



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTORADO EN AGRONOMÍA

MODELADO POBLACIONAL DEL RAIGRÁS PERENNE (*Lolium perenne* L.) EN CULTIVOS DE TRIGO DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA

MARIELA VICTORIA LODOVICH

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2018

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctora en Agronomía, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Agronomía y el Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS) durante el período comprendido entre Septiembre de 2009 y Septiembre de 2014, bajo la dirección del Dr. Mario Ricardo Sabbatini (Director) y del Dr. Aníbal M. Blanco (Co-director).

Mariela Victoria Lodovichi
DNI: 31.143.153



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el/....../..... , mereciendo la calificación de(.....)

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS), a la Universidad Nacional del Sur y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por el apoyo económico y el marco institucional para la realización de esta tesis.

A mis directores, Drs. Mario Ricardo Sabbatini y Aníbal Blanco, por la orientación durante los años que me llevó realizar la tesis, y por la paciencia que me tuvieron a pesar de todo.

Al Dr. Guillermo Chantre, por ayudarme durante la etapa de ensayos experimentales y durante la corrección del manuscrito de esta tesis.

Al Ing. Agr. Jorge Irigoyen por los consejos prácticos que me dio durante la realización de esta tesis.

A Mario Vigna, Ramón Gigón y Ricardo López, de la EEA INTA Bordenave, por recibirnos tan gentilmente, por darme la posibilidad de cosechar plantas de raigrás de sus parcelas y por proporcionar información experimental que de otro modo no habría podido conseguir.

A mi familia, especialmente a mi madre, por acompañarme y sostenerme durante todo el tiempo que me llevó terminar de escribir esta tesis.

RESUMEN

Las malezas causan perjuicios económicos al competir con los cultivos por la captura y utilización de los recursos escasos disponibles, fundamentalmente luz, agua y nutrientes minerales del suelo. Por este motivo, es necesario realizar operaciones de control sobre las poblaciones de malezas para reducir sus tamaños hasta niveles aceptables y lograr así los rendimientos esperados en los cultivos. De los numerosos métodos de control existentes, el control químico, a través del uso de herbicidas, es el principal método para el manejo de dichas poblaciones. En la actualidad, el uso intensivo de herbicidas es cuestionado debido a los perjuicios que ocasionan sobre la flora y fauna benéfica, la contaminación de suelos y aguas y los posibles residuos en alimentos, la posibilidad de la aparición de poblaciones de malezas resistentes a los mismos y por sus potenciales efectos sobre la salud humana.

Por esta razón, en los últimos años se entiende necesario efectuar un uso racional de los métodos químicos y combinarlos, de ser posible, con prácticas mecánicas y culturales para controlar las poblaciones de malezas con bajo impacto ambiental. Esta actividad, que se ha identificado como deseable para muchos de los agroecosistemas productivos de Argentina en los que se han empezado a manifestar malezas problemáticas, puede verse beneficiada por el desarrollo de herramientas de soporte a la toma de decisiones basadas en modelos matemáticos.

En la presente tesis se estudiaron aspectos de la biología y la ecología del raigrás perenne (*Lolium perenne*) como maleza de cultivos de trigo en la región semiárida del sudoeste de la provincia de Buenos Aires, y se desarrollaron modelos matemáticos con el objetivo de diseñar herramientas que permitan predecir el comportamiento a campo de la maleza y controlarla de la manera más eficiente, de modo de maximizar el rinde del cultivo y, por ende, las ganancias netas del productor, y al mismo tiempo reducir el impacto ambiental de las prácticas de control sobre el agroecosistema en cuestión.

En el Capítulo 2 se presentan los resultados del estudio de los cambios en los parámetros térmicos asociados a la germinabilidad de las semillas de *L. perenne* en función del tiempo de postmaduración a campo y se propone un modelo de tiempo térmico de postmaduración orientado a predecir la salida de la dormición primaria de las semillas de la especie. En el Capítulo 3 se construyeron modelos de la producción de semillas de *L. perenne* y se estimó el tiempo térmico necesario para pasar de un estadio fenológico al siguiente. En el Capítulo 4 se propone un modelo de planeamiento operativo del control químico, con el objetivo de determinar los momentos óptimos de aplicación de herbicidas en cultivos de invierno orientado a maximizar el beneficio económico de la actividad teniendo en cuenta el impacto ambiental. En el Capítulo 5 el modelo propuesto se aplica al sistema trigo – raigrás. Finalmente, en el Capítulo 6 se realiza una discusión general de la tesis, se enumeran las principales conclusiones que surgieron a partir de los resultados y se destacan las líneas de investigación futuras asociadas al trabajo en ella desarrollado.

ABSTRACT

Weeds cause economic losses by competing with crops for the available scarce resources, mainly light, water and mineral nutrients from the soil. For this reason, it is necessary to control weed populations in order to reduce its sizes to an acceptable level and reach the expected crop yields. There are numerous control methods and, among them, chemical control is the most popular. Nowadays, the intensive use of herbicides is questioned because of the damage caused to beneficial flora and fauna, soil and water pollution, the appearance of residues in food, the probability of developing weed resistant populations and its potential effects on human health.

For this reason, in the last years, it has been reputed necessary to make a more rational use of chemical methods, and combine them, if possible, with mechanical and cultural strategies to control weed populations at a low environmental impact. This activity has been considered desirable for many productive agroecosystems of Argentina with presence of problematic weeds, and can benefit from the development of decision support systems based on mathematical models.

In this thesis, aspects of the biology and ecology of perennial ryegrass (*Lolium perenne*) as a weed of wheat crops in the semiarid region of the south-west of Buenos Aires province have been studied, and mathematical models developed as tools that allow the prediction of the weed behaviour in the field and their control in a more efficient way, in order to maximize crop yield and net income, and at the same time reducing the environmental impact of control practices on the agroecosystem.

In Chapter 2, results are presented of the study of thermal parameters change associated to *L. perenne* seed germinability as a function of after-ripening time in the field, and an after-ripening thermal time model is proposed, as an attempt to predict primary dormancy loss of the species seeds. *L. perenne* seed production models were developed in Chapter 3, and the thermal time needed for phenological state change was also estimated in this chapter. Chapter 4 proposes an operational planning model of the chemical control, in order to find the optimal application time of herbicides in winter crops, to maximize the economical benefit also considering the environmental impact. In Chapter 5, the model proposed in Chapter 4 was applied to the wheat – perennial ryegrass system. Finally, in Chapter 6 there is a general discussion of the present thesis, the principal conclusions of the results are listed and related future research work is highlighted.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PREFACIO	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
CAPÍTULO 1: Introducción general	1
1.1 Generalidades de las malezas.....	1
1.1.1 Definición.....	1
1.1.2 Características.....	1
1.1.3 Consecuencias de la presencia de malezas en el agroecosistema.....	3
1.2 Métodos de control de malezas.....	3
1.3 Demografía de malezas.....	5
1.3.1 Dormición de las semillas.....	6
1.3.2 Germinación de las semillas.....	8
1.3.3 Emergencia de las plántulas.....	9
1.3.4 Crecimiento vegetativo de las plantas.....	11
1.3.5 Reproducción y dispersión de semillas.....	11
1.3.6 Bancos de semillas en el suelo.....	13
1.4 Modelos matemáticos aplicados al manejo y control de malezas.....	15
1.5 Descripción de la especie maleza estudiada: <i>Lolium perenne</i>	19
1.5.1 Taxonomía y origen.....	19
1.5.2 Características botánicas.....	20
1.5.3 Ciclo de vida.....	20
1.5.4 Importancia económica.....	22
1.5.5 Control.....	22
1.6 Descripción de la región semiárida del sudoeste bonaerense.....	23
1.7 Objetivos e hipótesis.....	25

CAPÍTULO 2: Modelado de la salida de la dormición primaria en semillas de <i>Lolium perenne</i> durante el período de postmaduración en condiciones de campo	27
2.1 Introducción.....	27
2.2 Materiales y métodos.....	30
2.2.1 Material vegetal.....	30
2.2.2 Tratamientos de postmaduración.....	30
2.2.3 Pruebas de germinación.....	31
2.2.4 Determinación del rango de temperaturas sub y supraóptimas para la germinación.....	31
2.2.5 Modelado de la germinación y obtención de los parámetros térmicos de la población.....	33
2.2.6 Desarrollo del modelo de dormición.....	35
2.2.7 Análisis de sensibilidad de parámetros.....	36
2.3 Resultados.....	36
2.3.1 Curvas de germinación acumulada, tasas de germinación y viabilidad.....	37
2.3.2 Cambios en los parámetros térmicos durante el período de postmaduración	42
2.3.3 Desarrollo del modelo de dormición.....	44
2.3.4 Análisis de sensibilidad de parámetros.....	46
2.4 Discusión.....	47
CAPÍTULO 3: Producción de semillas y estadíos fenológicos en <i>Lolium perenne</i> L.	51
3.1 Introducción.....	51
3.2 Materiales y métodos.....	54
3.2.1 Material vegetal.....	54
3.2.2 Lugar de trabajo.....	55
3.2.3 Experimento 1: estimación de la producción de semillas de <i>L. perenne</i>	55
Trabajo experimental.....	55
Análisis estadístico y ajuste de modelos.....	56
Análisis de sensibilidad de parámetros.....	57
3.2.4 Experimento 2: estimación del tiempo térmico necesario para el cambio de estadío fenológico.....	57
3.3 Resultados.....	59
3.3.1 Estimación de la producción de semillas de <i>L. perenne</i>	59

Análisis estadístico.....	59
Sin cultivo.....	59
Con cultivo.....	60
Análisis de sensibilidad de parámetros.....	61
3.3.2 Evaluación del tiempo térmico necesario para pasar de un estadio fenológico al siguiente.....	62
3.4 Discusión.....	63
CAPÍTULO 4: Planeamiento operativo para el manejo de malezas basado en el uso de herbicidas. Construcción del modelo matemático.	65
4.1 Introducción.....	65
4.2 Descripción del modelo.....	71
4.2.1 Pérdida de rinde del cultivo.....	71
4.2.2 Evaluación del impacto ambiental.....	73
4.2.3 Desarrollo del modelo de planeamiento.....	76
Estimación de la densidad de malezas.....	78
Mortalidad de plántulas de la maleza.....	78
Estimación de la producción de semillas de maleza.....	81
Estimación de la pérdida de rinde de cultivo y del rinde final.....	82
Función objetivo.....	84
Herbicidas.....	86
4.3 Discusión.....	87
CAPÍTULO 5: Planeamiento operativo para el manejo de malezas basado en el uso de herbicidas. Evaluación del modelo matemático en el sistema trigo – <i>Lolium</i> <i>perenne</i> .	90
5.1 Introducción.....	90
5.2 Materiales y métodos.....	91
5.2.1 Análisis de escenarios.....	91
5.2.2 Análisis de sensibilidad.....	96
5.3 Resultados.....	97
5.3.1 Análisis de escenarios.....	97
5.3.2 Análisis de sensibilidad.....	100

5.3.3 Análisis de escenarios penalizando la producción de semillas de maleza.....	102
5.4 Discusión.....	106
CAPÍTULO 6: Discusión general, conclusiones generales y trabajo futuro	111
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
APÉNDICE – VARIABLES Y PARÁMETROS	138

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

En este capítulo se revisan los elementos más importantes relacionados con las malezas en la agricultura moderna, incluyendo aspectos biológicos y agronómicos. Se hace una breve referencia al empleo de modelos matemáticos aplicados a la predicción de variables de interés para el manejo integrado y su uso como herramientas de asistencia a la toma de decisiones. A continuación se proporciona una descripción detallada de la especie estudiada en esta tesis, *Lolium perenne*, así como una referencia a la región agronómica de interés. Finalmente, se enuncian las hipótesis y los objetivos que dan lugar a la investigación.

1.1. Generalidades de las malezas

1.1.1. Definición

No existe una única definición de lo que es una maleza, ya que no hay características morfológicas o fisiológicas que clasifiquen a una especie vegetal como tal. Desde un punto de vista antropocéntrico, una maleza es una planta que crece en un lugar y en un momento en que no es deseada y/o resulta perjudicial para el hombre y sus actividades (García Torres y Fernández-Quintanilla, 1991; Ghera *et al.*, 1994; Cousens y Mortimer, 1995; Sabbatini *et al.*, 2004). En general se las considera indeseadas porque compiten con los cultivos por recursos limitados, reducen su rinde y obligan a realizar importantes gastos económicos para prevenir pérdidas significativas (Liebman, 2004a).

1.1.2. Características

Las especies maleza están bien adaptadas a la vida en ambientes modificados por el hombre y han estado asociadas a la agricultura desde sus comienzos, ya que los disturbios causados por las actividades humanas son esenciales para su aparición (Baker, 1991; Liebman, 2004a). Se trata de plantas, principalmente angiospermas, que presentan características ecológicas y fisiológicas clave que permiten su supervivencia y reproducción en el agroecosistema, y su adaptación a los eventos cíclicos que se producen en él (Baker, 1974; Mohler, 2004a).

Las malezas pueden ser buenos colonizadores, rápidos reproductores y/o mejores sobrevivientes que las especies no malezas, y suelen ser exitosas debido a que son más competitivas que estas últimas (Sutherland, 2004). Baker (1974) enumeró todas las características que debería presentar una hipotética maleza ideal para asegurar la persistencia de sus poblaciones en un determinado sitio (Tabla 1.1). En una especie dada, la presencia de una mayor o menor cantidad de estas características hará que sea más o menos probable que esta especie se vuelva una maleza (Baker, 1974).

Tabla 1.1. Características de una maleza ideal (Adaptado de Baker, 1974)

-
1. Múltiples ambientes cumplen con los requerimientos para la germinación de sus semillas
 2. Germinación escalonada y gran longevidad de las semillas
 3. Crecimiento vegetativo rápido para llegar rápidamente a la floración
 4. Producción continua de semillas, mientras las condiciones ambientales lo permitan
 5. Autogamia
 6. Polinizadores no específicos para la polinización alógama
 7. Producción de un gran número de semillas frente a condiciones ambientales favorables
 8. Producción de semillas en un amplio rango de condiciones ambientales
 9. Adaptaciones para la dispersión de semillas a corta y larga distancia
 10. Reproducción vegetativa vigorosa si se trata de una especie perenne
 11. Presenta habilidades competitivas interespecíficas especiales (crecimiento en roseta, alelopatía, etc)
-

Las prácticas culturales provocan modificaciones en el agroecosistema que ejercen una presión selectiva sobre las especies que se encuentran allí presentes, seleccionando así a aquellos genotipos naturalmente más aptos para sobrevivir y reproducirse en ambientes con perturbaciones periódicas (Cousens y Mortimer, 1995). Los cultivos suelen ser sembrados en una determinada época del año, crecen durante un período de tiempo relativamente constante de año a año y luego son cosechados. Las malezas que crecen en cultivos de este tipo se han especializado de tal forma que hacen coincidir su crecimiento y reproducción con aquellos del cultivo (Baker, 1974). Las condiciones generadas por el hombre para favorecer el crecimiento y desarrollo de los cultivos, como la fertilización y el riego, entre otros, también resultan favorables para aquellas malezas cuyos requerimientos fisiológicos son similares a los del cultivo en cuestión (Ghersa *et al.*, 1994).

1.1.3. Consecuencias de la presencia de malezas en el agroecosistema

Las malezas causan perjuicios económicos al competir con los cultivos por la captura y utilización de los recursos escasos disponibles, fundamentalmente luz, agua y nutrientes minerales del suelo (Sabbatini *et al.*, 2004; Gallandt y Weiner, 2007). Estos perjuicios no sólo se producen por pérdidas de rendimiento en los cultivos (Wilson *et al.*, 1990; Wilson y Wright, 1990; Cousens *et al.*, 1991; Cousens y Mortimer, 1995; Lemerle *et al.*, 1995; Hashem *et al.*, 1998; Pedreros, 2001; Moechnig *et al.*, 2003; Gallandt y Weiner, 2007), sino también por la pérdidas en calidad del producto obtenido (Cousens y Mortimer, 1995) y por la inversión requerida para el control de las plantas no deseadas (Cousens y Mortimer, 1995; Cousens *et al.*, 1986; Doyle *et al.*, 1986; Liebman, 2004a; Sabbatini *et al.*, 2004).

La magnitud de estos perjuicios, tanto de rendimiento como económicos, varía de acuerdo a la interacción de numerosos factores, tales como la composición de la comunidad de malezas, la abundancia relativa de cada una de las especies que la integran, la duración de la interferencia y las condiciones ambientales, entre otros (Cousens y Mortimer, 1995; Gallandt y Weiner, 2007).

1.2. Métodos de control de malezas

Como se mencionó en la sección 1.1.3, las malezas causan perjuicios económicos al productor agropecuario. Por este motivo, es necesario realizar operaciones de control sobre las poblaciones de malezas para reducir sus tamaños hasta niveles aceptables y lograr así los rendimientos esperados en los cultivos. Estas medidas dan ventajas competitivas al cultivo que se va a sembrar y previenen la producción de propágulos de la especie no deseada al eliminar las cohortes más tempranas de la maleza (Liebman, 2004a).

Existen numerosos métodos de control de malezas: mecánicos, culturales, biológicos y químicos. El control mecánico es uno de los métodos de control más antiguos que existen (Mohler, 2004b; Chicouene, 2007; Griepentrog y Dedousis 2010). Este método utiliza herramientas de labranza para cortar o descalzar las plántulas de malezas ya emergidas (Mohler, 2004b; Chicouene, 2007). El momento en que se realizan las operaciones de control mecánico es crítico, ya que hay estadíos del ciclo de vida en el que la especie de maleza resulta más susceptible y dicho control es más efectivo. Además, se debe tener en cuenta el estadío en el que se encuentra el cultivo

para que las operaciones de control no le provoquen daños. Los métodos de control mecánico pueden combinarse con otros métodos para aumentar su eficiencia (Mohler, 2004b).

Por otra parte, el control cultural consiste en fomentar la capacidad competitiva del cultivo contra las malezas por medio de diferentes prácticas culturales, como son la variación de la densidad de siembra, el arreglo espacial del cultivo, la elección de la fecha de siembra y el cultivar a sembrar, la rotación de cultivos y la localización específica de los fertilizantes, entre otros (Mohler, 2004c; Liebman y Staver, 2004; Liebman y Mohler, 2004).

Por su parte, el control biológico, mucho menos extendido, consiste en utilizar organismos vivos (bacterias, hongos o artrópodos, entre otros) para reducir el tamaño de las poblaciones de las especies maleza (Rees *et al.*, 1996; Liebman, 2004b). Al igual que el control mecánico, tanto el control cultural como el biológico pueden combinarse con otros métodos para potenciar su capacidad de control (Rees *et al.*, 1996).

El control químico, a través del uso de herbicidas, es el principal método para el manejo de poblaciones de malezas (Liebman, 2004a). El hecho de que sean la primera herramienta elegida a la hora de controlar especies indeseadas se debe a que estos productos son altamente eficientes, son fáciles de aplicar, reducen la cantidad de labores de control requeridas, resultan más económicos que otros métodos de control y su aplicación insume poco tiempo (Liebman, 2004a; Mohler *et al.*, 2004). Sin embargo, los programas de control de malezas basados sólo en el uso de productos químicos pueden ser muy inestables; su eficacia se puede ver reducida en el mediano y largo plazo por selección de especies y/o genotipos tolerantes o resistentes a ellos (Cousens y Mortimer, 1995; Liebman, 2004a). Además, la aplicación repetida de estos productos causa efectos potencialmente negativos sobre el ambiente y la salud humana (Cousens y Mortimer, 1995; Bastiaans *et al.*, 2000).

En la actualidad, el uso intensivo de herbicidas es cuestionado debido a los perjuicios que ocasionan sobre la flora y fauna benéfica (Prosser *et al.*, 2016; Vandana y Keshav, 2016), la contaminación de suelos y aguas y los posibles residuos en alimentos (Bhupander *et al.*, 2011; Allinson *et al.*, 2014; Sasal *et al.*, 2015; Székács *et al.*, 2015; Tomer *et al.*, 2015; Tongo y Ezemonye, 2015; Hijosa-Valsero *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016), y la posibilidad de la aparición de poblaciones de malezas

resistentes a los mismos por la gran presión de selección que ejercen (Liebman, 2004a; Mohler, 2004d). Los herbicidas pueden incluso afectar zonas donde no se han realizado aplicaciones, y por ende, a su fauna y a su flora, debido a la deriva de los mismos en el aire, sobre todo cuando las aplicaciones realizadas son aéreas (Egan *et al.*, 2014; Anderson y Al-Thani, 2015; Bohnenblust *et al.*, 2016).

Si bien estos productos suelen tener una baja toxicidad en mamíferos, la deriva sobre cultivos no-blancos y zonas de vegetación natural, incluso en bajas concentraciones, puede alterar la fisiología de dichas plantas, sobre todo su reproducción (Liebman, 2004a). Aunque aún no se conoce demasiado sobre los impactos del uso de herbicidas en la salud humana a corto y largo plazo, los reportes de salud pública y los estudios epidemiológicos indican que ciertos herbicidas pueden ser responsables de envenenamientos no intencionales y pueden estar asociados con un aumento en la incidencia de cáncer y otras enfermedades de los sistemas inmunológico, endócrino, nervioso y reproductor (Liebman, 2004a; Fantke y Jolliet, 2016; Nicolopoulou-Stamati *et al.*, 2016).

Con el objetivo de evitar depender sólo de los métodos químicos como estrategia de control de malezas, desde hace unos años se entiende la conveniencia de lo que se conoce como “Manejo Integrado de Malezas” (MIM). El mismo implica el uso de múltiples tácticas para suprimir y eliminar malezas y reducir el daño al cultivo a niveles económicamente aceptables. En este proceso el monitoreo y la intervención adecuada son componentes clave en el manejo de la densidad de las malezas, ya que las operaciones de control se realizan solamente cuando éstas son necesarias (Liebman, 2004a; Gallant y Weiner, 2007). En estos sistemas, los herbicidas son utilizados como herramientas terapéuticas solamente cuando las medidas preventivas, como la rotación de cultivos, el cambio de la densidad de siembra y el uso de variedades del cultivo más competitivas, fallan en proveer un control adecuado. De esta forma se procura reducir la cantidad de productos químicos aplicados, de forma tal que el riesgo para la salud humana y el ambiente sea mínimo (Bastiaans *et al.*, 2000; Chauvel *et al.*, 2001; Liebman, 2004a; Gnanavel, 2015).

1.3. Demografía de malezas

El conocimiento profundo de las características de los diferentes aspectos demográficos de una población de malezas en un determinado agroecosistema es de vital importancia para el diseño de un sistema apropiado de manejo (Cousens y

Mortimer, 1995; Mohler, 2004a). Sin embargo, a pesar de la importancia de dicho conocimiento, sólo se conoce en profundidad la biología de unas pocas especies (Cousens y Mortimer, 1995).

Las malezas, al igual que cualquier otra especie vegetal, pasan por una serie de estadios diferentes durante su ciclo de vida; ellos son la germinación de las semillas, el establecimiento de las plántulas, el crecimiento, la reproducción, la dispersión y la dormición de las semillas. Es necesario caracterizar estos procesos demográficos y los factores que regulan las tasas de flujo entre ellos, de forma tal que se pueda identificar aquellos estadios del ciclo de vida o procesos que resulten críticos para la regulación poblacional. De esta manera, se pueden implementar métodos de control que actúen sobre dichos momentos críticos para asegurar la reducción de las poblaciones de malezas (Cousens y Mortimer, 1995; Ghera *et al.*, 2000; Mohler, 2004a).

