics in Canadian Weed Science, Volume 3*. Sainte-Anne-de Bellevue, Québec: Canadian Weed Science Society – Société canadienne de malherbologie. 89-99 p.
- SIMPSON, D.M.; STOLLER, E.W. 1996. Thifensulfuron and imazethapyr interaction at the ALS enzyme in sulfonylurea-tolerant Soybean (*Glycine max*). *Weed Science*. 44 (4): 763-768.
- SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. 1999. Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy*. 65:215-265.
- SLAFER, G. A.; MIRALLES, D.J.; SAVIN, R.; WHITECHURCH, E. M.; GONZALEZ, F.G. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en trigo. En Satorre, E. H.; Benech Arnold, R.L.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J. Otegui, M.E.; Savin, R.(eds). *Producción de grano, bases funcionales para su manejo*. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. ISBN 950-29-0713-2. pp 101-29.
- SOLTANI, N.; SIKKEMA, P.H.; ROBINSON, D.E. 2005. Effect of foramsulfuron and isoxaflutole residues on rotational vegetable crops. *HortScience*. 40(3):620–622.
- SUZER, S.; BUYUK, H. 2010. Residual effects of spraying imidazolinone-family herbicides on Clearfield® sunflower production from the point of view of crop rotation. *Helia*. 33(52): 25-35.
- SWANTEK, J. M.; SNELLER, C.H.; OLIVER, L.R. 1998. Evaluation of soybean injury from sulfentrazone and inheritance of tolerance. *Weed Science*. 46 (2): 271-277.
- TAN, S.; EVANS, R.; SINGH, B. 2006. Herbicidal inhibitors of amino acid biosynthesis and herbicide-tolerant crops. *Amino Acids*. 30(2): 195–204.
- TECLE, B.; DA CUNHA, A.; SHANER, D.L. 1993. Differential routes of metabolism of imidazolinones : basis for soybean (*Glycine max*) selectivity. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 46(2): 120-130.
- TRUELOVE, B. 1977. *Research methods in weed science*. Second edition. Auburn Printing, Inc., Auburn, Alabama. 1977. pp 19.
- VANGESSEL, M.J.; AYENI, A.O. Y MAJEK, B. A. 2001. Glyphosate in Double-Crop No-Till Glyphosate-Resistant Soybean: Role of Preplant Applications and Residual Herbicides. *Weed Technology*, 15(4):703-713.

- VICARI, A.; CATIZONE, P.; ZIMDAHL, R.L. 1994. Persistence and mobility of chlorsulfuron and metsulfuron under different soil and climatic conditions. *Weed Research*. 34(3):149-155.
- VIDRINE, P.R.; GRIFFIN, J.L.; BLOUIN, D.C. 2002. Evaluation of reduced rates of glyphosate and chlorimuron in glyphosate-resistant soybean (*Glycine max*). *Weed Technology*. 16 (4):731-736.
- VIGNA, M.R.; PAPA, J.C.; PONSÁ, J.C.; BEDMAR, F.; GUEVARA, G.; RAINERO, H.; OLEA, I.; GIGÓN, R.; ISTILART, C.; LÓPEZ, R.; ARGUISSAIN, G.G.; PICAPIETRA, G. 2014. El control químico de malezas en cultivos extensivos. En Fernandez, O.A.; Leguizamón, E.S.; Acciaresi, H.A.(eds). *Malezas e Invasoras de la Argentina*. Tomo I: ecología y manejo. Ed Universidad Nacional del Sur. pp.574- 589
- VISCHETTI, C. 1995. Measured and simulated persistence of imazethapyr in soil. *Environmental Contamination and Toxicology*. 54(3): 420-427.
- WALKER, A.; WELCH, S.J. 1989. The relative movement and persistence in soil of chlorsulfuron, metsulfuron-methyl and triasulfuron. *Weed research*. 29(5): 375-383.
- WALSH, J.D.; DEFELICE, M.S.; SIMS, B.D.1993. Soybean (*Glycine max*) herbicide carryover to grain and fiber crops. *Weed Technology*. 7 (3): 625-632.
- WATSON, P.R.; CHECKEL, S. 2005. Soil residual herbicide bioassays: Science and practice. The science of soil residual herbicide (71-79). En VAN ACKER, R.C. 2005. *Soil Residual Herbicides: Science and Management*. Topics in Canadian Weed Science, Volume 3. Sainte-Anne-de Bellevue, Québec: Canadian Weed Science Society – Société canadienne de malherbologie. 125 p.
- WATTS, J. R.; MURDOCK, E.C.; STAPLETON, G.S.; TOLER, J.E. 1997. Sicklepod (*Senna obtusifolia*) control in soybean (*Glycine max*) with single and sequential herbicide applications. *Weed technology*. 11 (1): 157-163.
- WEIDENHAMER, J.D; TRIPLETT, G.B. Y SOBOTKA, F.E. 1989. Dicamba injury to soybean. *Agronomy Journal*. 81(4): 637-643.
- WHITCOMB, C.E. 1999. An introduction to ALS-inhibiting herbicides. *Toxicology and Industrial Health*. 15 (1): 232-240.
- WILCUT, J. W.; WEHTJE, G. R.; PATTERSON, M. G.; COLE, T. A.; VINT HICKS, T. 1989. Absorption, translocation, and metabolism of foliar-applied chlorimuron in soybeans (*Glycine max*), peanuts (*Arachis hypogaea*), and selected weeds. *Weed Science*. 37(2): 175-180.
- WIXSON, M.B.; SHAW, D.R. 1992. Effects of soil- applied AC 263,222 on crops rotated with soybean (*Glycine max*). *Weed Technology*. 6 (2): 276-279.
- YOUNG, B. G., YOUNG, J.M.; MATTHEWS, J.L.; OWEN, M.D.; ZELAYA, I.A.; HARTZLER, R.G.; WAX, L.M.; ROEM, K.W.; BOLLERO, G.A.. 2003.