1.3.1. Dormición de las semillas

La dormición de las semillas es un factor de gran importancia como parte de la estrategia adaptativa de supervivencia y perpetuación de las especies. Se trata de una condición interna de la semilla que impide su germinación bajo condiciones hídricas, térmicas y gaseosas que serían adecuadas para que ocurra dicho fenómeno (Benech-Arnold *et al.*, 2000; Baskin y Baskin, 2004; Baskin y Baskin, 2014). Una vez que el impedimento (fisiológico, físico y/o morfológico) desaparece, la germinación de la semilla puede ocurrir con normalidad (Bewley, 1997; Benech-Arnold *et al.*, 2000).

Al momento de la dispersión primaria, las condiciones ambientales son, con frecuencia, inadecuadas para el establecimiento de las plántulas, por lo que la dormición constituye una estrategia para impedir la germinación en un momento con pocas chances de prosperar (Mohler, 2004a). De esta forma se regula la distribución de la germinación en el tiempo, en momentos en que la disponibilidad de agua, temperatura, luz y nutrientes es la adecuada, aumentando de ese modo la probabilidad de establecimiento de las plántulas (Bewley, 1997; Foley, 2001; Baskin y Baskin, 2014). Los factores que afectan la emergencia son muchos, pero de todos ellos el más importante es el grado de dormición que tengan las semillas de la especie vegetal (Forcella *et al.*, 2000).

El período de dormición generalmente es coincidente con la duración promedio de la estación más desfavorable para la emergencia y el establecimiento de las plántulas de la especie. Si bien estas condiciones ambientales resultan desfavorables para la supervivencia de las plántulas, son importantes en la promoción de la salida de la dormición (Benech-Arnold *et al.*, 2000; Baskin y Baskin, 2014). Una vez alcanzado el período de condiciones favorables, las semillas se encuentran despiertas y tienen el potencial de germinar al comienzo del mismo (Baskin y Baskin, 2014).

Existen cinco clases de dormición: fisiológica (resultado de la presencia o ausencia de ciertas hormonas en la semilla), morfológica (la semilla presenta un embrión subdesarrollado al momento de la dispersión), morfofisiológica (resultado de la existencia de dormición morfológica y fisiológica en la misma semilla), física (la semilla presenta una cubierta impermeable) y físico-fisiológica (resultado de la existencia de dormición física y fisiológica en una misma semilla) (Finch-Savage y Leubner-Metzger, 2006; Baskin y Baskin, 2014). La dormición fisiológica es la clase más comúnmente observada en muchas poblaciones de semillas de malezas y suele ser leve, ya que puede superarse fácilmente con tratamientos con giberelinas (Bewley, 1997; Benech-Arnold *et al.*, 2000; Finch-Savage y Leubner-Metzger, 2006; Baskin y Baskin, 2014). Las semillas de estas plantas, recientemente separadas de la planta madre, pueden no germinar a ninguna temperatura o bien hacerlo en un rango muy acotado (Baskin y Baskin, 2014). En esos casos, el tiempo requerido para la ruptura de la dormición suele estar entre algunas semanas o varios meses, dependiendo de la especie (Baskin y Baskin, 2014).

Los cambios en el estado de la dormición ocurren en respuesta a cambios en los factores ambientales. El principal factor ambiental que regula los cambios en el nivel de dormición de la población de semillas es la temperatura del suelo, mientras que la humedad del suelo actúa como moduladora del efecto de la temperatura (Roberts, 1988; Benech-Arnold *et al.*, 2000; Baskin y Baskin, 2014). En algunas especies, la dormición puede disminuir a través del tiempo, a una tasa gobernada por la temperatura, en un proceso conocido como postmaduración (Cousens y Mortimer, 1995). La postmaduración es la pérdida del estado de dormición a lo largo de cierto período de tiempo por exposición de las semillas a ciertos factores ambientales luego de la maduración y separación de la planta madre (Foley, 2001). Otros factores, como la oscuridad, la luz, los gases y ciertas sustancias químicas, pueden provocar cambios en el estado de dormición, actuando como terminadores de la salida de la dormición, o

bien pueden evitar que la germinación ocurra (Benech-Arnold *et al.*, 2000; Baskin y Baskin, 2014).

El proceso de salida de la dormición es gradual (Mohler, 2004a). En un primer momento, las semillas entran en un estado de dormición condicional, durante el cual germinan sólo en un rango de condiciones muy estrecho. Durante la progresión de la pérdida de la dormición este rango se va ampliando hasta cubrir el rango completo de condiciones en las que la especie puede germinar (Benech-Arnold *et al.*, 2000; Baskin y Baskin, 2014). Durante el proceso de pérdida de la dormición, en algunas especies se incrementa la temperatura máxima y en otras disminuye la temperatura mínima para la germinación. En unas pocas especies las semillas germinan en un principio a una temperatura intermedia, y las temperaturas máxima y mínima para la germinación se van incrementando y disminuyendo, respectivamente, durante todo el proceso (Baskin y Baskin, 2014). Las semillas suelen presentar ciclos de dormición, con alternancia entre dormición y quiescencia, en respuesta a los factores ambientales mencionados anteriormente (Baskin y Baskin, 2014).

1.3.2. Germinación de las semillas

Desde un punto de vista fisiológico, la germinación es el inicio del crecimiento del embrión contenido dentro de la semilla, desde que la semilla quiescente se imbebe hasta que los tejidos embrionarios aparecen a través de las cubiertas que lo rodean (Bewley, 1997; Bradford, 2002). Luego de la ruptura de la dormición, se requiere otro tipo de condiciones ambientales para estimular la germinación (Baskin y Baskin, 2014). Las semillas pueden estar despiertas, en un estado denominado quiescente, pero no germinarán si las condiciones ambientales resultan desfavorables (Mohler, 2004a).

El agua y la temperatura son los principales factores ambientales que determinan cuándo las semillas germinarán en el campo, a qué tasa lo harán y cuál será su porcentaje final de germinación (Dürr *et al.*, 2015). Este fenómeno se restringirá al período en el que la temperatura del ambiente y el rango de temperaturas permisivo para la germinación coincidan (Benech-Arnold *et al.*, 2000). Todas las especies vegetales poseen una temperatura base y una máxima; es entre estas dos temperaturas que se produce la germinación. La máxima velocidad de germinación se registra cuando las semillas están expuestas a la temperatura óptima. Análogamente, las semillas presentan potenciales agua base y óptimo. Entre las condiciones base y

óptima, los incrementos de la temperatura y del potencial agua conducen a un incremento lineal de la tasa de germinación (García-Huidobro *et al.*, 1982; Gummerson, 1986; Bradford, 2002; Rowse y Finch-Savage, 2003; Dürr *et al.*, 2015).

Otros factores, como la salinidad del suelo (Alonso *et al.*, 1999; Chauhan *et al.*, 2006; Kusvuran *et al.*, 2015), la exposición a la luz (Andersson *et al.*, 2002; Kruk *et al.*, 2006; Goggin *et al.*, 2008; Ohadi *et al.*, 2009; Fleet y Gill, 2012) y la profundidad a la que las semillas se encuentran en el perfil del suelo debido a las labranzas (Melander *et al.*, 2008; Ichihara *et al.*, 2009) también pueden reducir o favorecer la germinación de semillas.

La germinación de las semillas de las malezas es un proceso clave, ya que determina tanto la cantidad de malezas que podrán emerger potencialmente como el momento en que se producirá dicha emergencia. Por lo tanto, los parámetros que describen la germinación a campo son esenciales en los modelos de dinámica de malezas, ya que van a determinar los flujos de emergencia de las plántulas de estas especies (Gardarin *et al.*, 2011). Dichos parámetros permitirán entender la periodicidad de la germinación, lo que hará posible desbaratar el ciclo de vida de la maleza (Mohler, 2004a). Si se conoce el momento de germinación, se pueden ajustar las fechas de siembra del cultivo, de forma tal que el cultivo emerja antes que las malezas, logrando cierta ventaja competitiva, o que emerjan las malezas y luego sean destruidas durante la preparación de la cama de siembra. Además, al rotar entre cultivos con ciclos de vida completamente diferentes, se puede bloquear el establecimiento y la reproducción de grupos particulares de malezas (Mohler, 2004a).

1.3.3. Emergencia de las plántulas

La emergencia de las plántulas es probablemente el estadio fenológico más importante en la vida de una maleza, ya que este fenómeno representa el momento de independencia entre la plántula y los recursos nutritivos de la semilla; a partir de este estadio la plántula debe valerse de su propia fotosíntesis para sobrevivir (Forcella *et al.*, 2000).

La emergencia en sí no consiste de un único paso, sino que resulta de la suma de tres componentes: la salida de la dormición, la germinación y la elongación pre-emergencia de la plántula, hasta su aparición en la superficie del suelo (Forcella *et al.*, 2000; Leblanc *et al.*, 2003). Por lo tanto, todos aquellos factores ambientales que

afecten a estos procesos, como la temperatura y la disponibilidad de agua, también condicionarán la emergencia de las plántulas (Forcella *et al.*, 2000).

Además de los factores mencionados en el párrafo anterior, un elemento que afectará los patrones de emergencia será el tipo de manejo de suelo que se utilice (labranza convencional, labranza conservacionista o labranza cero), ya que las distintas labranzas posicionarán a las semillas a diferentes profundidades en el suelo (Chauhan *et al.*, 2006; Fleet y Gill, 2012). Esto afectará la abundancia y diversidad de especies de malezas presentes junto al cultivo, tanto a corto como a largo plazo, como consecuencia de los cambios producidos en la dinámica de los bancos de semillas del suelo (Buhler *et al.*, 1997; Menalled *et al.*, 2011). Por ejemplo, el pasaje de una labranza convencional, con mayor remoción del suelo, a una labranza conservacionista, provocó que las gramíneas se volvieran predominantes sobre las dicotiledóneas (Tuesca y Puricelli, 2001).

El momento de emergencia de la maleza en relación al momento de emergencia del cultivo es otro factor crítico, ya que determinará el grado de competencia que se produzca entre ellos, y consecuentemente la pérdida de rinde del cultivo (O'Donovan *et al.*, 1985; Forcella *et al.*, 2000; Grundy, 2003). Además, los momentos relativos de emergencia de las plántulas de maleza influirán en su propia reproducción, ya que aquellas plantas que emergen primero suelen producir una mayor cantidad de semillas que las que nacen más tarde (Forcella *et al.*, 2000; Gallart *et al.*, 2010).

Como se ha sugerido anteriormente, las plántulas de malezas no emergen uniformemente en el tiempo; en cambio, suelen presentar picos de emergencia en determinados períodos del año, característicos para cada especie (Forcella *et al.*, 2000; Grundy, 2003; Cici y Van Acker, 2008). El conocimiento de los patrones estacionales de emergencia de las plántulas de maleza resulta crítico para predecir la respuesta de la especie a cambios en las prácticas de manejo del cultivo, especialmente aquellas que involucran labranzas, y para la implementación de programas de manejo de malezas (Alm *et al.*, 1993; Cousens y Mortimer, 1995; Forcella *et al.*, 2000; Bradford, 2002; Grundy, 2003). Por ejemplo, Freckleton y Watkinson (1998) indicaron que el monitoreo y la predicción de las tasas de emergencia en *Chenopodium album* es la forma más exitosa de predecir la densidad de malezas y los niveles de infestación.

La habilidad para predecir la emergencia a campo ayuda a optimizar los momentos en que se realizan las operaciones de control, a mejorar la eficacia de las intervenciones y en definitiva contribuye a la posibilidad de implementar un manejo integrado de malezas. Sin embargo, la predicción del momento de emergencia a campo resulta difícil, ya que la misma será esporádica, dependiendo del grado de dormición de las semillas de la maleza (Foley, 2001; Forcella *et al.*, 2000), y se ve afectada por las variaciones climáticas anuales que pueden provocar la modificación de estos patrones de emergencia (Forcella *et al.*, 2000).

1.3.4. Crecimiento vegetativo de las plantas

El conocimiento sobre el crecimiento vegetativo de las especies maleza es necesario para lograr su buen manejo (Sohrabi *et al.*, 2016). Esta etapa es importante desde el punto de vista de control poblacional, ya que es deseable que las intervenciones se realicen antes que las plantas alcancen el estado reproductivo, para evitar la competencia y garantizar que el cultivo alcance el rinde deseado (Kalsing *et al.*, 2017).

El rápido crecimiento a través de la fase vegetativa para llegar a la reproductiva es una característica importante en las malezas (Baker, 1974). Una alta tasa de crecimiento durante la etapa vegetativa le permite a estas plantas tener una mayor ventaja competitiva respecto al cultivo (Cousens *et al.*, 1991; Hegazy *et al.*, 2005; Okayi *et al.*, 2017). De manera similar, un cultivo con una alta tasa de crecimiento puede competir mejor e inhibir el crecimiento de la maleza (Lemerle *et al.*, 1995; Seefeldt *et al.*, 2002). Esta tasa de crecimiento y la consecuente habilidad competitiva dependerán, además, del momento de emergencia de la maleza (Cousens *et al.*, 1992). El crecimiento vegetativo depende principalmente de la temperatura y del fotoperíodo (Cousens *et al.*, 1992; Weaver *et al.*, 1993; Jamieson *et al.*, 1995; Yan y Wallace, 1998; Dai *et al.*, 2012; Salehian *et al.*, 2013; Sohrabi *et al.*, 2016), encontrándose al mismo tiempo afectado por la disponibilidad de agua y nutrientes (Momayyezy y Upadhyaya, 2017; Ribeiro *et al.*, 2017).

1.3.5. Reproducción y dispersión de semillas

Las malezas se caracterizan por tener una producción de semilla abundante y continuada bajo condiciones ambientales diferentes (Baker, 1974). La densidad de plantas juega un papel crucial en la producción de semillas por cada individuo, debido

a que la fecundidad (número de semillas producido por una planta durante toda su vida) es un atributo fuertemente densodependiente (Cousens y Mortimer, 1995). En este caso, la producción de semillas suele decrecer al aumentar la densidad de plantas, ya sea de la misma especie o de otra (maleza o cultivo), debido básicamente a la competencia por nutrientes, lo que limita el desarrollo individual de cada planta (Tungate *et al.*, 2002; Sester *et al.*, 2004; Tungate *et al.*, 2006; Chauhan y Abugho, 2013).

Tanto la fecundidad como el esfuerzo reproductivo (proporción de sus propios recursos que invierte en reproducción) son característicos de cada especie, pero pueden verse modificados por factores poblacionales intrínsecos y extrínsecos, como el momento de emergencia de plántulas, la proximidad de plantas vecinas, la herbivoría, las enfermedades y demás factores que afectan la dispersión y la viabilidad de semillas (Cousens y Mortimer, 1995).

Para que las semillas de malezas sean dispersadas a distancias lejanas de la planta madre, es necesaria la participación de distintos agentes, como el viento, los animales y el agua (Cousens y Mortimer, 1995). Sin embargo, para la mayoría de las malezas, la principal dispersión de semillas de malezas entre campos es consecuencia de las actividades humanas, como la introducción de semillas de cultivo contaminada y a través de maquinaria contaminada con semillas de malezas (Cousens y Mortimer, 1995; Buhler *et al.*, 1997; Blanco-Moreno *et al.*, 2004; Mohler, 2004a; Barroso *et al.*, 2006).

La producción de semillas de maleza no es un problema para el cultivo actual. Sin embargo, estas semillas entran a formar parte del banco de semillas del suelo y pueden dar lugar a la emergencia de malezas en cultivos subsiguientes (Sester *et al.*, 2004). Por ello, es necesario tomar medidas para reducir la producción de semillas de maleza que terminen engrosando el banco (Mohler, 2004a). Un manejo de las poblaciones de malezas que reduzca la producción de semillas ayudará a reducir gradualmente el tamaño del banco de semillas (Tungate *et al.*, 2006).

Finalmente, es preciso mencionar que la reproducción de las malezas no ocurre solamente a través de la producción de semillas. Algunas malezas importantes poseen la habilidad de reproducirse vegetativamente (Cousens y Mortimer, 1995; Castro *et al.*, 2007). La reproducción asexual facilita la dispersión en el sitio, aumentando su capacidad de invasión a corto plazo (Castro *et al.*, 2007).

1.3.6. Bancos de semillas en el suelo.

En sistemas de producción agrícola, el banco de semillas del suelo es la principal fuente de las nuevas infestaciones que se producen cada año (Buhler *et al.*, 1997; Grundy *et al.*, 1999). El estadio de semilla es fundamental en el ciclo de vida de toda especie maleza, especialmente en el caso de aquellas de ciclo anual, ya que se trata de su unidad de reproducción, de dispersión y de su principal medio de persistencia en el agroecosistema (Holst *et al.*, 2007). El banco de semillas del suelo es un componente importante de la dinámica vegetal que permite la persistencia de las especies en el agroecosistema a lo largo del tiempo (De Souza Maia *et al.*, 2006; Martínez-Ghersa y Ghersa, 2006). La mayoría de las malezas es capaz de mantener una reserva de semillas en el suelo (Norris, 2007); el banco de semillas en el suelo es el único componente poblacional que está presente a lo largo de todo el año (Baker, 1974; González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 1991). La comprensión de la aparición de los bancos de semillas en el suelo y los procesos que ocurren en ellos es esencial para entender la persistencia de malezas en el campo, la sucesión vegetal y los procesos evolutivos (Ghersa y Martínez-Ghersa, 2000).

El mantenimiento de un banco de semillas en el campo permite que las malezas puedan comenzar su germinación ante la aparición de los estímulos apropiados (Baker, 1974). Esto significa que las malezas pueden tomar ventaja de oportunidades transitorias para el establecimiento de plántulas (Baker, 1974). Además, algunas especies presentan bancos de semillas persistentes en el tiempo, es decir que no todas las semillas producidas en un año germinarán durante el inmediato siguiente (Bond y Grundy, 2001). En ellos, la germinación de las semillas de maleza está controlada principalmente por los cambios estacionales del grado de dormición (Forcella *et al.*, 2000; Grundy, 2003; Batlla y Benech-Arnold, 2007; Mistro *et al.*, 2005). Esta estrategia asegura una mayor probabilidad de supervivencia bajo condiciones ambientales variables (Mistro *et al.*, 2005). Por esta razón, puede tomar varios años reducir el tamaño de la población de malezas (Cousens *et al.*, 1986).

La densidad de semillas en el banco del suelo y las especies presentes son altamente variables, ya sea entre campos como dentro de un mismo campo (Buhler *et al.*, 1997; Grundy *et al.*, 1999). El conocimiento de ambos (abundancia y composición de especies) es importante para entender la dinámica de las poblaciones de malezas (Cardina *et al.*, 1996) y, por ende, para diseñar la mejor estrategia de manejo posible (Ghersa y Martínez-Ghersa, 2000). Generalmente, los bancos de semillas están

compuestos por muchas especies, pero sólo unas pocas abarcan entre el 70 y 90% de las semillas presentes (Buhler *et al.*, 1997).

El tamaño del banco de semillas de cualquier año es el resultado de la suma de la nuevas semillas que se incorporan al banco ya existente, menos aquellas que se pierden (González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 1991; González-Díaz *et al.*, 2007; Jensen, 2010). Las nuevas semillas pueden provenir de numerosas fuentes, siendo la principal el aporte de las plantas que se encuentran en el mismo campo (Buhler *et al.*, 1997). Las semillas pueden entrar, también, mediante fuentes externas como maquinarias agrícolas, semillas de cultivos contaminadas, animales, viento o abono (Cousens y Mortimer, 1995; Buhler *et al.*, 1997). El número de semillas introducidas a partir de estas fuentes es generalmente menor que las producidas en el mismo campo; sin embargo, estas fuentes pueden ser importantes en el establecimiento de infestaciones de nuevas especies (Buhler *et al.*, 1997).

No todas las semillas producidas por las plantas de malezas dentro del campo se incorporarán al banco de semillas (Kim *et al.*, 2002). Por diversas causas, como la predación de semillas que aún están en la planta madre o la recolección por parte de las maquinarias agrícolas durante la cosecha del cultivo, parte de las semillas producidas se pierde antes de llegar al banco (Cousens *et al.*, 1986; Doyle *et al.*, 1986). Análogamente, las semillas de malezas que forman parte del banco pueden perderse, ya sea por germinación, muerte (pérdida de viabilidad) o predación por aves, pequeños mamíferos, lombrices de tierra e insectos, entre otros factores (Cousens y Mortimer, 1995; Cousens *et al.*, 1986; Buhler *et al.*, 1997; González-Díaz *et al.*, 2007). La importancia de dichos factores variará de acuerdo con la especie y las condiciones ambientales (Buhler *et al.*, 1997).

En el campo, la mayoría de las semillas que germina durante el primer año representa la mayor amenaza para el cultivo y para los costos de control. Mientras que la porción persistente del banco de semillas es importante en la dinámica poblacional a largo plazo, el conocimiento sobre la dinámica del banco a corto plazo ayudará a predecir la pérdida de rinde y los costos de control, y permitirá determinar las prácticas de control adecuadas (Buhler *et al.*, 1997; Bond y Grundy, 2001; Puricelli *et al.*, 2002; Ichihara *et al.*, 2009). Los tratamientos de control de malezas afectan la dinámica de los bancos de semillas en el suelo (Forcella *et al.*, 1996; Ruisi *et al.*, 2015). Las operaciones de control realizadas durante una temporada tendrán repercusión en las siguientes, ya que aquellas malezas que no sean controladas, aunque sean unas

pocas plantas, producirán semillas que reabastecerán al banco del suelo (Cousens *et al.*, 1986; Wiles *et al.*, 1996; de Buck *et al.*, 1999; Sester *et al.*, 2004; Puricelli y Tuesca, 2005; Dai *et al.*, 2012; Chauhan y Abugho, 2013). La densidad de semillas de malezas en el banco puede verse reducida considerablemente si a través de prácticas de manejo apropiadas se suprime la producción de semillas durante varios años, en particular por eliminación de aquellas plantas que emergen más temprano en la temporada; a la inversa, aquellos bancos de semillas poco densos pueden crecer rápidamente si se permite que las plantas de maleza produzcan semillas (Cousens y Mortimer, 1995; Buhler *et al.*, 1997; Tungate *et al.*, 2006; Ohadi *et al.*, 2009; Gallart *et al.*, 2010).

1.4. Modelos matemáticos aplicados al manejo y control de malezas

Un modelo matemático es una ecuación o conjunto de ecuaciones que representa de forma simplificada el comportamiento de un sistema y que permite estudiarlo sin la necesidad de realizar análisis experimentales (Doyle, 1997; Gertsev y Gertseva, 2004). Los modelos son un componente fundamental de la ciencia y son ampliamente utilizados en biología y ecología (Freckleton y Stephens, 2009). Ellos hacen que los supuestos y las predicciones en ecología sean más objetivas y confiables (Gertsev y Gertseva, 2004).

El uso de modelos matemáticos para representar la biología y ecología de las malezas está ampliamente difundido, ya que permiten realizar predicciones de la dinámica poblacional a campo a largo plazo para gran cantidad de diferentes posibles escenarios y extraer pautas para el manejo práctico de malezas. También poseen una componente didáctica que ayuda a interpretar la complejidad ecológica (Holst *et al.*, 2007; Freckleton y Stephens, 2009). Las observaciones simples y los análisis experimentales sólo permiten realizar predicciones cualitativas sobre la dinámica de una población; para poder realizar predicciones cuantitativas y de mayor confiabilidad es necesario complementar la información experimental con el empleo de modelos matemáticos (Freckleton y Stephens, 2009).

Por supuesto, las predicciones de todos los modelos siempre incluyen un cierto grado de incertidumbre, ya que ciertas condiciones que afectan la interacción cultivo-maleza, como el clima y el tamaño inicial del banco de semillas, no están bajo control humano. Además, los componentes del modelo son, por necesidad, simplificaciones de la realidad (Holst *et al.*, 2007).

Los modelos más comúnmente utilizados para estudiar la dinámica de las malezas son los modelos poblacionales. Un modelo poblacional es un modelo matemático que cuantifica las tasas de flujo poblacional entre los distintos estadios del ciclo de vida de la especie (germinación, emergencia, supervivencia y reproducción) y, a partir de las interacciones de dichos procesos con factores tanto climáticos como de manejo, predice los cambios en la densidad de individuos en el tiempo (Cousens y Mortimer, 1995; Freckleton y Stephens, 2009).

Los modelos más simples reducen el ciclo de vida de la maleza a cuatro estadios sucesivos en el tiempo: banco de semillas, plántulas, adultos y producción de semillas nuevas (Colbach y Debaeke, 1998). Otros modelos más sofisticados describen la dinámica poblacional de forma más detallada, dividiendo el ciclo de vida en un mayor número de estadios (González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 1991). El nivel de detalle de cada modelo dependerá de cuál sea el objetivo de su construcción (soporte para la toma de decisiones, educación, investigación), su nivel de aplicación (corto o largo plazo, local o regional) (Colbach y Debaeke, 1998) y la disponibilidad de información experimental para su ajuste y validación. Para que sean realistas, los modelos de dinámica poblacional de malezas deben incluir aquellos factores extrínsecos que afectan al cultivo, a la maleza y a la interacción entre ambos (Holst *et al.*, 2007).

Los modelos poblacionales pueden clasificarse de varias maneras. Dichos modelos pueden ser mecanísticos, si dividen cada proceso en cada uno de sus componentes, considerando los efectos biológicos y físicos de los sistemas de producción, en interacción con el ambiente biológico y físico en el que se encuentra la población de malezas (Alm *et al.*, 1993; Grundy, 2003). Ellos facilitan la comprensión de la dinámica de los procesos demográficos complejos, como la competencia entre cultivo y maleza (Bastiaans *et al.*, 2000; Holst *et al.*, 2007) y la emergencia (Vleeshouwers y Kropff, 2000; Grundy, 2003; Colbach *et al.*, 2006). Por otra parte, los modelos pueden ser empíricos, cuando el ciclo de vida de la maleza no es dividido en subprocesos que consideren la relación entre la fisiología y el ambiente; estos modelos son más fenomenológicos, ya que las variaciones en un determinado estadio del ciclo de vida se correlacionan con cambios en un determinado factor ambiental (Alm *et al.*, 1993). Estos modelos se han utilizado para describir la emergencia (Grundy y Mead, 2000; Leblanc *et al.*, 2003; Myers *et al.*, 2004; Leguizamón *et al.*, 2005; Martinson *et al.*, 2007), la pérdida de rinde de los cultivos (Moechnig *et al.*,

2003), entre otros usos. Los modelos empíricos pueden utilizarse para investigación o como herramientas de manejo, pero sus resultados no pueden ser extrapolados y usados en condiciones y sistemas productivos diferentes de aquellos para los que fueron construidos (Alm *et al.*, 1993; Colbach *et al.*, 2006), a diferencia de los mecanísticos, que debido a que describen procesos genéricos sí pueden emplearse en diversas situaciones (Colbach y Debaeke, 1998).

Por otra parte, los modelos poblacionales pueden dividirse en determinísticos y estocásticos. Los modelos determinísticos son aquellos cuyos parámetros tienen un único valor, es decir, no son estimados en función de distribuciones estadísticas (Gertsev y Gertseva, 2004). La mayor parte de los modelos demográficos encontrados en la bibliografía son determinísticos (Maxwell *et al.*, 1988; González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 1991; Colbach y Debaeke, 1998; Freckleton y Watkinson, 1998; Vidotto *et al.*, 2001; Munier-Jolain *et al.*, 2002; González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 2004; Colbach *et al.*, 2007; Puricelli *et al.*, 2007). Sin embargo, en la naturaleza no hay relaciones precisas entre variables, sino que sus parámetros incluyen un componente estadístico. Cuando existe una distribución de valores posibles para un parámetro, caracterizada por índices estadísticos como el promedio, la dispersión y el desvío estándar, el modelo que los contiene se denomina estocástico. El valor predicho del parámetro, en este caso, no tiene un único valor posible, sino un espectro de valores posibles (Gertsev y Gertseva, 2004; Benjamin *et al.*, 2009). Generalmente resulta difícil predecir a largo plazo la dinámica de una población de malezas debido a factores tales como la impredecibilidad de las condiciones ambientales, la variabilidad en las prácticas agrícolas, la variación natural de los procesos demográficos de la especie (como la reproducción y la mortalidad) y el error estadístico asociado a la estimación de parámetros. Los modelos estocásticos sirven para compensar la incertidumbre causada por los factores mencionados (Holst *et al.*, 2007). Los modelos determinísticos dan un único resultado, el promedio esperado. Por el contrario, los modelos estocásticos dan toda la distribución de frecuencias de los resultados esperados (Holst *et al.*, 2007).

Los modelos de dinámica poblacional de malezas que incluyen prácticas de control han servido como marco para organizar la información biológica y ecológica de las malezas, para saber qué factores presentan mayor incertidumbre y para desarrollar estrategias de control (Doyle, 1997; Grundy *et al.*, 1999; Grundy *et al.*, 2003; Shea *et al.*, 2006; Holst *et al.*, 2007; Freckleton *et al.*, 2008). Estos modelos son más que herramientas útiles para la investigación, ya que sirven para encontrar respuestas a

preguntas clave que no pueden ser proporcionadas por la realización de ensayos a campo debido a los costos y tiempos requeridos (Doyle, 1997; Shea *et al.*, 2006). Estos modelos permiten, además, predecir los efectos de nuevas prácticas de manejo antes de que éstas se implementen en el campo, estimar variables difíciles de medir en los experimentos y brindar información sobre la biología subyacente (Cousens, 1985b; Freckleton y Stephens, 2009).

La mayor parte de los modelos poblacionales determina el nivel de infestación de la maleza por encima del cual se justifica aplicar medidas de control (Doyle, 1997; Colbach y Debaeke, 1998; Kim *et al.*, 2002). Otros incluyen submodelos económicos que calculan a corto plazo la pérdida de rinde causada por la interacción cultivo-maleza y la ganancia neta para el productor, y proveen un vínculo entre la dinámica poblacional de las malezas y los costos y beneficios de su control (Cousens *et al.*, 1986; Doyle *et al.*, 1986; Wiles *et al.*, 1996; Colbach y Debaeke, 1998; Freckleton y Stephens, 2009). Además, algunos de ellos permiten determinar el impacto que tienen las diferentes opciones de manejo sobre el ambiente (Sells, 1995).

Luego de su formulación e implementación, es necesario que el modelo sea validado con datos independientes o bien con un análisis de sensibilidad de sus parámetros, ya que solamente las predicciones de aquellos modelos que han sufrido un proceso de evaluación son confiables (Colbach y Debaeke, 1998; Holst *et al.*, 2007; Freckleton y Stephens, 2009). El proceso de validación se refiere a la comparación de los resultados independientes obtenidos a campo, lo cual ayuda a determinar qué tan bien el modelo se desempeña, para que el usuario decida si el modelo es aceptable para sus propósitos (Rykiel, 1996; Holst *et al.*, 2007). Un análisis de sensibilidad, en cambio, consiste en modificar sistemáticamente los parámetros del modelo para luego cuantificar la sensibilidad del modelo a dichos cambios, en función de las variaciones obtenidas en los resultados del modelo (Holst *et al.*, 2007). Sea cual sea el método de evaluación utilizado, este proceso definirá si los resultados obtenidos a partir del modelo matemático son aceptables para el uso para el que fue concebido (Rykiel, 1996). A pesar de la importancia de la evaluación de los modelos de dinámica poblacional de malezas luego de su construcción, ésta tarea es, en la práctica, difícil de realizar debido a la escasez de series de datos registrados durante una cantidad suficiente de años (Holst *et al.*, 2007).

Los sistemas de soporte para la toma de decisiones (SSD) son herramientas computacionales basadas en modelos matemáticos que ayudan al productor a buscar

la mejor solución para el control de malezas en diferentes cultivos, ya sea a corto o a largo plazo (Holst *et al.*, 2007), habitualmente considerando objetivos económicos y medioambientales. Algunos de estos modelos incluyen los procesos de la dinámica poblacional de la maleza (banco de semillas, plántulas emergidas por cohorte y producción de semillas viables) y las interacciones entre la maleza y el cultivo (Grundy *et al.*, 2000). Dado que están orientados al uso práctico, estos modelos tienden a ser generales, con una misma estructura para un amplio rango de cultivos y malezas diferentes (Colbach y Debaeke, 1998). Estos sistemas ayudan a explorar automáticamente el amplio espacio de decisiones relacionadas con el manejo de malezas (Benjamin *et al.*, 2009). Una descripción detallada de varios de los principales SSD existentes se proporciona en la sección 4.1 del capítulo 4.

1.5. Descripción de la especie maleza estudiada: *Lolium perenne*.

1.5.1. Taxonomía y origen

El género *Lolium*, conocido vulgarmente como raigrás, pertenece a la familia Poaceae, subfamilia Festucoideae, tribu Festuceae, e incluye ocho especies: *L. perenne* L., *L. multiflorum* Lam., *L. rigidum* Gaud., *L. remotum* Schrank, *L. temulentum* L., *L. persicum* Boiss. & Hoh., *L. subulatum* Vis. y *L. canariense* (Terrell, 1968; Cabrera y Zardini, 1993; Inda Aramendia, 2005).

En base a caracteres morfológicos y fenológicos, dentro de dicho género se diferencian dos grupos. Uno de ellos está comprendido por *L. temulentum*, *L. remotum* y *L. persicum*, tres especies autógamas. El otro grupo comprende tres especies alógamas, *L. perenne*, *L. multiflorum* y *L. rigidum* (Loos, 1993; Terrell, 1968). Las especies que forman este último grupo presentan grandes similitudes, tanto desde un punto de vista morfológico como molecular, lo cual sugiere que existe muy poca diferenciación genética entre ellas. Además, estas especies pueden cruzarse entre sí, produciendo híbridos fértiles (Beddows, 1967). Por lo tanto, algunos autores han sugerido que *L. perenne*, *L. multiflorum* y *L. rigidum* podrían ser consideradas una única especie (Bulinska-Radomska y Lester, 1985). Si bien existen dificultades para distinguir estas especies entre sí, sobre todo entre *L. perenne* y *L. multiflorum*, *L. perenne* puede diferenciarse del resto gracias a algunas características morfofisiológicas, como la prefoliación conduplicada o plegada, la perennidad y las espiguillas con 2 – 10 flores, entre otras (Terrell, 1968; Cabrera y Zardini, 1993; Inda Aramendia, 2005).

Lolium perenne, al igual que el resto de las especies del género, es originario de Europa, Asia y el norte de África (Cabrera y Zardini, 1993; Inda Aramendia, 2005). A partir de allí, y gracias a la intervención del hombre, se ha distribuido ampliamente por todas las regiones templadas del mundo (Terrell, 1968; Balfourier *et al.*, 2000).

1.5.2. Características botánicas

Lolium perenne (raigrás perenne) es una planta cespitosa de hasta 80 cm de altura, que produce un número variable de macollos durante toda su vida. Sus hojas son glabras y presentan láminas de entre 20 y 30 cm de largo y hasta 6 mm de ancho. La prefoliación, como se mencionó anteriormente, es de tipo conduplicada o plegada. Las vainas son rojizas en la base, la lígula es corta y trunca y las aurículas son pequeñas (Beddows, 1967; Cabrera y Zardini, 1993). Las plantas de raigrás perenne son generalmente diploides ($2n = 14$), aunque existen variedades tetraploides (Beddows, 1967; Terrell, 1968). Las inflorescencias son espigas delgadas, erguidas o ligeramente curvas, normalmente sin ramificaciones, de hasta 20 cm de largo. Cada espiga puede portar entre 20 y 30 espiguillas de hasta diez flores cada una; el largo de las espiguillas sobrepasa en un tercio el largo de la gluma. Durante la etapa reproductiva, la planta sigue produciendo macollos, los cuales rodean a aquellos ya florecidos (Beddows, 1967; Cabrera y Zardini, 1993).

La especie presenta una gran plasticidad, por lo que la morfología de las plantas se ve afectada por las condiciones ambientales en las que crezca (Inda Aramendia, 2005). Como se mencionó anteriormente, *L. perenne* es una especie alógama, frecuentemente auto-incompatible y de polinización principalmente anemófila (Beddows, 1967; Terrell, 1968; Thorogood y Hayward, 1991). El fruto es un cariopse, fuertemente envuelto por la pálea y la lemma; esta último generalmente carece de arista (Beddows, 1967; Cabrera y Zardini, 1993).

1.5.3. Ciclo de vida

El raigrás perenne es una especie hemicriptófita, que pasa por un estadio de semi-roseta anterior a la encañazón. La longevidad de los individuos presenta variaciones inter e intrapoblacionales, observándose desde formas anuales o bienales con escasos macollos, hasta formas extremadamente persistentes, con numerosos macollos, algunos de los cuales son postrados y cuyos nudos producen raíces.

Aquellas plantas que encañan y florecen durante su primer año de vida tienden a pertenecer a poblaciones menos persistentes (Beddows, 1967). Al igual que otras especies del género *Lolium*, *L. perenne* suele presentar bancos de semillas transitorios, ya que la viabilidad de las semillas en el suelo luego de un año es relativamente baja (Maia *et al.*, 2007; Jensen, 2010).

Al igual que en otras especies de gramíneas, al momento de la dispersión primaria las semillas de *Lolium perenne* presentan dormición fisiológica parcial (Baskin y Baskin, 2004; Finch-Savage y Leubner-Metzger, 2006). La salida de la dormición en semillas de plantas de ciclo invernal como *L. perenne* ocurre durante los meses de verano, bajo la influencia de altas temperaturas, período en el que las condiciones ambientales de temperatura y humedad no resultan favorables para esta especie (Forcella *et al.*, 2000).

La perpetuación efectiva del raigrás perenne depende casi exclusivamente de la producción de semillas. Si bien existe la posibilidad de que ocurra propagación vegetativa, su frecuencia es muy baja (Beddows, 1967). La especie produce gran cantidad de semillas, en número variable dependiendo de la densidad de plantas. Debido a que las mismas son relativamente pesadas, no pueden dispersarse a gran distancia desde la planta madre. La mayor dispersión de cariopses es llevada a cabo por el hombre (Beddows, 1967; Terrell, 1968).

Como se mencionó anteriormente, *L. perenne* tiene la capacidad de producir híbridos fértiles espontáneamente con *L. multiflorum* y *L. rigidum*, los que se han encontrado en diferentes partes del mundo, incluida la Argentina (Terrell, 1968; Ferreira *et al.*, 2015; Yannicari *et al.*, 2015). Dichos híbridos presentan características intermedias entre ambos progenitores, tanto en caracteres vegetativos (biomasa aérea, ancho y largo de las láminas) como en los reproductivos (número de espiguillas por espiga, número de flores por espiguilla, longitud de glumas, grado de desarrollo de aristas) (Terrell, 1968; Yannicari *et al.*, 2015). Además de producir híbridos con especies del mismo género, se han reportado casos de híbridos entre especies de los géneros *Lolium* y *Festuca* (*F. pratensis*, *F. arundinacea* y *F. gigantea*); el fenotipo en estos casos también ha resultado intermedio entre ambos padres, y el grado de fertilidad es variable (Beddows, 1967; Terrell, 1968).

1.5.4. Importancia económica

Desde un punto de vista económico, las especies de *Lolium* de mayor importancia agronómica a nivel mundial son *L. perenne*, *L. multiflorum* y *L. rigidum*. La importancia de las dos primeras se debe a que son excelentes forrajeras y componentes de céspedes. Además, las tres especies han ganado importancia por haberse transformado en malezas de cultivos de cereales de invierno (Terrell, 1968; Inda Aramendia, 2005), ya que presentan ciertas características, como la alta producción de semillas y la alta capacidad competitiva, que les permiten adaptarse a dichos agroecosistemas y competir eficientemente con el cultivo, causándole importantes pérdidas de rinde (Reeves, 1976; Liebl y Worsham, 1987; Bellostas y Aibar, 1994; Lemerle *et al.*, 1995; Pedreros, 2001; Vazan *et al.*, 2011; Wanic *et al.*, 2013).

En la provincia de Buenos Aires, el raigrás (tanto anual como perenne) es cultivado como forrajera en sistemas agropecuarios o netamente ganaderos (Cabrera y Zardini, 1993). Plantas provenientes de variedades cultivadas de ambas especies han escapado de dichos cultivos, naturalizándose en el campo y convirtiéndose en una importante maleza en cultivos de cebada y trigo de la región (Cabrera y Zardini, 1993; Istitart y Yannicari, 2011). Poblaciones naturalizadas de *Lolium spp.* se extienden por toda la región pampeana, formando parte de las comunidades de malezas o praderas (Cabrera y Zardini, 1993). A pesar de los cambios de manejo y de las nuevas tecnologías que se vienen implementando, *Lolium* sigue siendo un género problemático en la región, en donde es común encontrar cultivos con importantes infestaciones de estas especies (Istitart y Yannicari, 2011).

1.5.5. Control

En el sudoeste bonaerense, el control de *Lolium spp.* en barbecho suele realizarse con herbicidas. El glifosato es el principal principio activo utilizado, aunque otros herbicidas, como haloxifop-metil o cletodim también son usados para el control estas especies (López *et al.*, 2008). El control de las especies del género *Lolium* en postemergencia suele realizarse utilizando graminicidas selectivos que tienen una alta efectividad (Vigna *et al.*, 2008). Debido al uso continuo de herbicidas en la región, se ha confirmado la presencia de poblaciones de *L. perenne* y *L. multiflorum* resistentes a glifosato y a otros principios activos (Diez de Ulzurrun *et al.*, 2008; López *et al.*, 2008; Yannicari *et al.*, 2009; Diez de Ulzurrun y Leaden, 2012; Yannicari *et al.*, 2012;

Heap, 2016). Al tratarse de plantas alógamas, la resistencia se transmite a través del polen entre poblaciones localizadas en distintos campos e incluso regiones. Se ha observado que este riesgo existe no sólo en el caso de poblaciones de la misma especie, sino también entre poblaciones de *Lolium* de especies diferentes (Yanniccari *et al.*, 2015).

A nivel global, se han reportado casos de poblaciones resistentes a glifosato (Christoffoleti y López-Ovejero, 2003; Pérez y Kogan, 2003; Neve *et al.*, 2004; Pérez-Jones *et al.*, 2005; Yu *et al.*, 2007; Owen y Powles, 2010; Salas *et al.*, 2012), gramínicas selectivos (Tardif *et al.*, 1993; Bravin *et al.*, 2001; Llewellyn y Powles, 2001; Salas *et al.*, 2013), sulfonilureas (Llewellyn y Powles, 2001; Tucker *et al.*, 2006; Ellis *et al.*, 2008; Salas *et al.*, 2013) y paraquat (Yu *et al.*, 2007; Yu *et al.*, 2009), entre otros. Además, se han hallado numerosos casos de resistencia a múltiples principios activos dentro de una misma población (Burnet *et al.*, 1994; Neve *et al.*, 2004; Yu *et al.*, 2007; Salas *et al.*, 2013). Si bien se ha observado que las poblaciones resistentes tienen una menor capacidad competitiva que las poblaciones susceptibles, en el contexto actual, en el que el control químico es el principal método usado para controlar las malezas, dichos biotipos encuentran ventajas adaptativas (Vila-Aiub *et al.*, 2005; Ferreira *et al.*, 2008; Vila-Aiub *et al.*, 2009).

1.6. Descripción de la región semiárida del sudoeste bonaerense

La región semiárida del sudoeste de la Provincia de Buenos Aires está conformada por los partidos de Guaminí, Adolfo Alsina, Saavedra, Puán, Tornquist, Villarino, Patagones, Bahía Blanca, Coronel Rosales, Coronel Dorrego, Coronel Pringles y Coronel Suárez (Figura 1.1). Esta región pertenece a la llanura pampeana y se caracteriza por tener clima templado, con veranos e inviernos bien marcados, mientras que las primaveras y otoños moderados. Debido a la baja cantidad de precipitaciones anuales, el clima tiene carácter subhúmedo (Ramos y Campo, 2008; Campo *et al.*, 2009).

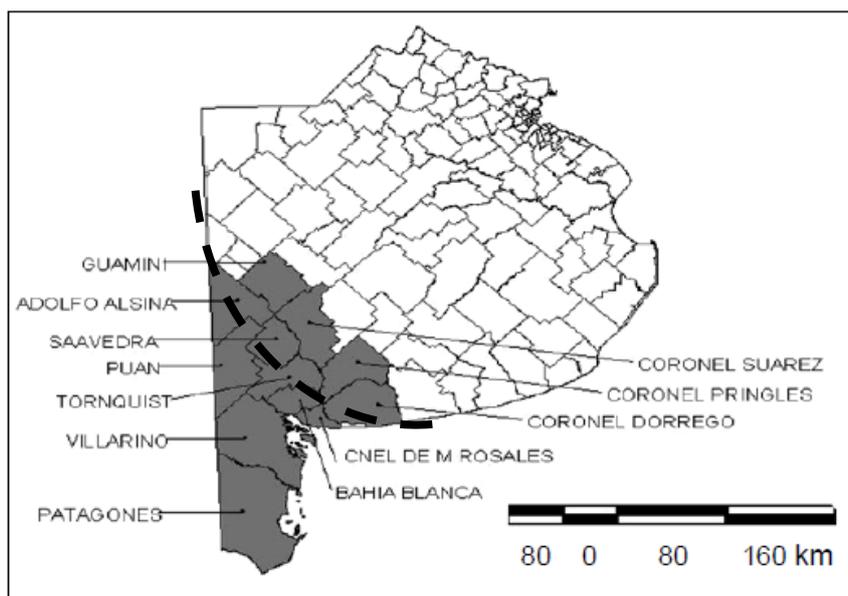


Figura 1.1. Partidos que forman parte del sudoeste de la provincia de Buenos Aires (sombreados en gris). Tomado y modificado de Andrade *et al.* (2009). La línea punteada marca la isohieta de 700 mm.

Las características climáticas no son uniformes a lo largo de todo el territorio, sino que se presentan variaciones en las temperaturas y en las precipitaciones (Galantini *et al.*, 2006; Campo *et al.*, 2009). La temperatura media anual ronda entre los 14°C y 20°C, aunque en verano es frecuente que las temperaturas alcancen los 40°C; en invierno, en cambio, se suelen presentar olas de frío (Campo *et al.*, 2009).

Como se mencionó anteriormente, las precipitaciones no son abundantes en la región. El milimetraje registrado anualmente es altamente variable, tanto temporal como espacialmente. Las lluvias disminuyen en dirección noreste – sudoeste, oscilando entre 800 mm al norte y 280 mm al sur (Campo *et al.*, 2004). Esto se debe no sólo al movimiento propio de las masas de aire, sino también a fenómenos meteorológicos globales que contribuyen a provocar dichas fluctuaciones (Campo *et al.*, 2009). La isohieta de 700 mm divide la región en dos subregiones: subhúmeda al norte y semiárida al sur (Cantamutto *et al.*, 2016).