Soybean development and yield as affected by three postemergence herbicides. *Agronomy Journal*. 95(5):1152–1156.

ZABIK, J.M.; VAN WESENBEECK, I.J.; PEACOCK, A.; KENNARD, L.M.; ROBERTS, D.W. 2001. Terrestrial field dissipation of Diclosulam at four sites in the United States. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49(7): 3284–3290.

ZADOKS, J.C.; CHANG, T.T.; KONZAK, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*. 14(6): 415-421.

ZHANG, J.; HAMILL, A. S.; WEAVER, S. E. 1995. Antagonism and synergism between herbicides: trends from previous studies. *Weed technology*. 9 (1): 86-90.

APÉNDICE

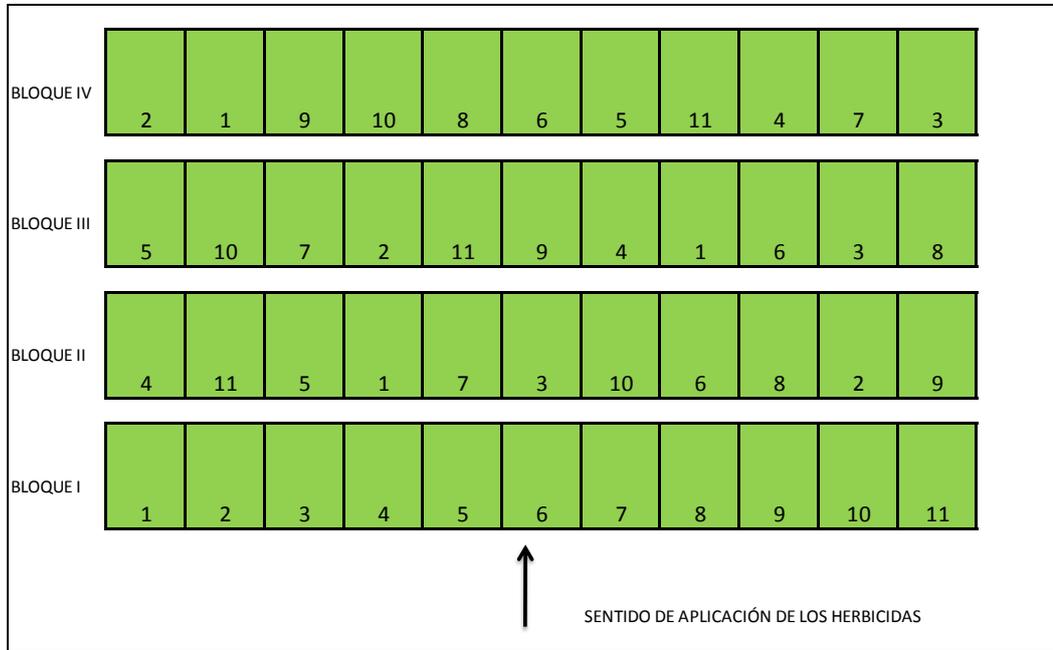


Figura I. Diagrama de campo del ensayo para la fase experimental barbecho químico/soja.

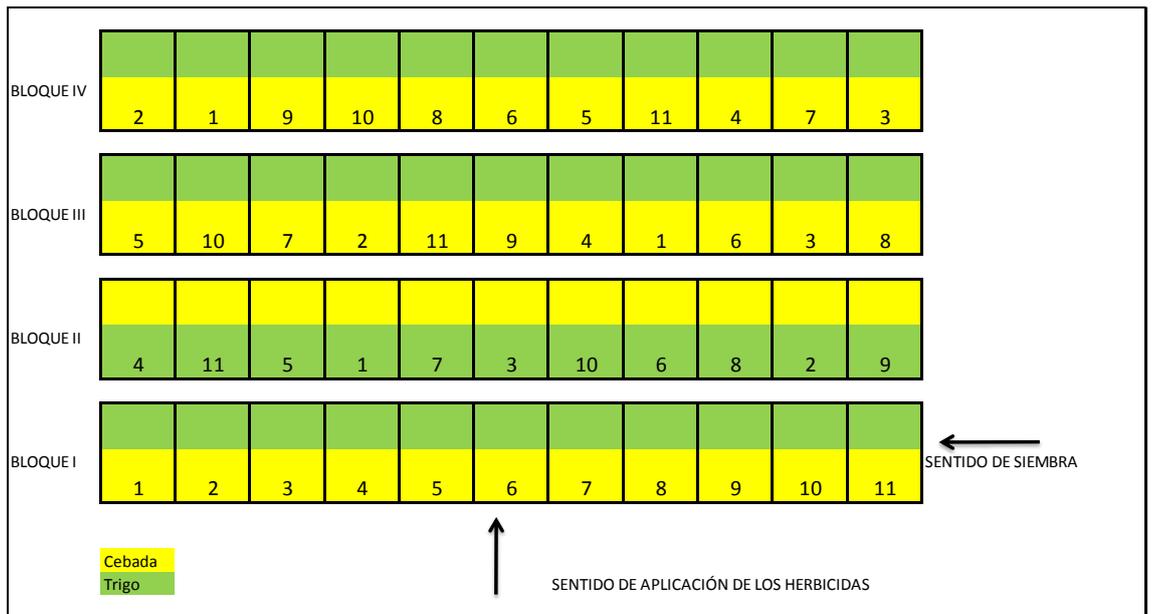


Figura II. Diagrama de campo del ensayo durante la fase completa barbecho químico/soja/barbecho químico/cultivos invernales.