Con respecto al suelo, esta región se caracteriza por el predominio de suelos livianos, con bajo contenido de materia orgánica y con grandes deficiencias de nitrógeno y fósforo (Loewy y Seewald, 1980; Loewy y Puricelli, 1982; Galantini *et al.*, 2006). La textura varía dentro de la región, siendo más gruesa en el S – SO y más fina en el N – NE. Estos suelos presentan escasa profundidad, lo que limita la capacidad del mismo para almacenar agua (Galantini *et al.*, 2006).

1.7. Objetivos e hipótesis

En la presente tesis, el objetivo general consiste en el desarrollo de modelos matemáticos de simulación/optimización de la demografía poblacional de *L. perenne*, que permitan cuantificar la interacción entre variables biológicas, climáticas y de manejo. Estos modelos incluyen módulos de cuantificación de indicadores económicos y medioambientales para posibilitar una evaluación sistemática de las diferentes estrategias de control químico y contribuir a facilitar el proceso de toma de decisiones relacionado con el manejo de la especie, adecuado a las particularidades del agroecosistema en estudio.

Como consecuencia del objetivo general planteado anteriormente, surgen los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar los requerimientos térmicos para la salida de la dormición primaria en semillas de *L. perenne*.
- Elaborar modelos cuantitativos de tiempo térmico que permitan determinar los cambios en el nivel de dormición de semillas de *L. perenne*, y predecir la capacidad germinativa de las semillas y los flujos de emergencia de las plántulas a campo.
- Determinar la producción de semillas de *L. perenne* frente a diferentes condiciones de competencia a campo.
- Elaborar modelos de producción de semillas de *L. perenne* a campo.
- Determinar el tiempo térmico acumulado necesario para el pasaje de un estadio fenológico al siguiente en plantas de *L. perenne* establecidas a campo.
- Construir un modelo de optimización para el control de *L. perenne* en cultivos de trigo, que permita determinar qué productos químicos aplicar y en qué momento hacerlo, para aumentar el rinde del cultivo y la ganancia neta para el productor, mientras se minimiza el impacto ambiental de las operaciones de control.

A partir de los objetivos (generales y específicos) planteados en los párrafos anteriores, se elaboraron las siguientes hipótesis específicas:

- La salida de la dormición y la germinación de *L. perenne* dependen de la temperatura de postmaduración, el grado de contenido hídrico de las semillas y del tiempo de postmaduración.
- La germinación y emergencia a campo de *L. perenne* pueden predecirse utilizando modelos cuantitativos de tiempo térmico, debidamente validados con datos independientes.
- La producción de semillas en *L. perenne* es un fenómeno densodependiente, que dependerá no sólo de la competencia intraespecífica sino también de si ocurre o no competencia con un cultivo.
- La cuantificación del tiempo térmico acumulado necesario para pasar de un estadio fenológico al siguiente en plantas establecidas de *L. perenne* permite determinar parámetros confiables para incluir en modelos de simulación.
- Se puede construir un modelo matemático que determine herbicida y momento óptimo de aplicación e impacto ambiental ante una infestación de una especie maleza determinada.

CAPÍTULO 2

MODELADO DE LA SALIDA DE LA DORMICIÓN PRIMARIA EN SEMILLAS DE *Lolium perenne* DURANTE EL PERÍODO DE POSTMADURACIÓN EN CONDICIONES DE CAMPO

Al momento de su dispersión primaria, las semillas de *Lolium perenne* presentan dormición fisiológica condicional. La pérdida de la dormición de las semillas de esta especie está regulada principalmente por la temperatura, y se produce durante un período de tiempo conocido como período de postmaduración. En este capítulo se presentan los resultados del estudio de los cambios en los parámetros térmicos asociados a la germinabilidad de las semillas de *L. perenne* en función del tiempo de postmaduración a campo y se propone un modelo de tiempo térmico de postmaduración orientado a predecir la salida de la dormición primaria de las semillas de la especie. Los modelos de tiempo térmico desarrollados permiten cuantificar el grado de dormición de la población de semillas. Eventualmente pueden servir de base para complementar el conocimiento experto a la hora de tomar decisiones relacionadas con el manejo de la maleza. Los resultados principales de este capítulo están publicados parcialmente en Lodovichi *et al.* (2014).

2.1. Introducción

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento germinativo de una población de semillas en función de la temperatura, se han desarrollado modelos de tiempo térmico construidos en base a la variación en la respuesta intrapoblacional a dicho factor ambiental. Los modelos umbral de tiempo térmico son modelos matemáticos que permiten cuantificar los requerimientos térmicos de germinación y/o salida de la dormición de una población dada de semillas. Dichos modelos pueden utilizarse para facilitar el entendimiento de los patrones de emergencia en condiciones de campo y ayudar en la predicción de los flujos de emergencia (Bradford, 2002).

La descripción de la germinación y la salida de la dormición de diversas especies, se ha realizado utilizando modelos umbral basados sólo en el tiempo térmico de postmaduración (Washitani, 1987; Meyer *et al.*, 2000; Steadman *et al.*, 2003b; Batlla y Benech-Arnold, 2007) o en combinación con el hidrotiempo, dando lugar así a modelos de tiempo hidrotermal (Alm *et al.*, 1993; Grundy *et al.*, 2000; Allen y Meyer, 2002; Alvarado y Bradford, 2002; Rowse y Finch-Savage, 2003; Gallagher *et al.*, 2004; Larsen *et al.*, 2004; Meyer y Allen, 2009).

Como se mencionó en la sección 1.3.2, la respuesta germinativa de las semillas a los estímulos térmicos está caracterizada por tres temperaturas cardinales: una temperatura mínima o base (T_b), una temperatura óptima (T_o) y una temperatura máxima (T_c). Se define a T_b como la temperatura por debajo de la cual las semillas no germinan. Análogamente, semillas expuestas a temperaturas superiores a T_c tampoco inician la germinación. Por otra parte, T_o es la temperatura de mayor velocidad de germinación (Bradford, 2002). Con el objetivo de cuantificar las variaciones en la respuesta germinativa a la temperatura, varias aproximaciones de modelado utilizan las mencionadas temperaturas cardinales y los tiempos térmicos de germinación subóptimo (θ_1) y supraóptimo (θ_2) (García-Huidobro *et al.*, 1982; Covell *et al.*, 1986; Ellis *et al.*, 1986; 1987; Ellis y Butcher, 1988; Murdoch *et al.*, 1989; Hardegree *et al.*, 1999; Chantre *et al.*, 2009). Los tiempos térmicos de germinación corresponden al tiempo térmico necesario para la germinación por debajo y por encima de T_o (Bradford, 2002). Por un lado, θ_1 se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$\theta_1 = (T - T_b) t \quad (2.1)$$

donde T es la temperatura ambiente y t es el tiempo para la germinación. Por otra parte, θ_2 se calcula como:

$$\theta_2 = (T_c - T) t \quad (2.2)$$

El modelo clásico de germinación supone que T_b presenta un valor constante para toda la población, y que la distribución de θ_1 es normal o log-normal en el rango térmico subóptimo de germinación (Covell *et al.*, 1986; Ellis *et al.*, 1986; Benech-Arnold *et al.*, 1990; Steinmaus *et al.*, 2000; Alvarado y Bradford, 2002). Además, se considera que en el rango térmico supraóptimo, θ_2 es constante y T_c presenta una distribución normal o log-normal dentro de la población (Covell *et al.*, 1986; Ellis *et al.*, 1986; Ellis y Butcher, 1988). Sin embargo, otros autores han encontrado que estas suposiciones no ajustaban correctamente al caso que estaban estudiando. Hardegree (2006), por ejemplo, obtuvo un mejor ajuste de su modelo de germinación suponiendo que T_c es constante y θ_2 presenta una distribución log-normal. Por su parte, Chantre *et al.* (2009) encontraron que el mejor ajuste se lograba considerando T_b y T_c normales, mientras que θ_1 y θ_2 eran consideradas constantes.

Por otra parte, Washitani (1987) y Grundy *et al.* (2000) propusieron un modelo basado en el concepto de umbrales térmicos de germinación, en el que los individuos de la población poseen un umbral límite inferior y otro superior que describirían el nivel de germinabilidad de la población. Dichos umbrales se consideran normalmente distribuidos en la población y definen el rango térmico que le permite germinar a la semilla. Este concepto de umbrales térmicos fue asociado con el nivel de dormición por Batlla y Benech-Arnold (2003), con el objetivo de desarrollar un modelo de tiempo térmico para la salida de la dormición en semillas de *Polygonum aviculare* L.

Existen antecedentes de estudios sobre germinación y dormición de semillas de *Lolium rigidum* (Gramshaw, 1972; Steadman *et al.*, 2003a, 2003b; Gallagher *et al.*, 2004) y de *L. multiflorum* (Eichelberger *et al.*, 2001), pero no se han encontrado referencias a estudios similares sobre *L. perenne*. Se ha observado que tanto en *L. rigidum* como en *L. multiflorum* se requiere un período de postmaduración en seco de entre dos y tres meses (Gramshaw, 1972; Eichelberger *et al.*, 2001; Steadman *et al.*, 2003a), aunque pueden observarse diferencias interpoblacionales e interanuales dentro de una misma población a lo largo de dicho período. Durante el período de postmaduración, la temperatura es el principal regulador de la tasa de pérdida de la dormición en *L. rigidum* (Steadman *et al.*, 2003b), como se observa comúnmente en especies de invierno (Baskin y Baskin, 2004). Steadman *et al.* (2003a) encontraron que si bien el nivel de hidratación de las semillas actúa en *L. rigidum* como un modulador del rol de la temperatura sobre la salida de la dormición (Steadman *et al.*, 2003b, Gallagher *et al.*, 2004), la salida de la dormición en condiciones de campo puede ser descrita adecuadamente utilizando el tiempo térmico de postmaduración, sin necesidad de considerar los cambios en el contenido hídrico de las semillas debidos a las fluctuaciones en el nivel de humedad edáfica.

Los objetivos del trabajo reportado en este capítulo fueron: (i) cuantificar los cambios que ocurren en función del tiempo de postmaduración a campo en los parámetros térmicos asociados a la germinabilidad de semillas de *Lolium perenne* y (ii) desarrollar un modelo de tiempo térmico de postmaduración que permita predecir la salida de la dormición primaria de las semillas de esta especie.

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Material vegetal

En enero de 2010 se cosecharon espigas maduras de *Lolium perenne* L. a partir de una población espontánea ubicada en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Bordenave (37° 50' S; 63° 01' O; Bordenave, provincia de Buenos Aires, Argentina). Luego de la cosecha, los cariopses (de aquí en más denominados semillas) fueron separados de las espigas manualmente y almacenados a temperatura ambiente hasta el inicio de los ensayos. El contenido hídrico de las semillas al momento de la cosecha fue de 8,3% ($\pm 3\%$) (base peso seco).

2.2.2. Tratamientos de postmaduración

Se generaron semillas con tres contenidos hídricos diferentes (3, 13 y 19%, base peso seco), previo almacenamiento de las mismas en bolsitas de polipropileno colocadas en atmósferas de distinta humedad relativa (*HR*) a temperatura ambiente, siguiendo la metodología utilizada en Steadman *et al.* (2003a). Las atmósferas arriba mencionadas se lograron utilizando soluciones de glicerol al 100, 58 y 38%, respectivamente (Winston y Bates, 1960). Al cabo de 21 días de almacenamiento en estas condiciones, se determinó el contenido hídrico por triplicado, secando las semillas en estufa a 80°C durante 72 horas.

Una vez alcanzado el contenido hídrico deseado, las semillas se colocaron dentro de recipientes plásticos herméticos (crioviales), los cuales se enterraron a campo (1 cm de profundidad), a fin de permitir su postmaduración.

Se determinó la germinabilidad de las semillas recién cosechadas (contenido hídrico promedio 8,3% ($\pm 3\%$), base peso seco) y luego de transcurridos 21, 49, 126, 183 y 278 días de entierro a campo para las semillas con los contenidos hídricos mencionados anteriormente. Cabe mencionar que en cada exhumación se controló que el contenido hídrico logrado en cada tratamiento de postmaduración se hubiese mantenido constante.

2.2.3. Pruebas de germinación

En cada fecha de exhumación, grupos de 50 semillas se incubaron en una plancha de gradiente térmico a temperaturas constantes de 5, 8, 10, 15, 20, 25 y 28°C durante un período de 21 días. Se aplicó un régimen fotoperiódico de 12 horas por medio de lámparas fluorescentes de luz blanca que proveían una densidad de flujo fotónico de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{seg}^{-1}$. La germinación se monitoreó diariamente, considerando germinadas aquellas semillas con una radícula de por lo menos 1 mm de longitud. Finalizado el período de incubación, se determinó la viabilidad de las semillas no germinadas mediante el test de firmeza (*crush test*). Se consideraron no viables aquellas semillas que al ser presionadas con una pinza estaban blandas o colapsaban; las semillas firmes fueron consideradas viables (Borza *et al.*, 2007). Los porcentajes de germinación se calcularon sobre la fracción viable de la población de semillas.

2.2.4. Determinación del rango de temperaturas sub y supraóptimas para la germinación

Se obtuvieron curvas de germinación acumulada en función del tiempo de incubación para cada tratamiento de postmaduración luego de diferentes períodos de almacenamiento. Dichas curvas fueron utilizadas para estimar el tiempo requerido para que la germinación acumulada alcanzara los percentiles de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90%. Las estimaciones se obtuvieron por interpolación lineal entre porcentajes diarios de germinación a cada temperatura de incubación.

La tasa de germinación (TG_g , en días^{-1}), es decir, la velocidad con la que la fracción g de la población de semillas germina, se define como la inversa del tiempo (t_g) que tarda dicha fracción en germinar:

$$TG_g = \frac{1}{t_g} \quad (2.3)$$

Dichas tasas se graficaron en función de la temperatura de incubación y la temperatura óptima de germinación (correspondiente a la máxima tasa de germinación) se determinó por medio del ajuste de funciones de regresión lineal. Se consideró que existe una relación lineal entre las tasas de germinación y la temperatura de incubación dentro de cada rango térmico de germinación (García-

Huidobro *et al.*, 1982; Covell *et al.*, 1986). Siguiendo la aproximación propuesta por Chantre *et al.* (2009), para el cálculo del rango térmico subóptimo de germinación, la ecuación ajustada fue:

$$TG_g = \frac{T - T_b(g)}{\theta_1} \quad (2.4)$$

donde T es la temperatura de incubación (en °C), $T_b(g)$ es la temperatura base de germinación de cada fracción y θ_1 es el tiempo térmico subóptimo de germinación. Por otra parte, para el rango térmico supraóptimo la ecuación ajustada fue la siguiente:

$$TG_g = \frac{T_c(g) - T}{\theta_2} \quad (2.5)$$

donde $T_c(g)$ es la temperatura máxima de germinación de cada fracción y θ_2 es el tiempo térmico supraóptimo de germinación de la fracción.

El valor estimado de T_o para cada percentil fue calculado a partir de la intersección de las funciones lineales ajustadas a los rangos térmicos subóptimo y supraóptimo (Hardegree, 2006). La temperatura óptima se consideró constante a lo largo el período de postmaduración, por lo que las temperaturas óptimas calculadas para cada fecha de exhumación fueron promediadas para obtener una estimación de dicho parámetro.

En la Figura 2.1 se explica de forma gráfica la relación entre los parámetros térmicos mencionados y la temperatura de incubación de las semillas.

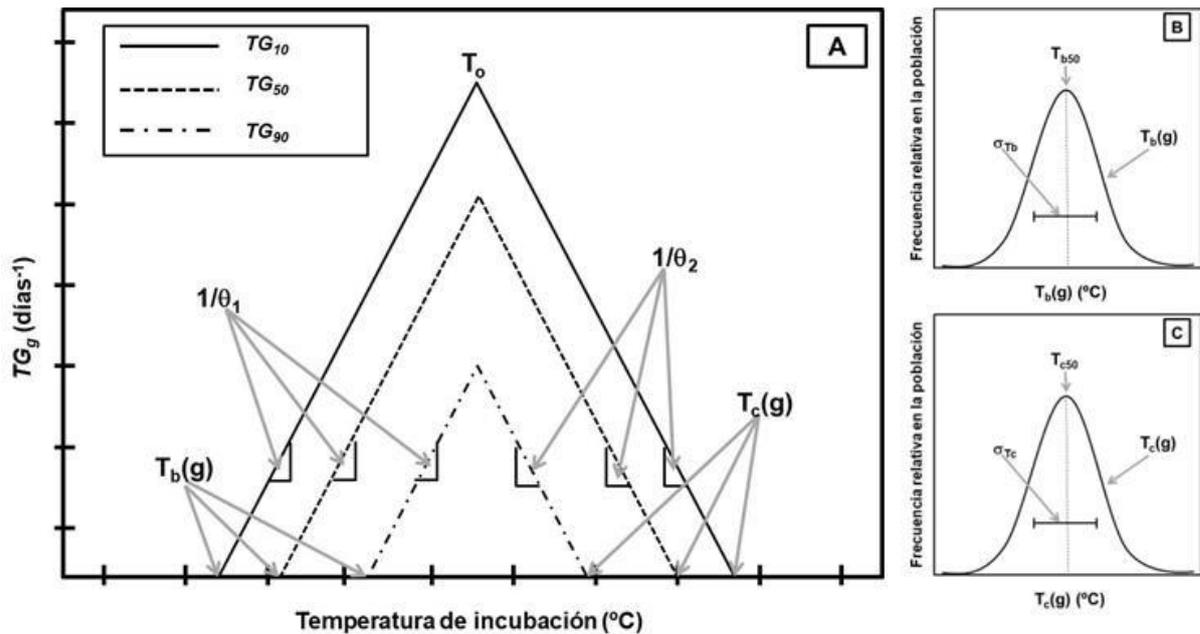


Figura 2.1. Relación entre los parámetros térmicos y la temperatura. (A) A temperaturas subóptimas, la tasa de germinación (TG_g , en días^{-1}) de cada fracción de la población de semillas aumenta linealmente con la temperatura de incubación, cuando ésta es mayor a la temperatura base de germinación de la fracción ($T_b(g)$); la pendiente de estas rectas es igual a la inversa del tiempo térmico de germinación ($1/\theta_1$), y es constante para toda la población. La máxima TG_g se observa en la temperatura óptima para la germinación (T_o), y por encima de ella decrece linealmente hasta hacerse cero cuando se alcanza la temperatura máxima para la germinación ($T_c(g)$). (B) Distribución normal de los valores de $T_b(g)$, con media T_{b50} y desvío σ_{Tb} . (C) Distribución normal de los valores de $T_c(g)$, con media T_{c50} y desvío σ_{Tc} .

2.2.5. Modelado de la germinación y obtención de los parámetros térmicos de la población.

Las curvas de germinación acumulada obtenidas experimentalmente se utilizaron para realizar ajustes de tipo no lineal, con el objetivo de determinar los parámetros térmicos óptimos asociados a la germinabilidad bajo los distintos tratamientos de postmaduración.

Se probaron distintos enfoques (Covell *et al.*, 1986; Ellis *et al.*, 1986; 1987; Washitani, 1987; Chantre *et al.*, 2009), pero se seleccionó el modelo utilizado en Chantre *et al.* (2009) por ser el que mejor ajuste proporcionó a los datos de la especie estudiada.

El modelo ajustado supone que tanto T_b como T_c siguen una distribución normal mientras que θ_1 y θ_2 se consideran constantes entre subpoblaciones (Chantre *et al.*, 2009). Para el rango térmico subóptimo la ecuación que describe la distribución de T_b es:

$$p(T_{b(g)}) = \Phi\left[\frac{T_{b(g)} - T_{b50}}{\sigma_{Tb}}\right] \quad (2.6)$$

donde p es la proporción de semillas de la fracción g de la población que germinará a una determinada T_b , T_{b50} y σ_{Tb} son la media y el desvío de la distribución normal, respectivamente, y Φ es la integral gaussiana o integral de probabilidad de la distribución normal, que se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\phi_{\mu, \sigma^2}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2.7)$$

donde μ es la media poblacional y σ es el desvío poblacional.

Para el rango térmico supraóptimo la predicción de la germinación sigue la siguiente ecuación:

$$p(T_{c(g)}) = 1 - \Phi\left[\frac{T_{c(g)} - T_{c50}}{\sigma_{Tc}}\right] \quad (2.8)$$

donde T_{c50} y σ_{Tc} son la media y el desvío estándar de la distribución normal, respectivamente (Chantre *et al.*, 2009).

Los parámetros térmicos óptimos se obtuvieron con métodos de ajuste no lineal de curvas por mínimos cuadrados usando la función Solver de Excel (Fylstra *et al.*, 1998).

Este modelo de optimización busca reducir la diferencia entre el porcentaje de germinación diario observado con el estimado a partir del modelo. Para obtener resultados dentro del rango esperado para la especie estudiada, se restringió el rango de valores que podían tomar algunos de los parámetros (Tabla 2.1). Los valores iniciales se seleccionaron dentro del rango de valores conocidos para dichos parámetros (Tabla 2.1). El modelo se ajustó luego realizando sucesivas iteraciones de los parámetros, a partir de diferentes valores iniciales, hasta lograr la mayor convergencia.

El proceso de optimización buscó minimizar el *RCME* (raíz cuadrada media de error), calculado como:

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_t (y_{obs} - y_{sim})^2}{t}} \quad (2.9)$$

donde y_{obs} y y_{sim} son los valores observados y simulados, respectivamente y t son los días de incubación de las semillas a temperatura constante.

Tabla 2.1. Valores iniciales y restricciones utilizados en las ecuaciones 2.6 y 2.8 para obtener el valor óptimo de los parámetros térmicos.

Parámetro térmico	Valor inicial	Restricciones
$T_{b(g)}$	0	≥ 0
θ_1	100	$\geq 0,1$
σ_{Tb}	1	$\leq T_b$
$T_{c(g)}$	30	$\geq T_o$
θ_2	20	$\geq 0,1$
σ_{Tc}	1	$\geq 0,1; \leq T_c$

2.2.6. Desarrollo del modelo de dormición

Una vez determinados los parámetros térmicos óptimos para cada tratamiento de postmaduración en las distintas fechas de exhumación, en cada uno de dichos parámetros se evaluó la tendencia de cambio observada en función del tiempo de postmaduración. Se cuantificó el efecto de la temperatura sobre el estado de dormición de las semillas de raigrás en función de la acumulación de unidades de tiempo térmico de postmaduración (en °C.día) por encima de una temperatura base de postmaduración, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\theta_{AR} = \sum_{t=1}^n (Tm_t - Tb_{AR}) \quad (2.10)$$

donde θ_{AR} es el tiempo térmico de postmaduración acumulado (en °C.día), Tm_t es la temperatura media diaria (en °C) del día t experimentada por las semillas en postmaduración, n es la duración del período de postmaduración de la población de semillas (en días) y Tb_{AR} es la temperatura base de postmaduración (en °C). La Tb_{AR} óptima se obtuvo por un proceso iterativo hasta alcanzar el máximo ajuste de las regresiones de T_{c50} y θ_1 para semillas con 3% de humedad, y de θ_1 y θ_2 para semillas con 13% de humedad, en ambos casos en función de θ_{AR} . El proceso iterativo

consistió en probar diferentes valores de Tb_{AR} hasta obtener la mejor correlación. El mejor ajuste de los datos se obtuvo con un valor de Tb_{AR} igual a 0°C .

De acuerdo con las tendencias de cambio observadas en los parámetros térmicos con respecto al tiempo térmico de postmaduración, se ajustaron modelos para describir la relación entre ambos. Las ecuaciones obtenidas se utilizaron para predecir cambios en los parámetros térmicos poblacionales de las semillas postmaduradas en condiciones de campo.

2.2.7. Análisis de sensibilidad de parámetros

Si bien en las ecuaciones ajustadas a los datos experimentales los parámetros se suponen constantes, en realidad éstos pueden variar entre años y entre poblaciones de semillas. Para determinar el impacto de estas variaciones sobre los resultados predichos, los valores de los parámetros fueron modificados $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ y se cuantificó el porcentaje de variación del resultado final respecto del caso base. Un gran porcentaje de cambio en el resultado final indica que una pequeña variación en el parámetro modificado resultará en una gran modificación en la estimación.

2.3. Resultados

En la Tabla 2.2 se presentan los parámetros térmicos obtenidos aplicando la metodología descrita. En las secciones subsiguientes se proporciona una descripción detallada de los hallazgos resultantes del análisis de la información experimental recabada.

Tabla 2.2. Parámetros térmicos poblacionales estimados para semillas de *Lolium perenne* postmaduradas a campo.

Contenido hídrico	Tiempo de postmaduración (Días desde enterramiento/cosecha)	θ_{AR}^a (°C.día)	Tb_{50}^b (°C)	σ_{Tb}^c	θ_1^d (°C.día)	RCME ^e	Tc_{50}^f (°C)	σ_{Tc}^g	θ_2^h (°C.día)	RCME ^e
3%	21/71	1742,5	0	5	105,85	123,38	26,10	1,37	8,29	2,21
	49/99	2304,1	0	4,92	89,72	79,90	25,13	5	19,12	24,98
	126/176	3326,3	0	4,05	83,58	62,88	26,79	2,29	12,13	3,98
	183/233	3894,9	0,67	5	80,08	67,99	28,24	2,39	10,61	5,29
	278/328	5701,2	0	4,8	76,04	65,03	29,34	1,83	12,26	8,99
13%	21/71	1742,5	1,11	5	116,74	66,87	31,43	4,89	23,67	2,54
	49/99	2304,1	3,71	5	97,71	55,47	33,29	5	27,86	20,75
	126/176	3326,3	3,41	2,34	67,21	69,47	28,70	3,18	15,83	3,63
	183/233	3894,9	3,58	5	87,73	73,79	29,32	2,55	12,42	5,69
	278/328	5701,2	10,43	5	72,95	28,31	27,05	1,99	9,59	7,51
19%	21/71	1742,5	7,92	5	64,60	48,22	26,13	1,26	5,38	2,55
	49/99	2304,1	9,72	5	61,22	48,94	26,86	1,73	11,28	5,31
	126/176	3326,3	10,55	5	51,76	53,93	27,78	2,44	19,98	6,10
	183/233	3894,9	11,1	5	61,22	57,13	26,29	1,02	6,73	2,19
	278/328	5701,2	23,97	5	37,61	11,95	24,97	0,60	10,42	1,42

^a Tiempo térmico de postmaduración

^b Temperatura media base

^c Desvío de la temperatura base

^d Tiempo térmico para la germinación en el rango de temperaturas subóptimas

^e Raíz cuadrada media de error

^f Temperatura media máxima

^g Desvío de la temperatura máxima

^h Tiempo térmico para la germinación en el rango de temperaturas supraóptimas

2.3.1. Curvas de germinación acumulada, tasas de germinación y viabilidad

En la Figura 2.2 se muestran las curvas de germinación acumulada de semillas recién cosechadas, observadas en función del tiempo de incubación. Los máximos porcentajes finales de germinación (aproximadamente 60%) se observaron en semillas incubadas a 5 y a 8°C. A medida que la temperatura de incubación aumentó, se pudo apreciar una disminución en el porcentaje final de germinación, mientras que a 28°C no germinó ninguna semilla.

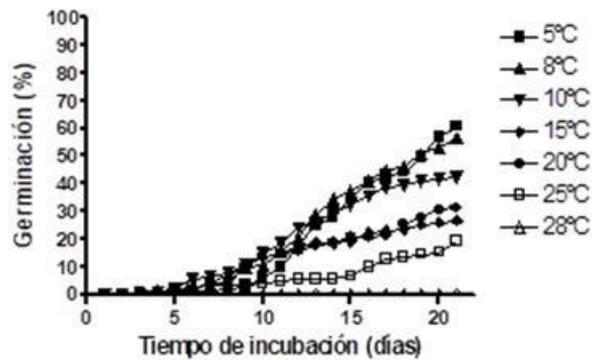


Figura 2.2. Curvas de germinación acumulada observadas para semillas de *L. perenne* recién cosechadas.

Posteriormente se analizó la germinación de semillas con diferentes contenidos hídricos y tiempos de postmaduración. Los resultados se reportan en las Figuras 2.3 – 2.5.

En el caso de las semillas cuyo contenido hídrico fue de 3%, se observó que a medida que transcurrió la postmaduración las semillas incubadas a 25 y 28°C mostraron un aumento en el porcentaje de germinación final, llegando en el caso de aquellas incubadas a 25°C a superar el 90% luego de 278 días de postmaduración a campo (Figura 2.3 E). En el resto de las temperaturas de incubación también se apreciaron aumentos en el porcentaje de semillas germinadas. Además, se observó que con el progreso de la postmaduración, la germinación comenzó más temprano, es decir, aumentó la tasa de germinación a medida que las semillas fueron saliendo de la dormición (Figura 2.3).

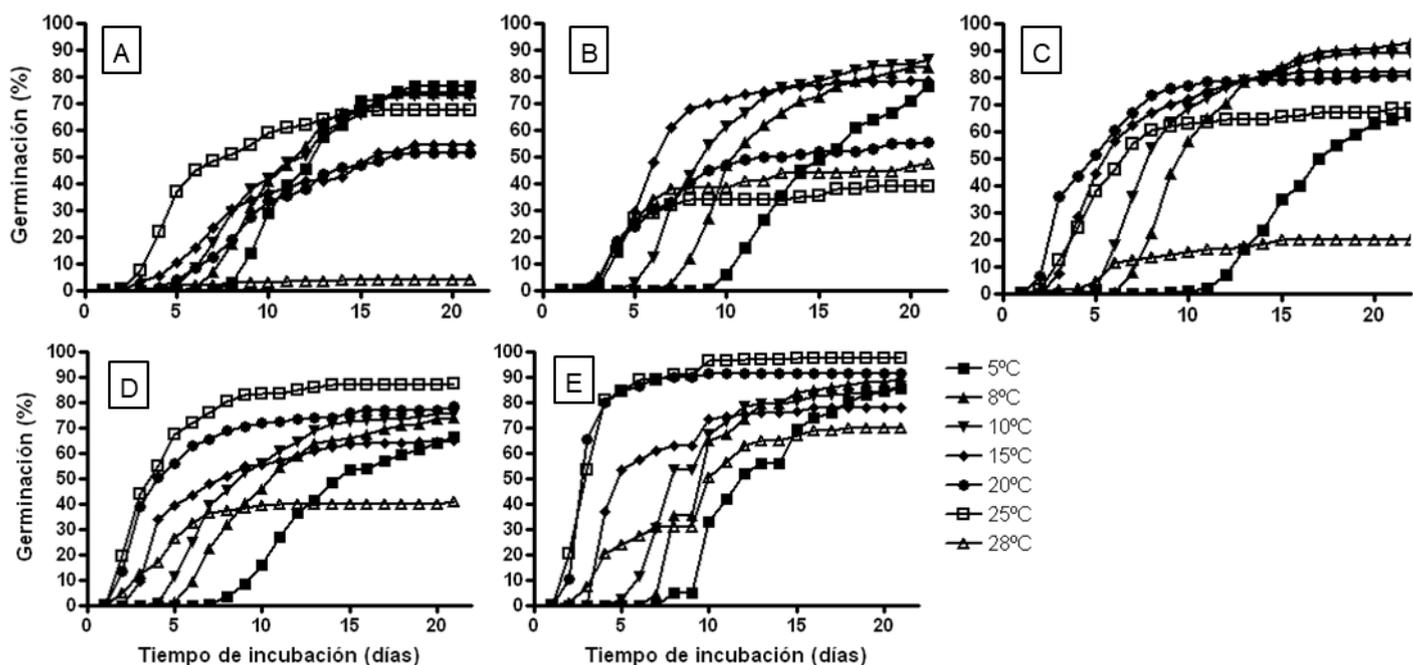


Figura 2.3. Curvas de germinación acumulada observadas para semillas de *L. perenne* postmaduradas a campo, con un contenido hídrico de 3% (base peso seco) luego de A) 21, B) 49, C) 126, D) 183 y E) 278 días de enterramiento.

Para las semillas con un contenido hídrico de 13%, se observó que luego de tan sólo 21 días de entierro las semillas incubadas a 25°C mostraron un elevado porcentaje de germinación, superior al 80% (Figura 2.4 A). Si bien se trata de una temperatura elevada para la especie, por encima de su T_o , este porcentaje se mantuvo alto, aunque decreciente durante todo el período (Figura 2.4). Para el resto de las temperaturas de incubación se observa, en general, una mayor tasa de germinación a mayor temperatura. Sin embargo, los porcentajes finales de germinación alcanzados van variando con el paso del tiempo de postmaduración. En los comienzos del período de postmaduración a campo, el porcentaje de germinación final alcanzado es similar a temperaturas de incubación entre 10 y 20°C, rondando entre un 60 y un 70%, con excepción de las semillas incubadas a 5°C, las cuales mostraron en todos los casos un porcentaje mucho menor (Figura 2.4).

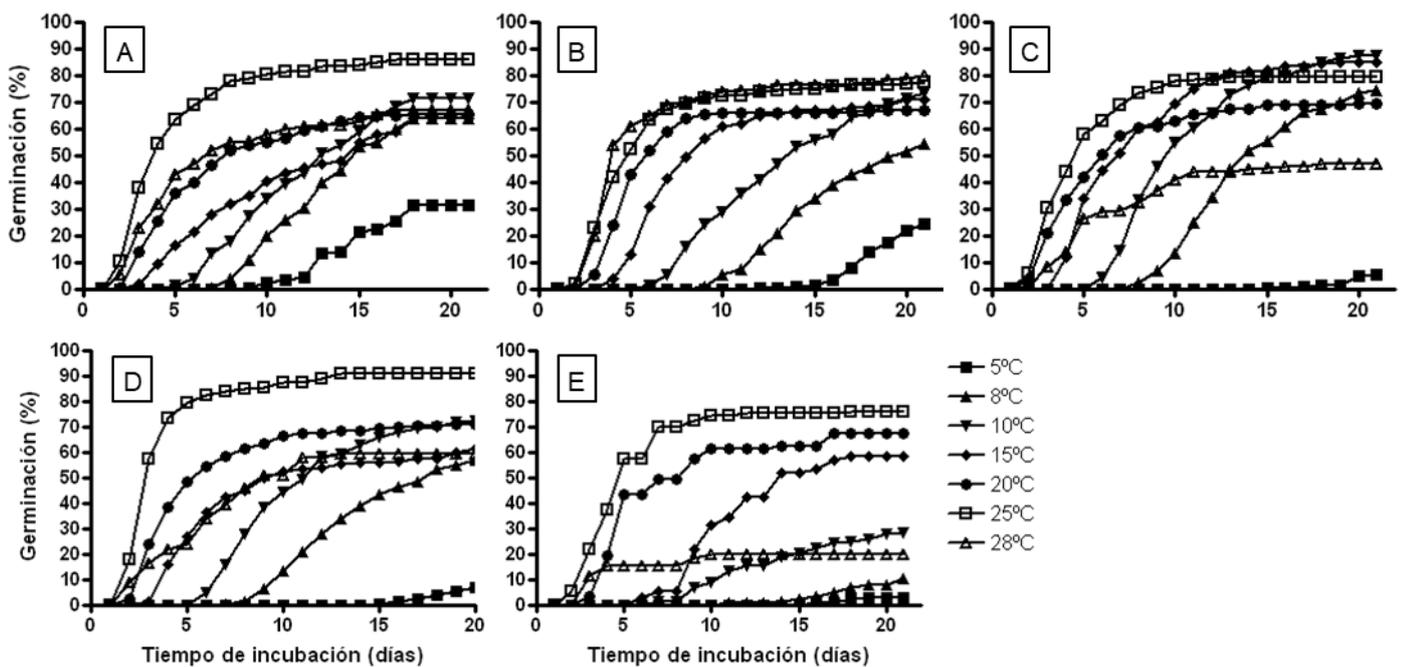


Figura 2.4. Curvas de germinación acumulada observadas para semillas de *L. perenne* postmaduradas a campo, con un contenido hídrico de 13% (base peso seco) luego de A) 21, B) 49, C) 126, D) 183 y E) 278 días de enterramiento.

Finalmente, en el caso de las semillas cuyo contenido hídrico fue del 19%, se observó que hasta la anteúltima fecha de exhumación (183 días), la tasa de germinación fue mayor mientras mayor fue la temperatura de incubación, con excepción de las semillas germinadas a 28°C (Figura 2.5). A 25°C los porcentajes de germinación fueron mayores que a cualquier otra temperatura de incubación, rondando entre 70 y 80% en todos los casos. En cambio, luego de 278 días de postmaduración a campo, se observaron tasas de germinación similares para todas las temperaturas de germinación, acompañadas por porcentajes finales de germinación que no superaron el 20% (Figura 2.5 E).

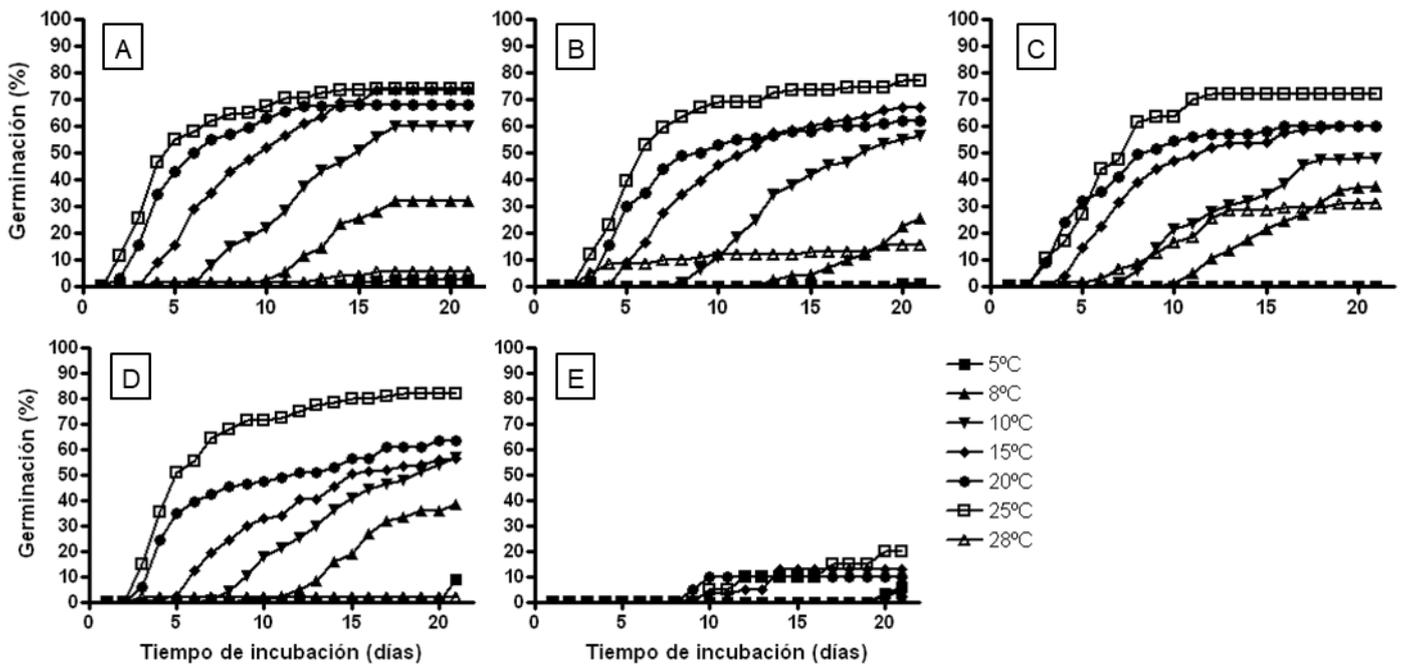


Figura 2.5. Curvas de germinación acumulada observadas para semillas de *L. perenne* postmaduradas a campo, con un contenido hídrico de 19% (base peso seco) luego de A) 21, B) 49, C) 126, D) 183 y E) 278 días de enterramiento.

Con respecto a la viabilidad, el almacenamiento de semillas con un alto contenido hídrico (19%) acelera la pérdida de viabilidad de las semillas, respecto de aquellas que tienen un contenido hídrico menor ($p < 0,05$). Dicha pérdida de viabilidad se observa muy tempranamente durante el período de postmaduración (Figura 2.6 C). En cambio, en semillas almacenadas con un contenido hídrico de 3%, la viabilidad no se vio afectada durante el período de tiempo considerado (Figura 2.6 A), mientras que aquellas almacenadas con un contenido hídrico del 13% empezaron a mostrar una disminución en su viabilidad hacia el final del período de postmaduración considerado ($p < 0,05$) (Figura 2.6 B).

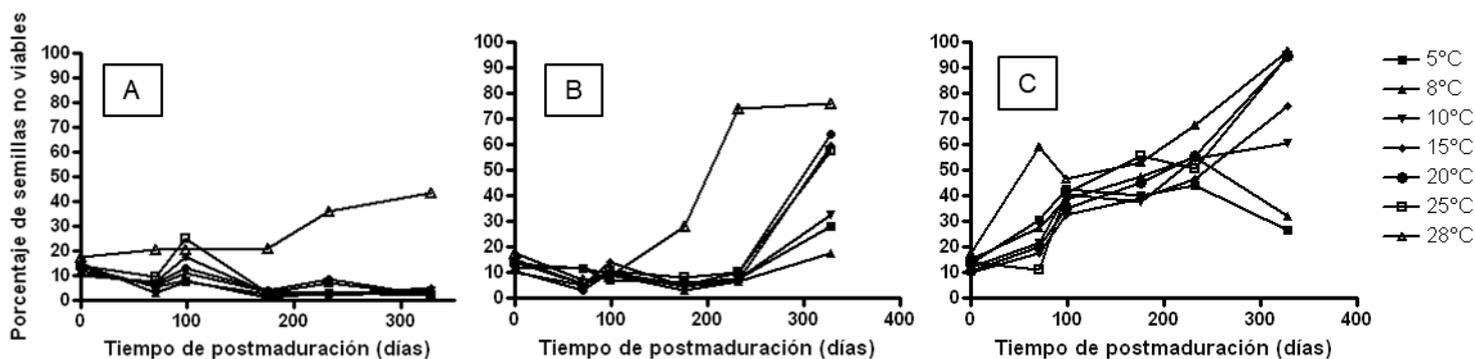


Figura 2.6. Evolución de la proporción de semillas no viables en función del tiempo de maduración, cuando el contenido hídrico de las mismas fue de A) 3%; B) 13% y C) 19%.

2.3.2. Cambios en los parámetros térmicos durante el período de postmaduración.

En esta sección se investiga la funcionalidad de los parámetros térmicos del modelo de germinación con el período de postmaduración. Para ello se proponen modelos sencillos que permitan correlacionar estas variables.

En el caso de semillas cuyo contenido hídrico fue del 3% se observó un incremento lineal significativo de la temperatura media máxima de germinación (T_{c50}) al aumentar el tiempo de postmaduración ($p = 0,0029$). El incremento estimado entre semillas recién cosechadas y aquellas postmaduradas durante 328 días fue de 4,4°C (Tabla 2.2; Figura 2.7 A).

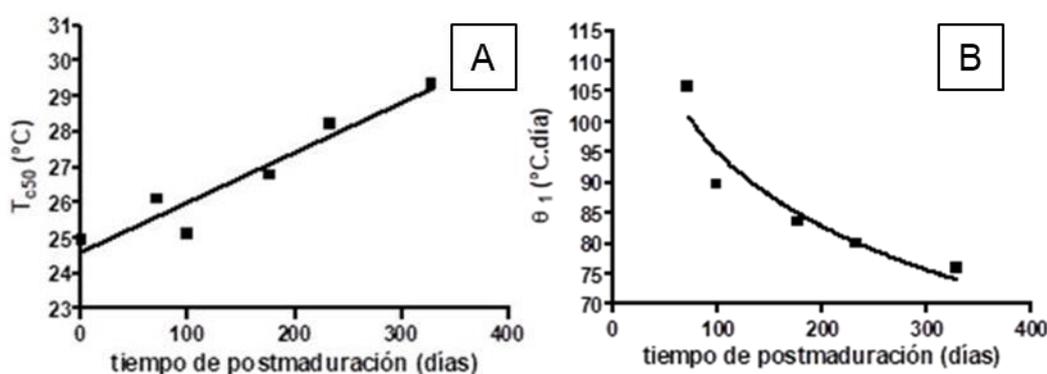


Figura 2.7. Aumento de la temperatura media máxima de germinación (T_{c50}) (A) y disminución del tiempo térmico para la germinación en el rango térmico subóptimo (θ_1) (B) en función del tiempo de postmaduración transcurrido desde la cosecha de las semillas de *Lolium perenne* postmaduradas con un contenido hídrico de 3% ($R^2 = 0,91$; $p = 0,0029$ (A) y $R^2 = 0,89$ (B)).

Por otra parte, no se observaron cambios significativos en la temperatura media base para la germinación (T_{b50}) para el mismo grupo de semillas, observándose

que $T_{b50} = 0^{\circ}\text{C} (\pm 0,3^{\circ}\text{C})$ (Tabla 2.2). A su vez, se estimó que la T_o fue de $23,2^{\circ}\text{C} (\pm 2,3^{\circ}\text{C})$.

En el rango subóptimo de temperaturas, durante el período de postmaduración desde la cosecha de las semillas se observó una disminución del tiempo térmico para la germinación (θ_1) de $105,85$ a $76,04^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$ siguiendo un patrón logarítmico (Tabla 2.2; Figura 2.7 B).

Por su parte, las variaciones observadas en σ_{Tb} y σ_{Tc} , así como en el tiempo térmico para la germinación en el rango supraóptimo (θ_2) no parecen estar relacionadas con el tiempo de postmaduración (Tabla 2.2).

Por otro lado, las semillas con un contenido hídrico de 13%, mostraron que θ_1 sigue un patrón logarítmico, análogamente a aquellas postmaduradas con un contenido hídrico del 3% (Figura 2.8 A). En este caso, se observa una disminución de $116,74$ a $72,95^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$.

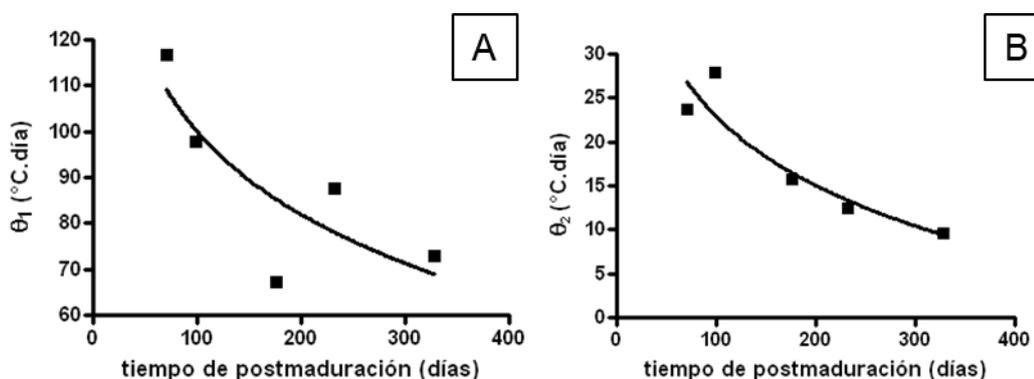


Figura 2.8. Disminución del tiempo térmico para la germinación en el rango térmico subóptimo (θ_1) (A) y del tiempo térmico para la germinación en el rango térmico supraóptimo (θ_2) (B) en función del tiempo de postmaduración desde la cosecha de las semillas de *Lolium perenne* postmaduradas con un contenido hídrico de 13% ($R^2 = 0,68$ (A) y $R^2 = 0,85$ (B)).

A diferencia de las semillas postmaduradas con un contenido hídrico del 3%, en aquellas cuyo contenido hídrico fue de 13% se observó en el rango térmico supraóptimo una disminución de θ_2 en función del tiempo de postmaduración (Figura 2.8 B). Aquí se observa que, de necesitar $11,56^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$ a temperaturas de incubación supraóptimas al inicio del período de postmaduración, pasan a requerir $9,6^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$ al final del mismo.

No se observaron tendencias al cambio en función del tiempo de postmaduración en T_{b50} , T_{c50} , σ_{Tb} y σ_{Tc} , cuyos valores promedios fueron de 4,45 ($\pm 3,51^\circ\text{C}$), 29,96 ($\pm 2,42^\circ\text{C}$), 4,47 ($\pm 1,19^\circ\text{C}$) y 3,52 ($\pm 1,37^\circ\text{C}$) $^\circ\text{C}$, respectivamente. A su vez, se estimó que la T_o fue de $24,78^\circ\text{C}$ ($\pm 0,31^\circ\text{C}$)

Dado que se observó la misma tendencia para θ_1 en semillas con contenidos hídricos de 3 y 13%, se realizó una comparación de ambos modelos logarítmicos utilizando la función "Compare models" del *software* Graph Pad Prism (2003). Los resultados del análisis arrojaron que no se encontraron diferencias significativas entre ambas curvas, por lo que los datos podrían usarse para armar un único modelo ($p = 0,72$).

Por último, las semillas de raigrás perenne postmaduradas con un contenido hídrico de 19% no mostraron tendencias de cambios en función del tiempo de postmaduración en ninguno de sus parámetros térmicos (Tabla 2.2), probablemente debido a que las estimaciones de dichos parámetros mostraron porcentajes de error muy elevados.

2.3.3. Desarrollo del modelo de dormición.

De acuerdo con lo observado en la sección 2.3.2, el aumento de T_{c50} (Figura 2.7 A) y la disminución de θ_1 (Figura 2.7 B) durante el período de postmaduración caracterizaron el proceso de salida de la dormición de las semillas de *L. perenne* cuyo contenido hídrico fue de 3%, mientras que en aquellas con un contenido hídrico de 13% dicho proceso fue caracterizado por la disminución tanto de θ_1 (Figura 2.8A) como de θ_2 (Figura 2.8B). Evidentemente, los cambios observados en los parámetros térmicos no dependieron solamente del tiempo de postmaduración, sino también de la temperatura ambiente a la que ocurrió dicho fenómeno. Por esta razón, se cuantificó el efecto de la temperatura sobre el estado de dormición de las semillas de raigrás en función de la acumulación de unidades de tiempo térmico de postmaduración (en $^\circ\text{C}\cdot\text{día}$) por encima de una temperatura base de postmaduración, utilizando la ecuación 2.10.

Como se observa en la Figura 2.9 A, los cambios en los valores de T_{c50} fueron correctamente descritos por una función lineal creciente del tiempo térmico de postmaduración ($p = 0,0089$; $R^2 = 0,85$). La función que describe el aumento de T_{c50} en

función del tiempo térmico de postmaduración para semillas con un contenido hídrico del 3% es la siguiente:

$$T_{c50} = 8,2e - 4\theta_{AR} + 24,42 \quad (2.11)$$

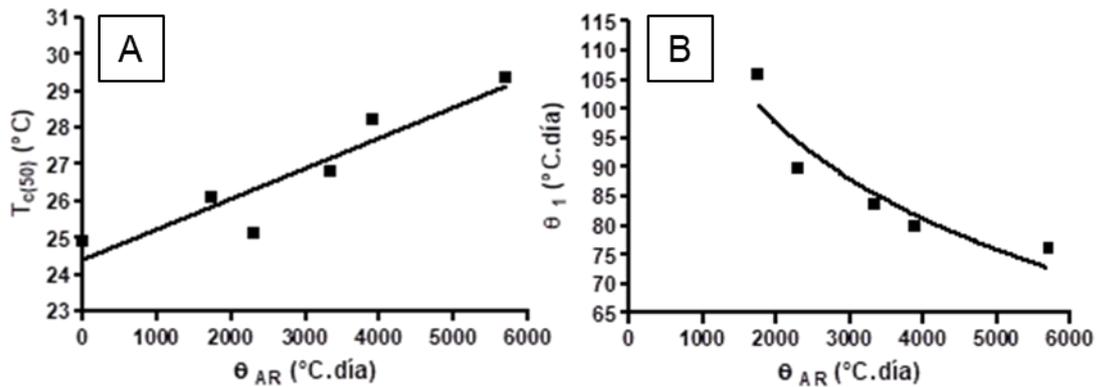


Figura 2.9. Aumento de la temperatura media máxima de germinación (T_{c50}) (A) y disminución del tiempo térmico requerido para la germinación en el rango de temperaturas subóptimas (θ_1) (B) en función del tiempo térmico de postmaduración, para semillas de *Lolium perenne* postmaduradas con un contenido hídrico de 3%.

Por otra parte, el tiempo térmico requerido para la germinación en el rango de temperaturas subóptimas (θ_1) disminuye en función del tiempo térmico de postmaduración, siguiendo un patrón logarítmico ($p < 0,05$; $R^2 = 0,88$) (Figura 2.9 B). Dicha disminución fue adecuadamente descrita a través de la siguiente ecuación:

$$\theta_1 = -23,8 \ln(\theta_{AR}) + 278,4 \quad (2.12)$$

El parámetro θ_1 también disminuye siguiendo un patrón logarítmico en función del tiempo térmico de postmaduración en semillas que fueron postmaduradas con un contenido hídrico del 13% ($R^2 = 0,68$) (Figura 2.10A). La siguiente ecuación describió adecuadamente lo observado:

$$\theta_1 = -36,56 \ln(\theta_{AR}) + 374,6 \quad (2.13)$$

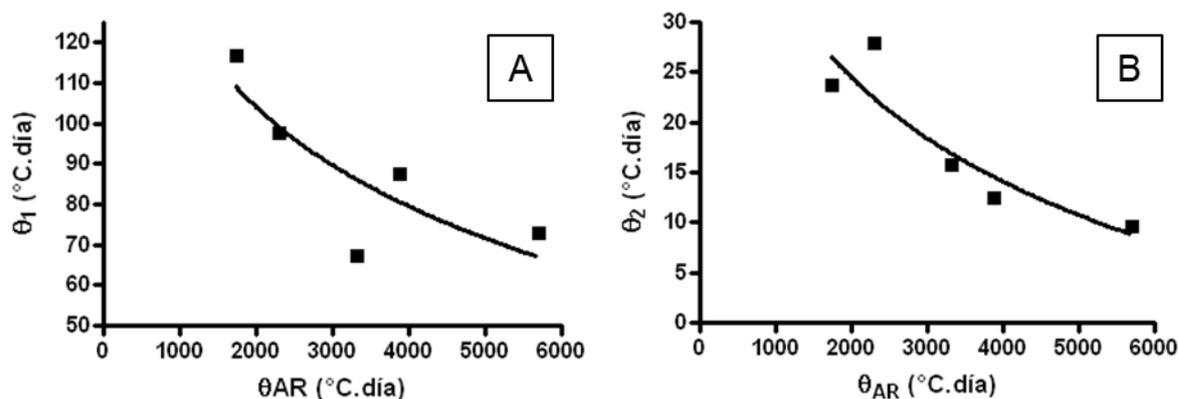


Figura 2.10. Disminución del tiempo térmico requerido para la germinación en el rango de temperaturas subóptimas (θ_1) (A) y del tiempo térmico requerido para la germinación en el rango de temperaturas supraóptimas (θ_2) en función del tiempo térmico de postmaduración, para semillas de *Lolium perenne* postmaduradas con un contenido hídrico de 13%.

Por último, el patrón logarítmico decreciente se observó también en θ_2 en semillas postmaduradas con el contenido hídrico mencionado anteriormente ($R^2= 0,81$) (Figura 2.10 B). Dicha disminución en función del tiempo térmico de postmaduración fue adecuadamente descrita a través de la ecuación que se muestra a continuación:

$$\theta_2 = -15,02 \ln(\theta_{AR}) + 138,8 \quad (2.14)$$

2.3.4. Análisis de sensibilidad de parámetros

Tabla 2.3. Porcentaje de variación en la estimación de parámetros térmicos. T_{c50} es la temperatura media máxima; θ_1 es el tiempo térmico para la germinación en el rango de temperaturas subóptimas y θ_2 es el tiempo térmico para la germinación en el rango de temperaturas supraóptimas

Valor estimado del parámetro	Porcentaje de variación			
	-20%	-10%	+10%	+20%
T_{c50} (ecuación 2.11)				
0,0008	-2,15	-1,07	1,07	2,15
24,42	-17,85	-8,93	8,93	17,85
θ_1 (ecuación 2.12)				
-23,80	46,60	23,30	-23,30	-46,60
278,40	-66,60	-33,30	33,30	66,60
θ_1 (ecuación 2.13)				
-36,56	79,40	39,70	-39,70	-79,40
374,60	-99,40	-49,70	49,70	99,40
θ_2 (ecuación 2.14)				
-15,02	154,94	77,47	-77,47	-154,94
138,80	-174,94	-87,47	87,47	174,94

En la Tabla 2.3 se pueden observar los porcentajes de variación en los valores de los parámetros térmicos al producirse variaciones en los parámetros de las ecuaciones que los estiman. Para el cálculo de los parámetros térmicos con dichas ecuaciones se utilizó un valor de θ_{AR} igual a 3585°C.día, obtenido como promedio del tiempo térmico acumulado a campo desde la dispersión de las semillas hasta el final del período de emergencia a campo.

De acuerdo con ella, se puede apreciar que los parámetros de la ecuación 2.11, la cual estima el valor de T_{c50} , son los que sufren variaciones más bajas en los resultados. En uno de ellos se registraron variaciones menores al 2,5% y en el otro menores al 20%, lo que indicaría que dicha ecuación es bastante robusta en la estimación de la temperatura media máxima.

Por otra parte, los parámetros de las ecuaciones 2.12, 2.13 y 2.14, sufren grandes variaciones al momento de estimar a los tiempos térmicos de germinación. Esto indicaría que se trata de parámetros que hay que estimar con la mayor precisión posible, ya que su impacto sobre el resultado final de la estimación es muy grande.

2.4. Discusión

En el presente capítulo se observó que tanto los datos obtenidos a partir de semillas postmaduradas con un contenido hídrico de 3% como aquellos obtenidos a partir de semillas cuyo contenido hídrico fue de 13% permitieron la construcción de modelos de tiempo térmico que describen la salida de la dormición en semillas de *L. perenne*. Por el contrario, los resultados obtenidos a partir de semillas postmaduradas con un contenido hídrico elevado (19%) no lo permitieron, ya que dicho contenido de humedad habría acelerado la pérdida de viabilidad de gran parte del lote de semillas con el paso del tiempo (Figura 2.6). Junto con la temperatura, el contenido hídrico de la semilla determinará la tasa de deterioro de la misma; a mayor contenido hídrico, el grado de deterioro es mayor (Roberts, 1988). En el caso de estas semillas, el envejecimiento causado por el elevado contenido hídrico durante todo el período de postmaduración ocurrió al mismo tiempo que la salida de la dormición; por ese motivo, esta interacción habría provocado una interferencia en la estimación de esta última.

Con los resultados experimentales obtenidos, se desarrollaron dos modelos de tiempo térmico de postmaduración para la salida de la dormición de semillas de *L. perenne*. Por un lado, se observó que en semillas postmaduradas con un contenido

hídrico del 3% tanto T_{c50} como θ_1 variaron en función del tiempo térmico de postmaduración acumulado. Los cambios en los valores de T_{c50} fueron adecuadamente descritos por una función lineal creciente de θ_{AR} (Figura 2.9 A; ecuación 2.11), indicando una relación positiva entre el incremento de la temperatura máxima promedio y la acumulación de tiempo térmico de postmaduración. Estos resultados concuerdan con otros previamente reportados (Steadman *et al.*, 2003b; Chantre *et al.*, 2009). En cambio, se observó que θ_1 disminuye en función de θ_{AR} siguiendo un patrón logarítmico (Figura 2.9 B; ecuación 2.12), lo cual indica que, a medida que se acumula tiempo térmico durante la postmaduración, la cantidad de tiempo térmico necesario para la germinación de las semillas disminuye.

Por otra parte, las semillas postmaduradas con un contenido hídrico del 13% mostraron el mismo patrón de disminución de θ_1 en función de θ_{AR} que las mencionadas en el párrafo anterior (Figura 2.10 A; ecuación 2.13). En este caso no se observó que T_{c50} sufriera variaciones en función del tiempo térmico acumulado durante el período de postmaduración; esto podría deberse, en parte, a la pérdida de vigor asociada al alto contenido hídrico observada en las semillas durante el transcurso del período de postmaduración (Figura 2.6 B). Sí se observaron variaciones en θ_2 ; en este parámetro térmico se observó un patrón logarítmico decreciente de su valor ante valores crecientes de θ_{AR} , de forma análoga a la observada para θ_1 (Figura 2.10 B; ecuación 2.14). Por lo tanto, con un mayor contenido hídrico en las semillas, el tiempo térmico necesario para la germinación tanto en condiciones sub como supraóptimas disminuye durante la salida de la dormición.

Como se mencionó en la sección 2.3, la salida de la dormición no sólo se vio afectada por la acumulación de tiempo térmico durante el período de postmaduración, sino que el contenido hídrico al que las semillas fueron mantenidas durante dicho período también habría tenido su efecto sobre la variación de los parámetros térmicos. Dicho contenido hídrico se mantuvo constante a lo largo de todo el período de postmaduración en cada lote de semillas en los experimentos detallados en el presente capítulo. Sin embargo, en condiciones de campo las semillas se ven sometidas a continuas fluctuaciones en el mismo, por los cambios que se producen en la humedad edáfica. Estas fluctuaciones de hidratación pueden o no interactuar con la acumulación de tiempo térmico de las semillas, modificando el comportamiento germinativo de las mismas. Steadman *et al.* (2003a), por ejemplo, encontraron que en semillas de *Lolium rigidum* postmaduradas a campo el tiempo térmico de

postmaduración fue suficiente para describir la salida de la dormición de las mismas; el agregado del tiempo hidrotermal, en ese caso, agregaría mayor complejidad al modelo sin necesariamente mejorar el ajuste. Contrariamente, Bair *et al.* (2006) llegaron a la conclusión de que un modelo de tiempo hidrotermal mejoraba las predicciones de salida de la dormición de *Bromus tectorum* L. en condiciones de campo, y Batlla y Benech-Arnold (2006) encontraron que las fluctuaciones en el contenido hídrico del suelo sería un factor adicional que afecta a los parámetros térmicos de *Polygonum aviculare* durante el período de postmaduración. Por estos motivos, debería determinarse si la sustitución del tiempo térmico por el de tiempo hidrotermal en *L. perenne* podría traducirse en un mejor ajuste del mismo, ya que la interacción entre la humedad edáfica y la temperatura estarían modificando el comportamiento germinativo de sus semillas.

Por otra parte, con respecto al ambiente térmico y lumínico en el que se desarrollaron los experimentos, en los mismos las semillas fueron incubadas a temperaturas constantes y con luz continua. En condiciones de campo, las semillas se encuentran sometidas a alternancia lumínica y térmica, ésta última con diferencias notorias de temperatura entre los momentos de luz y de oscuridad. Gramshaw (1972) encontró que en *L. rigidum* la alternancia térmica durante el día afectaba el comportamiento germinativo con respecto a aquellas semillas que se incubaron a temperaturas constantes. Por otra parte, en estudios más recientes se han encontrado muy buenos ajustes en *L. perenne* utilizando alternancia térmica durante la germinación de semillas (Chantre, comentario personal). Por lo tanto, la inclusión de la alternancia térmica durante la incubación podría darle mayor precisión a la estimación de los parámetros térmicos.

Con respecto al análisis de sensibilidad de los parámetros de los modelos ajustados, en tres de las cuatro ecuaciones (ecuaciones 2.12, 2.13 y 2.14) se pudo observar que los porcentajes de variación en las estimaciones de los parámetros térmicos de la población de semillas de *L. perenne* fueron muy elevados, lo que indica que ante pequeños cambios en el ajuste de las ecuaciones, el valor que toma el parámetro térmico estimado diferirá significativamente. Esto puede deberse, en gran medida, a los altos porcentajes de error encontrados al realizar las estimaciones de los parámetros térmicos en cada fecha de exhumación, sobre todo en el rango de temperaturas subóptimas (Tabla 2.2). Esto, a su vez, pudo ser causado por diversos factores, como la falta de inclusión del tiempo hidrotermal o de alternancia térmica en el desarrollo de los modelos, asunto ya mencionado anteriormente, o por los

problemas surgidos con el equipamiento durante el desarrollo de los experimentos. La inclusión del tiempo hidrotermal y de la alternancia térmica, junto con el uso de equipos que funcionen con mayor precisión podrían reducir los porcentajes de error encontrados durante el desarrollo de esta tesis. Cabe aclarar que los otros enfoques probados con este conjunto de datos (Covell *et al.*, 1986; 1987; Washitani, 1987) proporcionaron ajustes con porcentajes de error mayores que los obtenidos con el enfoque seleccionado para la realización de este trabajo.

Debido a los problemas de ajuste ya mencionados, no fue posible emplear los modelos generados en condiciones de laboratorio para estimar la emergencia de la maleza a campo, y por lo tanto, no se pudieron validar los modelos de dormición desarrollados con datos independientes. El desarrollo de un modelo de salida de la dormición que estime los parámetros térmicos de manera más precisa podría acoplarse a otros que consideren el crecimiento de la plántula en preemergencia y la emergencia, tal como se ha planteado en Colbach *et al.* (2006). El agregado de ecuaciones que relacionen los procesos de salida de la dormición y la germinación con el destino de las semillas una vez germinadas serían de utilidad para predecir con mayor precisión los patrones de emergencia a campo (Forcella *et al.*, 2000).

CAPÍTULO 3

PRODUCCIÓN DE SEMILLAS Y ESTADÍOS FENOLÓGICOS EN *Lolium perenne* L.

Dos aspectos importantes para la confección de herramientas de asistencia a la toma de decisiones para el manejo de malezas son la estimación de la producción de semillas y el momento de cambio de estadio fenológico de las plantas. Se realizaron dos experimentos con el objetivo de (i) modelar la producción de semillas de *Lolium perenne* en función de la densidad de plantas y de la densidad de espigas, tanto en presencia como en ausencia de un cultivo de trigo y (ii) estimar el tiempo térmico acumulado necesario para pasar de un estadio fenológico al siguiente. Para el modelado de la producción de semillas, se utilizaron cinco densidades de siembra de *L. perenne*, con y sin presencia de un cultivo de trigo como competidor, y se ajustaron modelos hiperbólicos a los datos obtenidos. Para la estimación de la acumulación de tiempo térmico para el cambio de estadio fenológico, se sembraron semillas despiertas de *L. perenne*, bajo cuatro tratamientos diferentes surgidos de la combinación de distintos niveles de riego y fertilización nitrogenada, y se realizaron seguimientos semanales utilizando la escala decimal de Zadoks. Se observó que tanto en el caso del raigrás que creció en competencia con el trigo como aquel que lo hizo sin él, el ajuste de las hipérbolas fue mejor en términos del número de espigas m^{-2} , probablemente debido a la alta variabilidad del número de espigas producido por planta. En cuanto al momento de cambio del estadio fenológico, no se encontraron evidencias de que los tratamientos aplicados hayan afectado la acumulación de tiempo térmico para alcanzar dichos estadios. Además, se observó que el tiempo térmico acumulado para alcanzar el estadio de cuatro hojas no es significativamente diferente a aquel necesario para iniciar el macollaje.

3.1. Introducción

Como se mencionó en el Capítulo 1, el conocimiento de la bioecología de las malezas es fundamental para desarrollar herramientas de asistencia a la toma de decisiones para su manejo, ya que ciertos aspectos demográficos son clave para predecir la evolución a largo plazo de la población de la especie problema y por lo tanto para lograr su control óptimo.

En el caso de especies de malezas cuyo único medio para perpetuarse es a través de semillas, la estimación de su producción es crítica para el desarrollo de modelos de dinámica poblacional que permitan predecir la evolución de una población a largo plazo y evaluar las consecuencias de las prácticas de manejo (Norris, 2007). El crecimiento o decrecimiento de la población dependerá de la reproducción de los

individuos que sobrevivan hasta la madurez, ya que en estos casos la mayor fuente de ingreso al banco es la lluvia de semillas (Cousens y Mortimer, 1995).

En la actualidad, al elegir las operaciones para controlar una maleza se pone énfasis en disminuir drásticamente la densidad de las plantas. Sin embargo, las pocas plantas que sobrevivan, aunque no afecten el rendimiento del cultivo, podrían producir suficientes semillas para reabastecer el banco del suelo, si la producción de semillas por planta resultara elevada (Norris, 2007). Por esta razón es importante considerar este aspecto del ciclo de vida al momento de elegir la estrategia adecuada para controlar la maleza en cuestión (Norris, 2007).

La determinación de la producción de semillas no siempre resulta sencilla. Según Norris (2007), es necesario hacer un recuento preciso de la cantidad de semillas que una planta es capaz de producir. Sin embargo, la mayoría de los autores estima la producción de semillas indirectamente a partir del número de frutos o inflorescencias producidos (Cousens y Mortimer, 1995), o de alguna otra variable, como la pérdida de rinde del cultivo (Canner *et al.*, 2002) o la longitud del raquis (Gallart *et al.*, 2010).

La fecundidad (número de semillas producido por una planta durante su vida) es afectada por diversos factores como el momento de emergencia de las plántulas, la competencia intra e interespecífica, las enfermedades, el tamaño de las plantas al alcanzar la madurez y las condiciones climáticas (Cousens y Mortimer, 1995). La densidad de la maleza y del cultivo afectarán también la producción de semillas por planta; al aumentar una o la otra, el tamaño de la planta y la producción de semillas por planta disminuirá (Cousens y Mortimer, 1995).

La producción de semillas de maleza suele modelarse en función de su densidad (en plantas m^{-2}) (González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 1991, 2004; Buckley *et al.*, 2001; Pedreros, 2001; Vidotto *et al.*, 2001; Munier-Jolain *et al.*, 2002; Pannell *et al.*, 2004; Holman *et al.*, 2006; Puricelli *et al.*, 2007; Benjamin *et al.*, 2009), aunque también ha sido estimada en función del peso seco de la parte aérea de la planta (Firbank y Watkinson, 1986; Freckleton y Watkinson, 1998; Lintell-Smith *et al.*, 1999; Puricelli *et al.*, 2004; Torra *et al.*, 2008).

En algunos casos, el número de semillas que puede producir una maleza ha sido estimada multiplicando la densidad de plantas por la producción promedio por

planta (Vidotto *et al.*, 2001; González-Andújar *et al.*, 2005), o bien usando una relación alométrica (Firbank y Watkinson, 1986; Freckleton y Watkinson, 1998; Lintell-Smith *et al.*, 1999), un modelo lineal (Pedreros, 2001; Puricelli *et al.*, 2004; Borger *et al.*, 2009), un modelo exponencial (Torra *et al.*, 2008) o un modelo hiperbólico (González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 1991, 2004; Buckley *et al.*, 2001; Munier-Jolain *et al.*, 2002; Puricelli *et al.*, 2007; Benjamin *et al.*, 2009).

En el caso particular de especies de malezas gramíneas como *Lolium rigidum* y *Avena sterilis* var. *ludoviciana*, se ha establecido que la producción de semillas suele ajustar adecuadamente a un modelo hiperbólico que explique la dependencia entre la fecundidad y la densidad de la maleza (González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 1991; 2004).

Otro aspecto demográfico importante para la confección de herramientas de asistencia a la toma de decisiones es el desarrollo de la especie a lo largo de su ciclo de vida. En el manejo de malezas, independientemente del método de control utilizado, es necesario realizar las operaciones de control en el momento en que las plantas se encuentran en el estadio de crecimiento apropiado, con el objetivo de obtener una eficiencia elevada sin afectar el normal crecimiento del cultivo. En el caso del control químico, la mayoría de los herbicidas requiere que la planta se encuentre en el estadio fenológico en el que es más sensible al producto aplicado. Aquellas plantas que se encuentran fuera del mismo (más jóvenes o más grandes) sobrevivirán al control y competirán con el cultivo. Por este motivo, es de vital importancia conocer la fenología de la especie, con el propósito de predecir el momento adecuado para realizar las operaciones de control.

Una forma simple de predecir en qué momento las plantas de malezas estarán en el estadio fenológico adecuado para su control es la cuantificación del tiempo térmico que se requiere acumular para pasar de un estadio de crecimiento al siguiente, ya sea evaluando directamente el valor de tiempo térmico acumulado para alcanzar un determinado estadio (Taberner, 1996; Chauvel *et al.*, 2002; 2005) o bien construyendo ecuaciones simples que puedan ser usadas en esa predicción (Cousens *et al.*, 1992; Colbach *et al.*, 2007; Benjamin *et al.*, 2010).

En este capítulo se abordará el estudio de la producción de semillas y la fenología del raigrás, especie que motiva esta tesis. Para desarrollar herramientas de asistencia a la toma de decisiones que guíen al productor en la elección de las

operaciones a realizar para el control de *L. perenne*, tanto la producción de semillas como los cambios de estadio fenológicos deben ser estimados con la mayor precisión posible, ya que de la primera dependerá el impacto a largo plazo de las operaciones de control realizadas, y de la segunda, la eficiencia de control de dichas operaciones (ver Capítulo 5).

Como se mencionó en el Capítulo 1, el raigrás (*Lolium perenne* L.) es una especie maleza que puede tener un comportamiento perenne, bienal o anual, dependiendo de la población, y su reproducción depende únicamente de la producción de semillas (Beddows, 1967). Puede producir entre 4 y 14 semillas por espiguilla, lo que hace que la producción de semillas por planta sea elevada (Beddows, 1967). Con el fin de evitar la producción de nuevas semillas y el reabastecimiento del banco del suelo, las plantas de raigrás deben ser controladas en el momento adecuado. En el caso del control químico, la mayor parte de los productos gramínicos eliminan las plantas que se encuentran en estadios de entre 2 y 4 hojas, o bien hasta el inicio del macollaje. Aquellas plantas que al momento de la aplicación son más jóvenes o superaron la etapa de macollaje, escaparán al control y podrán llegar a la madurez, produciendo semillas que abastecerán el banco del suelo y causarán problemas a largo plazo.

Los objetivos del trabajo reportado en este capítulo son: (i) modelar la producción de semillas de *L. perenne* por unidad de superficie, tanto en presencia como en ausencia del cultivo de trigo y (ii) estimar el tiempo térmico acumulado (en °C.día) necesario para pasar de un estadio fenológico al siguiente.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Material vegetal

En diciembre de 2010 se cosecharon espigas maduras de *Lolium perenne* L. a partir de una población espontánea ubicada en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Bordenave (37° 50' S; 63° 01' O; Bordenave, provincia de Buenos Aires, Argentina). Luego de la cosecha, los cariopses (de aquí en más denominados semillas) fueron separados de las espigas manualmente y almacenados a temperatura de 20°C ± 3°C hasta el inicio de los ensayos.

3.2.2. Lugar de trabajo

Ambos experimentos se llevaron a cabo en parcelas experimentales del CCT CONICET Bahía Blanca (38° 43' S; 62° 16' O; Camino La Carrindanga, Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires, Argentina), entre los meses de junio y diciembre de 2011.

3.2.3. Experimento 1: estimación de la producción de semillas de *L. perenne*

Trabajo experimental

Con el objetivo de determinar el efecto de la competencia intra e interespecífica sobre la producción de semillas en la maleza, se realizó un experimento utilizando cinco densidades de siembra de *L. perenne* (90, 270, 810, 1216 y 2430 semillas m⁻²) con y sin presencia de un cultivo de trigo (variedad ACA 202) como competidor. En los ensayos con competencia interespecífica, el trigo fue sembrado usando una densidad de 225 semillas m⁻² (para lograr una densidad de 180 plantas m⁻²), a 5 cm de profundidad y con una distancia entre hileras de 20 cm. Posteriormente, el raigrás se sembró al voleo y de manera superficial, utilizando las densidades previamente mencionadas.

Para darle una mayor ventaja competitiva a la maleza y lograr una emergencia homogénea, previo a la siembra las semillas de *L. perenne* se almacenaron durante 15 días en bolsitas de polipropileno colocadas en una atmósfera con alta humedad relativa (85%) a temperatura ambiente, con el objetivo de aumentar el contenido hídrico de las semillas y activar su metabolismo. Esta humedad relativa se logró mediante la colocación de una solución de glicerol al 38% dentro de un desecador.

Previo a la siembra de ambas especies, se realizó una fertilización de base utilizando fosfato diamónico (DAP), a una dosis de 40 kg ha⁻¹. En el momento del macollaje del cultivo, se realizó la fertilización nitrogenada utilizando urea granulada a una dosis de 100 kg ha⁻¹. Para permitir el desarrollo normal de las dos especies sembradas, las parcelas se regaron semanalmente y se desmalezaron de manera manual.

Se utilizó un diseño en bloques aleatorizados simples y completos. Dentro del bloque a cada parcela se asignó una superficie de 1 m². Se realizaron cinco repeticiones por tratamiento.

Al completarse el ciclo de ambas especies se cosechó el raigrás, tomando dos muestras de 0,2 m x 0,5 m en cada parcela. A partir del material cosechado dentro de cada muestra se determinó: número de plantas m⁻², número de espigas m⁻² y número de semillas m⁻². Estos datos fueron utilizados para el ajuste de los modelos que se detallan a continuación.

Análisis estadístico y ajuste de modelos

El ajuste de los modelos de regresión no lineal se realizó usando los *software* GraphPad Prism 4 (GraphPad Prism, 2003) e INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008), luego de la comprobación de los supuestos de homocedasticidad y normalidad de los datos. En los casos en que estos supuestos no se cumplieron, los datos fueron transformados usando la operación raíz cuadrada.

A los datos de número de semillas producido por planta de raigrás en presencia y en ausencia de cultivo se ajustaron modelos hiperbólicos siguiendo la metodología utilizada en González-Andújar y Fernández-Quintanilla (1991, 2004). El modelo a ajustar fue el siguiente:

$$S = \frac{DM f}{1 + \text{sup } DM} \quad (3.1)$$

donde S es el número de semillas m⁻², f es el número de semillas producido por una planta aislada (es decir, sin sufrir los efectos de la competencia), sup es el área requerida por una planta para producir f semillas y DM es el número de plantas maduras m⁻².

Debido a que el número de espigas que puede producir una planta de raigrás presenta gran variabilidad, sobre todo cuando la densidad de plantas es baja, se modeló también la producción de semillas en función del número de espigas, con el objetivo de analizar también el efecto de esta variable. Para ello, se reemplazó la densidad (DM) en la ecuación 3.1 por el número de espigas m⁻² (Es):

$$S = \frac{Es fe}{1 + \text{sup } e Es} \quad (3.2)$$

donde fe es el número de semillas producidas por una espiga aislada y $supe$ es el área requerida por una espiga para producir fe semillas.

Análisis de sensibilidad de parámetros

Si bien en las ecuaciones ajustadas a los datos experimentales los parámetros se suponen constantes, en realidad, éstos pueden variar entre años y entre localidades (Fernández-Quintanilla *et al.*, 2000; González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 1991).

Para determinar el impacto de estas variaciones sobre los resultados predichos, los valores de los parámetros fueron modificados $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ y se cuantificó el porcentaje de variación del resultado final respecto del caso base. Un gran porcentaje de cambio en el resultado final indica que una pequeña variación en el parámetro modificado resultará en una gran modificación en la estimación.

3.2.4. Experimento 2: estimación del tiempo térmico necesario para el cambio de estadio fenológico.

En parcelas de $0,25 \text{ m}^2$, el 9 de agosto de 2011 se sembraron semillas despiertas de *L. perenne*, al voleo, usando una densidad de siembra de 400 semillas m^{-2} . Las plantas emergidas se sometieron a cuatro tratamientos distintos: (i) con riego complementario, con fertilización nitrogenada; (ii) con riego complementario, sin fertilización nitrogenada; (iii) sin riego complementario, con fertilización nitrogenada; y (iv) sin riego complementario, sin fertilización nitrogenada. Se utilizó un diseño completamente aleatorizado con tres repeticiones por tratamiento.

En el caso de las parcelas que recibieron riego complementario, éste se realizó semanalmente. La fertilización nitrogenada se realizó usando urea granulada a una dosis de 10 g m^{-2} , 40 días después de la siembra. Las parcelas se desmalezaron manualmente.

Luego de la emergencia, en cada parcela se marcaron diez plantas para realizar el seguimiento de su crecimiento a lo largo del tiempo. La fenología se siguió mediante observaciones semanales, utilizando la escala decimal de Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974). Los estadios registrados fueron: dos hojas (1.2, escala Zadoks), tres hojas

(1.3), cuatro hojas (1.4), inicio de macollaje (2.1) e inicio de encañazón (3.1, primer nudo visible). Dichas observaciones se realizaron hasta el 29 de noviembre de 2011.

Una vez determinadas las fechas en que se produjeron los diferentes cambios fenológicos, se calcularon los grados día acumulados desde la emergencia en cada una de las etapas, tomando como umbral inferior de crecimiento (UI) el de 0°C (Taberner, 1996) y utilizando la siguiente fórmula:

$$TT_x = \sum_{t=1}^n Tm_t - UI \quad (3.3)$$

donde TT_x es el tiempo térmico acumulado (en $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$) para alcanzar el estadio fenológico x , n es el tiempo necesario para alcanzar dicho estadio fenológico (en días), Tm_t es la temperatura media del día t (en $^{\circ}\text{C}$) y UI es el umbral inferior de crecimiento (en $^{\circ}\text{C}$). Los datos climáticos utilizados para calcular la acumulación de tiempo térmico (temperaturas mínima y máxima diarias) fueron obtenidos por la Estación Meteorológica ubicada en el predio del CERZOS-CONICET, a 50 m del experimento.

Para determinar la existencia de diferencias debidas al riego y a la fertilización, se realizó un ANOVA doble utilizando el *software* INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008), luego de comprobar el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. En los casos en los que no se encontraron diferencias, se obtuvo un valor promedio del tiempo térmico necesario para alcanzar cada estadio.

3.3. Resultados

3.3.1. Estimación de la producción de semillas de *L. perenne*

Análisis estadístico

Se encontraron diferencias significativas en la cantidad de semillas producidas por unidad de superficie, tanto en función de la presencia o ausencia del cultivo ($p < 0,0001$) como en función de la densidad de semillas sembradas ($p = 0,001$).

El modelo hiperbólico descrito en la ecuación 3.1 fue ajustado a los datos de número de semillas m^{-2} en función de la densidad (plantas m^{-2}), en presencia y en ausencia del cultivo. Los mismos ajustes se realizaron en función del número de espigas m^{-2} , utilizando la ecuación 3.2.

Sin cultivo

En el caso de la producción de semillas en función de la densidad de plantas cuando el raigrás fue sembrado en ausencia de trigo, la regresión fue significativa, aunque el ajuste no fue muy bueno debido a la gran variabilidad de los datos ($R^2 = 0,46$) (Figura 3.1 A; Tabla 3.1). La cantidad de semillas producidas por planta cuando la densidad tiende a cero es alto (1193 semillas planta⁻¹), lo que indicaría que esta especie tiene un gran potencial reproductivo y por lo tanto sugiere que la presencia de una baja densidad de plantas que llegue a producir semillas sería importante para abastecer el banco del suelo para el año siguiente. El área requerida por una planta para alcanzar ese máximo potencial es de 85 cm².

Tabla 3.1. Parámetros de la regresión de la producción de semillas m^{-2} en función de la densidad de plantas y de la densidad de espigas, en plantas de *Lolium perenne* que crecieron sin cultivo. *f* y *fe* indican el número de semillas producidas por una planta o espiga aisladas, respectivamente. *sup* y *supe* indican el área que necesitan una planta o espiga para producir *f* y *fe* semillas, respectivamente.

En función de la densidad de plantas			
Parámetro	Estimación	Intervalo de confianza 95%	p
<i>sup</i>	0,0085	[0,0005; 0,016]	0,0377
<i>f</i>	1193	[433; 1952]	0,0035
En función de la densidad de espigas			
Parámetro	Estimación	Intervalo de confianza 95%	p
<i>supe</i>	0,0001	[4,9 x 10 ⁻⁶ ; 0,0002]	0,0414
<i>fe</i>	47,98	[37,06; 58,89]	<0,0001

Cuando estos mismos datos se analizaron en función de la densidad de espigas, el ajuste mejoró con respecto a la regresión anterior ($R^2 = 0,86$) (Figura 3.1 B; Tabla 3.1). Se espera que el número máximo de semillas producidas por espiga sea de aproximadamente 48, necesitándose para ello un área de $1,1 \text{ cm}^2$.

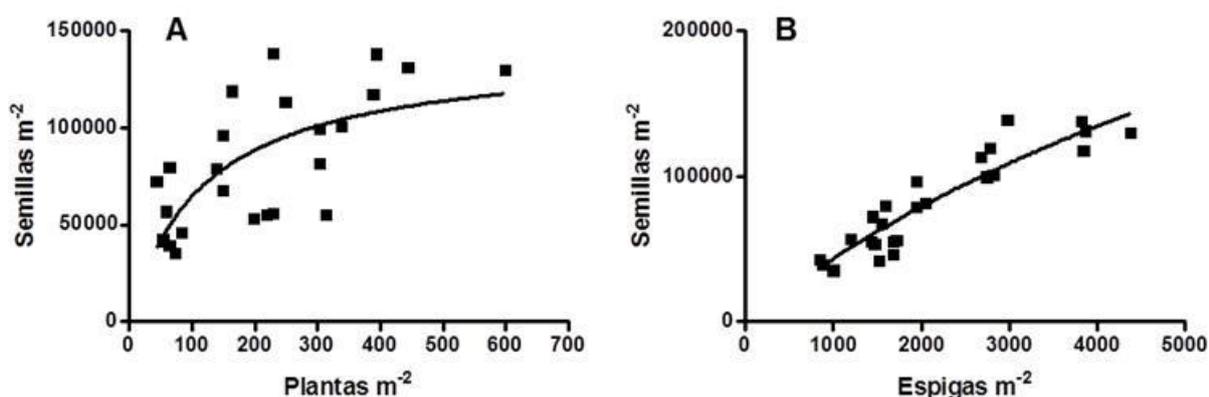


Figura 3.1. Ajuste de las hipérbolas 3.1 (A) y 3.2 (B) a los datos de producción de semillas m^{-2} en función de A) densidad de plantas y B) densidad de espigas, en plantas de *Lolium perenne* que crecieron sin cultivo ($R^2 = 0,46$ y RCME = 76058, y $R^2 = 0,86$ y RCME = 12769, respectivamente).

Con cultivo

Debido a que los datos de producción de semillas en función de la densidad de plantas de raigrás al crecer en competencia con trigo no cumplían el supuesto de homocedasticidad, el número de semillas m^{-2} fue transformado usando raíz cuadrada. La regresión obtenida es altamente significativa, con un buen ajuste ($R^2 = 0,74$) (Figura 3.2 A; Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Parámetros de la regresión de la producción de semillas m^{-2} en función de la densidad de plantas y de la densidad de espigas, en plantas de *Lolium perenne* que crecieron con cultivo. f y fe indican el número de semillas producidas por una planta o espiga aisladas, respectivamente. sup y $supe$ indican el área que necesitan una planta o espiga para producir f y fe semillas, respectivamente.

En función de la densidad de plantas			
Parámetro	Estimación	Intervalo de confianza 95%	p
sup	0,012	[0,004; 0,0189]	0,0037
f	3,317	[1,796; 4,838]	0,0002
En función de la densidad de espigas			
Parámetro	Estimación	Intervalo de confianza 95%	p
$supe$	0,001	[0,3752; 0,5858]	<0,0001
fe	0,4805	[0,0009; 0,0019]	<0,0001

El supuesto de homocedasticidad tampoco se cumplía para los datos de producción de semillas en función de la densidad de espigas, por lo que éstos también fueron transformados usando raíz cuadrada. Se logró un muy buen ajuste de los datos ($R^2 = 0,92$), mucho mejor que el realizado en función de densidad de plantas (Figura 3.2 B; Tabla 3.2).

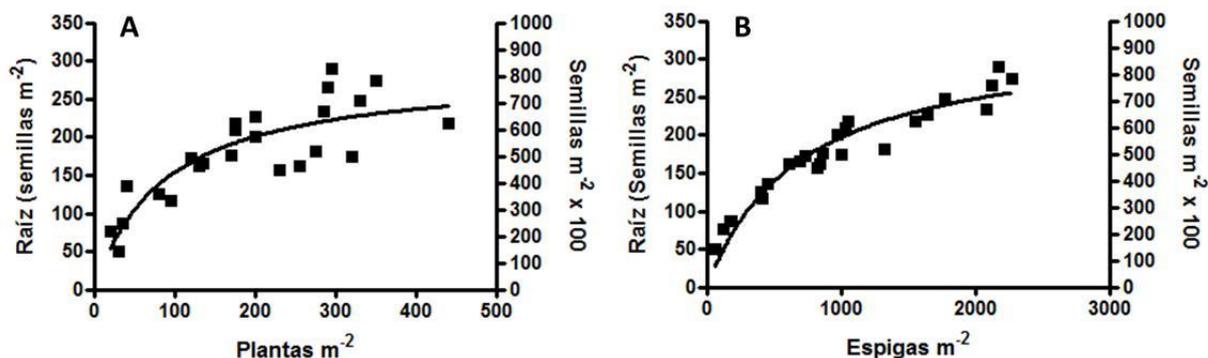


Figura 3.2. Ajuste de las hipérbolas 3.1 (A) y 3.2 (B) a los datos (transformados usando raíz cuadrada) de producción de semillas m^{-2} en función de A) densidad de plantas y B) densidad de espigas, en plantas de *Lolium perenne* que crecieron con cultivo ($R^2 = 0,74$ y RCME = 13593, y $R^2 = 0,92$ y RCME = 24134, respectivamente).

Tanto en el caso del raigrás que creció en competencia con el trigo como sin él, el ajuste de las hipérbolas fue mejor en términos del número de espigas m^{-2} en lugar del logrado con el número de plantas m^{-2} . Esto podría deberse a que el número de espigas producido por planta de raigrás es altamente variable (de acuerdo a lo que se pudo apreciar en el desarrollo de las experiencias), por lo que resulta más confiable la estimación de semillas producidas por espiga que por planta. La mayor variabilidad se observa cuando las plantas crecen en ausencia de un competidor de otra especie.

Análisis de sensibilidad de parámetros

El análisis de sensibilidad de las ecuaciones ajustadas se realizó variando $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ uno de los parámetros de la hipérbola, dejando el restante fijo. Se utilizó un caso base de 100 plantas m^{-2} o 100 espigas m^{-2} , según correspondiera (Tabla 3.3).

Como era de esperar, en los cuatro ajustes realizados se observó que un determinado porcentaje de variación en los parámetros f y f_e produce una variación equivalente en la estimación del número de semillas en la planta o espiga, respectivamente. Esto indicaría que se trata de parámetros a los que hay que estimar con la mayor precisión posible, ya que tienen un impacto directo sobre la estimación de la producción de semillas.

Tabla 3.3. Porcentaje de variación de la producción de semillas. *f* y *fe* indican el número de semillas producidas por una planta o espiga aisladas, respectivamente. *sup* y *supe* indican el área que necesitan una planta o espiga para producir *f* y *fe* semillas, respectivamente.

Parámetro	Porcentaje de variación			
	-20%	-10%	+10%	+20%
Semillas m ⁻² en función de plantas m ⁻² – sin trigo				
<i>sup</i>	10,1	4,6	-4,4	-9,2
<i>f</i>	-20	-10	10	20
Semillas m ⁻² en función de plantas m ⁻² – con trigo				
<i>sup</i>	12	5,7	-5,1	-9,7
<i>f</i>	-20	-10	10	20
Semillas m ⁻² en función de espigas m ⁻² – sin trigo				
<i>supe</i>	0,2	0,1	-0,1	-0,2
<i>fe</i>	-20	-10	10	20
Semillas m ⁻² en función de espigas m ⁻² – con trigo				
<i>supe</i>	2,5	1,2	-1,2	-2,4
<i>fe</i>	-20	-10	10	20

Por su parte, los parámetros *sup* y *supe* no parecen tener un impacto tan grande sobre el resultado final como el que tienen *f* y *fe*. En el caso de los ajustes realizados en función de la densidad, los porcentajes de dicha variación son más grandes que en aquellos ajustes realizados en función de la densidad de espigas. En este último caso, las variaciones no superan un 2,5%, lo que indicaría que la precisión con que este parámetro es estimado no tiene un excesivo impacto sobre el resultado obtenido al utilizar la ecuación ajustada.

3.3.2. Evaluación del tiempo térmico necesario para pasar de un estadio fenológico al siguiente

Luego de calcular con la ecuación 3.3 el tiempo térmico acumulado a partir de la emergencia necesario para alcanzar los diferentes estadios fenológicos estudiados, se realizaron estudios con el objetivo de determinar si la diferencia de cantidad de agua recibida y/o la fertilización nitrogenada afectaron dicha acumulación.

A partir de los análisis de la varianza realizados no se encontraron evidencias significativas de que la fertilización nitrogenada a la dosis que normalmente se realiza en un cultivo de trigo ni un aumento en la cantidad de agua recibida afectarían la acumulación de tiempo térmico para alcanzar alguno de los estadios fenológicos analizados ($p > 0,05$).

Tabla 3.6. Tiempo térmico promedio (en °C.día) acumulado desde la emergencia para alcanzar los distintos estadios fenológicos

Estadio fenológico	Tiempo térmico acumulado promedio (°C.día) ± desvío estándar
2 hojas	88*
3 hojas	364,1 (± 98,81)
4 hojas	538 (± 49,6)
Inicio del macollaje	556,9 (± 37,14)
Inicio de la encañazón	926,6 (±83,24)

* El estadio de 2 hojas fue alcanzado por todas las plantas durante la misma semana y registrado en la misma medición, por lo que el promedio carece de desvío estándar

En la Tabla 3.6. se detalla el tiempo térmico promedio necesario para alcanzar cada uno de los estadios fenológicos estudiados. No se observaron diferencias significativas entre el tiempo térmico requerido para alcanzar el estadio de 4 hojas y el necesario para alcanzar el inicio del macollaje ($p = 0,3021$). Dichas diferencias sí se observaron entre los estadios de 2 y 3 hojas ($p \leq 0,0001$), entre 3 y 4 hojas ($p \leq 0,0001$) y entre el inicio del macollaje y el inicio de la encañazón ($p \leq 0,0001$). Cabe aclarar que el estadio de 2 hojas fue alcanzado por todas las plantas durante la misma semana y registrado en la misma medición, por lo que el promedio carece de desvío estándar.

3.4. Discusión

Los datos de producción de semillas en *Lolium perenne* ajustan adecuadamente a hipérbolas similares a las propuestas para otras especies emparentadas, como *L. rigidum* (González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 2004) y *Avena sterilis* (González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 1991), mostrándose que a bajas densidades, un pequeño aumento de la misma redonda en una mayor producción de semillas m^{-2} , mientras que cuando la densidad de la maleza es muy alta, un leve aumento de la misma no provoca cambios notorios en la cantidad de semillas producidas por unidad de superficie.

Los ajustes realizados en función de la densidad de espigas mostraron mejores ajustes respecto a los realizados en función de la densidad de plantas. Dado que el número de espigas por planta es altamente variable, la incertidumbre para la estimación del parámetro f es grande. En cambio, al realizar las regresiones en función de la densidad de espigas (E_s) (ecuación 3.2), el parámetro f_e pasa a estimar la cantidad de semillas que una espiga aislada es capaz de producir, independientemente de cuántas espigas tenga una planta, reduciendo así el error de la estimación y mejorando el ajuste.

El análisis de sensibilidad muestra que, de los parámetros presentes en las hipérbolas, los parámetro f (ecuación 3.1) y f_e (ecuación 3.2) son los más influyentes, y que por lo tanto cambios en el valor de estos parámetros provocan cambios de la misma magnitud en la estimación de la producción de semillas por unidad de superficie. Este comportamiento coincide con el reportado por González-Andújar y Fernández-Quintanilla (2004) en la estimación de la producción de semillas de plantas de *Lolium rigidum*. Por esta razón, es de gran importancia realizar la estimación de este parámetro con la mayor precisión posible.

En cuanto a la fenología de la especie, los tratamientos a los que fueron sometidas las plantas (irrigación y fertilización nitrogenada) no parecen haber tenido ningún efecto sobre la acumulación de tiempo térmico para el pasaje de un estadio fenológico al siguiente. Dichos resultados están de acuerdo con lo esperado, ya que los cambios de estadio fenológico suelen verse afectados casi exclusivamente por la temperatura ambiente (Ghersa y Holt, 1995; Jamieson *et al.*, 1995). Durante los meses de agosto, septiembre y octubre de 2011 la temperatura media diaria registrada osciló entre los 10 y los 15°C, y se superó los 20°C en el mes de noviembre. Es importante notar que las variaciones interanuales de temperatura afectarán la acumulación de tiempo térmico en las plantas y, por lo tanto, el tiempo de pasaje de un estadio al siguiente será distinto.

CAPÍTULO 4

PLANEAMIENTO OPERATIVO PARA EL MANEJO DE MALEZAS BASADO EN EL USO DE HERBICIDAS. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

El uso de herbicidas constituye el principal método utilizado para el control de malezas en cultivos extensivos. Un manejo racional de los mismos implica optimizar los tratamientos reduciendo al mínimo las aplicaciones a campo, lo que se traduce en una disminución de los costos derivados de las aplicaciones y un menor impacto ambiental. En este capítulo se propone un modelo de planeamiento operativo del control químico, con el objetivo de determinar los momentos óptimos de aplicación de herbicidas en cultivos de invierno orientado a maximizar el beneficio económico de la actividad teniendo en cuenta el impacto ambiental. El modelo decide sobre la aplicación de herbicidas en una base diaria y provee una cuantificación explícita del impacto ambiental a través del cálculo de los costos externos. El modelo propuesto puede adaptarse para representar cualquier sistema cultivo – maleza, siempre que se trate de un cultivo anual de invierno y que el principal medio de reproducción de la maleza sea por semilla. El material presentado en este capítulo ha sido publicado en Lodovichi *et al.* (2013). En el capítulo 5 el modelo propuesto se aplica al sistema trigo – raigrás.

4.1. Introducción

En la actualidad, el control de las malezas que acompañan a los cultivos se basa principalmente en el uso de herbicidas debido a su alta eficiencia y facilidad de aplicación. Un manejo racional de los mismos implica optimizar los tratamientos reduciendo al mínimo las aplicaciones a campo, lo que se traduce en una disminución de los costos derivados de las aplicaciones y un menor impacto ambiental. La optimización del control de malezas es un desafío que demanda gran cantidad de información. Como se describe en Wiles *et al.* (1996), para poder intervenir acertadamente es necesario conocer los patrones de emergencia de las malezas, la habilidad competitiva del cultivo, el impacto de las malezas sobre el rendimiento y la calidad del cultivo, y las opciones de manejo disponibles.

Para poder integrar toda la información disponible y facilitar la exploración sistemática del espacio de opciones de control, en los últimos años se han desarrollado numerosos Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD) basados en modelos matemáticos. En la Tabla 4.1 se proporciona un resumen de los SSD más relevantes propuestos en la literatura en los últimos años. Debido a que las malezas están adaptadas a condiciones agroecológicas específicas, los SSD son específicos

para la región para la que fueron construidos y sólo pueden ser usados en otras regiones luego de realizar los ajustes pertinentes. Por lo tanto, en todos los casos resumidos en la Tabla 4.1 el sistema maleza – cultivo estudiado se reporta junto con el país (o región) de origen.

En la Tabla 4.1 se indican además los factores climáticos, biológicos y económicos más relevantes en la construcción de estos modelos. El componente climático hace referencia a un uso explícito de datos meteorológicos, mientras que el componente biológico refleja el modelado cuantitativo de algunos de los subprocesos ecofisiológicos más importantes (emergencia, supervivencia de plántulas, producción de semillas, etc). Este componente se clasifica, a su vez, en empírico o mecanístico, reconociendo que la aproximación mecanística emplea, en general, algo de información empírica.

La mayoría de los SSD se han desarrollado para malezas anuales presentes en cultivos de trigo (Cousens *et al.*, 1986; Doyle *et al.*, 1986; Berti *et al.*, 2003; Pannell *et al.*, 2004; Parsons *et al.*, 2009), aunque otros cultivos, como la soja y la remolacha azucarera, también han sido motivo de estudio (Berti y Zanin, 1997; De Buck *et al.*, 1999; Rydahl, 2004).

La mayoría de los sistemas fueron diseñados en países europeos (Cousens *et al.*, 1986; González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 1991, 2004; Berti y Zanin, 1997; Falconer y Hodge, 2001; Berti *et al.*, 2003; Colbach *et al.*, 2007; Parsons *et al.*, 2009; Torra *et al.*, 2010). Sin embargo, es evidente que la automatización del manejo del control de malezas es de interés mundial como lo demuestran también otros SSD desarrollados en Australia (Pannell *et al.*, 2004), África (Mullen *et al.*, 2003) y América (Wiles *et al.*, 1996).

De acuerdo con el tipo de modelo biológico, la mayoría está basada en balances dinámicos de las poblaciones (número de semillas presentes en el banco de semillas del suelo, cantidad de plántulas emergidas, número de plantas maduras) cuyos flujos son descritos por parámetros empíricos (González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 1991, 2004; Pannell *et al.*, 2004). En los casos donde la biología está representada más mecanísticamente (Colbach *et al.*, 2007; Parsons *et al.*, 2009) también se requiere información meteorológica.

En la mayoría de los SSD también se realiza algún tipo de análisis económico para evaluar el beneficio potencial de la implementación de los diferentes métodos de control (Cousens *et al.*, 1986; Wiles *et al.*, 1996; Berti y Zanin, 1997; Falconer y Hodge, 2001; Berti *et al.*, 2003; Pannell *et al.*, 2004; Parsons *et al.*, 2009; Torra *et al.*, 2010).

De acuerdo con el tipo de modalidad de uso, la mayoría de los sistemas están diseñados para ser utilizados en modo simulación, es decir, se propone una determinada estrategia de control y se calcula su efecto sobre el sistema cultivo – maleza (González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 2004; Pannell *et al.*, 2004). De esta forma, se pueden probar diferentes escenarios y luego clasificarlos de acuerdo al resultado económico, por ejemplo. Sin embargo, debido a que la cantidad de opciones de control posibles es alta si se tienen en cuenta varias temporadas agronómicas (varios años), algunos SSD también implementan algoritmos de optimización numérica para automatizar la búsqueda de la opción más conveniente (Sells, 1995; De Buck *et al.*, 1999; Falconer y Hodge, 2001; Mullen *et al.*, 2003; Rydahl, 2004; Doole y Pannell, 2008; Parsons *et al.*, 2009).

Desde el punto de vista del alcance de las decisiones, la investigación relacionada con el desarrollo de SSD se ha enfocado básicamente en el problema de planeamiento táctico/estratégico, el cual pretende guiar las decisiones de control de malezas en un horizonte de planeamiento de largo plazo (varios años). Para ello, el SSD divide las temporadas agronómicas en períodos con significancia biológica y agronómica (en lugar de usar una base diaria, por ejemplo), para llevar a cabo los cálculos e implementar las operaciones de control. La totalidad de las contribuciones detalladas en la Tabla 4.1 poseen estas características.

Finalmente, aunque todos los SSD están diseñados para intentar disminuir el uso de productos químicos y por lo tanto el impacto ambiental del control de malezas, sólo tres de los presentados en la Tabla 4.1 incluyen una evaluación cuantitativa explícita usando un indicador del impacto ambiental. Específicamente, en Berti y Zanin (1997) y Berti *et al.*, (2003) se considera la contaminación potencial de las napas subterráneas, mientras que en Falconer y Hodge (2001), el impacto de la aplicación de pesticidas se analiza usando un enfoque de optimización biobjetivo (económico y ambiental).

De la revisión anterior se puede inferir que las contribuciones se enfocan básicamente en el problema de planeamiento táctico/estratégico. De acuerdo a nuestro conocimiento, no se ha propuesto un SSD orientado a planificar el control químico dentro de una temporada agronómica. Dicho problema puede considerarse un problema de “planeamiento operativo”.

La importancia del planeamiento operativo se basa en el hecho de que si las aplicaciones de herbicidas se realizan de manera demasiado temprana se requerirán intervenciones adicionales para lograr un control efectivo, lo que redundará en costos adicionales y un mayor impacto ambiental. Por otra parte, si las aplicaciones se retrasan, las malezas de mayor edad pueden sobrevivir, por ser frecuentemente más tolerantes a los herbicidas. La presencia de estas malezas que sobreviven a los tratamientos interferirá con el cultivo reduciendo su rinde final y producirá nuevas semillas. Estas nuevas semillas al incorporarse al banco del suelo, aumentarán el potencial invasivo de la maleza en el sitio, y al cosecharse junto con las semillas del cultivo, reducirán la calidad del grano producido y podría constituirse en un medio de dispersión de la maleza si los granos fueran utilizados para la siembra.

La principal dificultad relacionada con el planeamiento operativo del control de malezas basado en el uso de herbicidas es que su patrón de emergencia es incierto. Se sabe bien que para hacer un uso eficiente de los herbicidas es esencial contar con una predicción precisa del momento de la emergencia de la maleza en relación al cultivo y de su densidad (Forcella *et al.*, 2000). Es necesario resaltar que la estimación precisa de la dinámica de emergencia de la maleza a campo es un gran desafío debido a que su inicio y magnitud dependen de las condiciones del microclima del suelo, usualmente descritas en términos de tiempo hidrotérmico acumulado, y están moduladas por caracteres complejos relacionados con la dormición de las semillas, como se indica por ejemplo en Chantre *et al.* (2012) para *Avena fatua*.

Con respecto a los factores económicos derivados del control de malezas en una temporada agronómica, los más relevantes son los vinculados con la compra y aplicación de los herbicidas en relación al beneficio económico producido por la venta del grano cosechado. En este capítulo se presenta un modelo de planeamiento operativo, que puede ser utilizado en cualquier sistema cultivo – maleza, para cultivos anuales de invierno y malezas cuyo principal medio de reproducción sea por semilla. Se trata de un modelo que indica qué herbicida/s aplicar y en qué momento (día del año) hacerlo, teniendo en cuenta tanto factores económicos como el impacto

ambiental de estas prácticas. El modelo en cuestión ha sido publicado en Lodovichi *et al.* (2013). Dicho modelo consiste en un módulo operativo que asiste en la toma de decisiones de corto plazo (dentro de la actual temporada agronómica) pero operando según los lineamientos definidos en una instancia estratégica que mire a un sistema productivo en el largo plazo (varios años).

Tabla 4.1. SSD para el manejo de malezas basados en modelos

Referencia/denominación	Maleza/cultivo	País de desarrollo	Componentes del modelo		Propuesta de evaluación			Alcance		Impacto ambiental ^d	
			Climáticos ^a	Biológicos ^b		Económica	Simulación	Optimización ^c	Operativo		Táctico/ estratégico
				Empíricos	Mecanísticos						
Doyle <i>et al.</i> (1986) y Cousins <i>et al.</i> (1986)	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Avena fatua</i> / trigo	Gran Bretaña		x		x	x		x		
Sells (1995)	<i>Avena fatua</i> , <i>Alopecurus myosuroides</i>	Gran Bretaña		x		x		x		x	
Pandey y Medd (1991)	<i>Avena fatua</i> / trigo	Australia		x		x		x		x	
Ferris <i>et al.</i> (1992) Herbicide Adviser	General	Australia	x	x			x		x		
Wiles <i>et al.</i> (1996)/GWM	General	USA		x		x	x			x	
Berti y Zanin (1997), Berti <i>et al.</i> (2003)/ GESTINF	16 especies de malezas/soja, trigo	Italia		x		x		x		x	
Wallinga (1997)	General	Países Bajos		x		x				x	
De Buck <i>et al.</i> (1999)/ BESTWINS	4 especies de malezas/ remolacha azucarera	Países Bajos		x		x		x		x	
Falconer y Hodge (2001)	General	Gran Bretaña		x		x		x		x	
Mullen <i>et al.</i> (2003)	<i>Striga sp.</i>	Mali		x		x		x			
González-Andújar y Fernández-Quintanilla (1991, 2004)	<i>Avena sterilis</i> , <i>Lolium rigidum</i>	España		x			x			x	
Pannell <i>et al.</i> (2004), Doole y Pannell (2008)/RIM	<i>Lolium rigidum</i>	Australia		x		x				x	
Rydahl (2004)/ CPO	75 especies de malezas/ 11 cultivos	Dinamarca		x				x		x	
Colbach <i>et al.</i> (2007)/ ALOMYSYS	<i>Alopecurus myosuroides</i>	Francia	x		x			x		x	
Parsons <i>et al.</i> (2009)/ Weed Manager	13 especies de malezas/ trigo	Gran Bretaña	x		x			x		x	
Torra <i>et al.</i> (2010)/PIM	<i>Papaver rhoeas</i>	España		x		x		x		x	

^a Considerados de forma cuantitativa (grados día, etc)

^b Considera temas como supervivencia de semillas, dormición, germinación, crecimiento en pre-emergencia, supervivencia de plántulas, macollaje, floración y producción de semillas

^c Implementa un algoritmo de optimización numérica para realizar la búsqueda

^d Considerado en forma cuantitativa

4.2. Descripción del modelo

En esta sección se describen los principales elementos que componen el modelo propuesto.

4.2.1. Pérdida de rinde del cultivo

La pérdida de rinde de un cultivo (y_L) causada por competencia con una única especie de maleza ha sido descrita por el modelo de hipérbola rectangular de Cousens (1985a):

$$y_L = \frac{iD}{1 + \frac{iD}{a}} \quad (4.1)$$

donde D es la densidad de la maleza en plantas m^{-2} , el parámetro i es el porcentaje de pérdida de rinde por planta de maleza por unidad de área cuando la densidad de la maleza tiende a cero y el parámetro a es la máxima pérdida potencial de rinde cuando la densidad de la maleza tiende a infinito.

Debido a que la pérdida de rinde no puede observarse directamente, el rinde final del cultivo (y) debe ser estimado como una proporción del rinde del cultivo libre de malezas (y_{wf}) en $kg\ ha^{-1}$, a través de la siguiente relación:

$$y = y_{wf} \left(1 - \frac{y_L}{100} \right) \quad (4.2)$$

La ecuación 4.1 supone que todas las plantas de maleza presentes en el campo emergen en simultáneo con el cultivo y compiten con él hasta el momento de la cosecha. Sin embargo, las plántulas de la maleza no suelen emerger simultáneamente con el cultivo, por lo que la densidad final de la maleza no es, en general, adecuada para calcular la pérdida real de rinde. De hecho, las plántulas que emergen temprano en la temporada causan pérdidas de rinde mayores que aquellas que emergen más tarde (Cousens *et al.*, 1987; Berti *et al.*, 1996). Cousens *et al.* (1987) modificaron el modelo 4.1 para incluir como parámetro el momento relativo de emergencia de la maleza:

$$y_L = \frac{bD}{e^{cRT} + \frac{bD}{a}} \quad (4.3)$$

donde RT es el intervalo de tiempo entre la emergencia de la maleza y del cultivo, b es el valor de i cuando $RT = 0$ y c es la tasa a la que i decrece a medida que RT se incrementa. RT es negativo si las plántulas de la maleza emergen antes que el cultivo y es positivo si el cultivo emerge primero.

Si bien este enfoque es más realista, en el sentido que contempla la diferencia relativa entre la emergencia de la maleza y del cultivo, todavía considera que todas las plántulas de la maleza emergen simultáneamente. Sin embargo, en la naturaleza los patrones de emergencia a campo están determinados mayormente por cohortes sucesivas cuyo impacto sobre el rinde del cultivo es diferente dependiendo del momento relativo de emergencia (Berti *et al.*, 1996). Basándose en la ecuación 4.3, Berti *et al.* (1996) propusieron el uso del concepto de “equivalente de tiempo y densidad” (TDE, por sus siglas en inglés) para considerar tanto el momento de emergencia de las plántulas como la emergencia relativa respecto del cultivo en la estimación de la pérdida de rinde del cultivo.

Para las plántulas de maleza con un determinado momento de emergencia, el TDE puede definirse como la densidad de una maleza de referencia que emerge uniformemente y compite con el cultivo hasta la cosecha causando la misma pérdida de rinde que aquella originada por la maleza real. Las malezas que emergen tempranamente tienen un TDE mayor que aquellas que lo hacen más tarde. El TDE para cada cohorte diaria, indicada por el subíndice t , se calcula como:

$$TDE_t = D_t * e^{-cRT_t} \quad (4.4)$$

En el modelo propuesto en esta tesis se usa el concepto de TDE para tener en cuenta el efecto de las diferentes cohortes de la especie maleza (es decir, plántulas que emergen en distintos momentos). El TDE se calcula para cada día del horizonte de planeamiento considerado y luego se integra para obtener un TDE global. Este TDE global se utiliza en lugar de la densidad final de la maleza (D) para estimar la pérdida de rinde del cultivo en la ecuación 4.1.

4.2.2. Evaluación del impacto ambiental

Se han ideado numerosas formas que permiten medir el impacto ambiental causado por la aplicación de herbicidas. Algunas de ellas simplemente consideran el costo de eliminar los efectos adversos causados por dichas aplicaciones (Pretty *et al.*, 2000; Pimentel, 2005). Otros, en cambio, consideran aspectos químicos y toxicológicos propios de las formulaciones para calcular un índice y clasificar los productos en función de su mayor o menor impacto sobre el ambiente, como es el caso del Cociente de Impacto Ambiental (*Environmental Impact Quotient*, EIQ) (Kovach *et al.*, 1992) y el Índice de Riesgo Ambiental (*Environmental Risk Index*, ERI) (Alister y Kogan, 2006).

De la combinación de los enfoques mencionados surge la propuesta de Leach y Mumford (2008), que permite cuantificar el impacto ambiental como un costo monetario o externalidad. Esta metodología fue aplicada por ejemplo al uso de herbicidas en sistemas de cultivo de remolacha azucarera en Leach y Mumford (2011). Debido a su generalidad, y al hecho de que una externalidad puede incluirse directamente en una función objetivo económica, este fue el enfoque adoptado en esta tesis para incorporar al modelo operativo la cuantificación del impacto ambiental.

La metodología propuesta por Leach y Mumford (2008) se denomina Cuantificación Ambiental de Pesticidas (*Pesticide Environmental Accounting*, PEA). Los costos externos considerados incluyen el monitoreo de la contaminación del suelo, del agua y de los alimentos, y la toxicidad de estos productos sobre el hombre y la fauna. Estos costos son generalmente absorbidos por la sociedad y, por lo tanto, no son tenidos en cuenta explícitamente durante el proceso de toma de decisiones individuales llevado a cabo por productores agropecuarios.

La propuesta de Leach y Mumford está basada en el Cociente de Impacto Ambiental (EIQ) (Kovach *et al.*, 1992). El EIQ describe el impacto ambiental de un pesticida en términos de un cociente eco-toxicológico, calculado para cada pesticida considerando ocho categorías como se muestra en las ecuaciones 4.5 - 4.12 para la nomenclatura proporcionada en la Tabla 4.2:

- Efectos sobre el aplicador (EA):

$$EA = (DT \cdot 5 \cdot C) \quad (4.5)$$

- Efectos sobre quien cosecha (*EC*):

$$EC = (DT \cdot P) \cdot C \quad (4.6)$$

- Efectos sobre el consumidor (*ECon*):

$$ECon = C \cdot \left(\frac{Su + P}{2} \right) \cdot SY \quad (4.7)$$

- Contaminación de aguas subterráneas (*ECAS*):

$$ECAS = L \quad (4.8)$$

- Efectos sobre organismos acuáticos (*EOAc*):

$$EOAc = F \cdot R \quad (4.9)$$

- Efectos sobre aves (*EAv*):

$$EAv = Da \cdot \left(\frac{Su + P}{2} \right) \cdot 3 \quad (4.10)$$

- Efectos sobre abejas (*EAb*):

$$EAb = Z \cdot P \cdot 3 \quad (4.11)$$

- Efectos sobre insectos benéficos (*EIB*):

$$EIB = Ba \cdot P \cdot 5 \quad (4.12)$$

Las variables del miembro derecho de las ecuaciones 4.5 – 4.12 pueden tomar valor 1, 3 o 5, dependiendo de si sus efectos son pequeños, medianos o grandes, respectivamente. Los valores de referencia para asignar dichos coeficientes se enumeran en la Tabla 4.2. Para cada producto químico, la asignación del valor del

coeficiente se realiza a partir de la información existente sobre dicho producto en fichas técnicas y estudios toxicológicos.

Tabla 4.2. Variables utilizadas en el cálculo del cociente de impacto ambiental (EIQ) y criterio de asignación de coeficientes (Tomado de Kovach *et al.*, 1992)

Símbolo	Nombre	Variable medida	Criterio de asignación de coeficientes		
			1	3	5
<i>DT</i>	Toxicidad dermal	DL50 ^b dermal aguda en ratas o conejos (mg kg ⁻¹)	> 2000	200-2000	< 200
<i>C</i>	Toxicidad crónica	Probabilidad de efectos a largo plazo sobre la salud	Baja	Mediana	Alta
<i>P</i>	Vida media de los residuos del pesticida en la superficie de la planta	Momento de aplicación del pesticida	Herbicidas preemergentes	Herbicidas postemergentes	---
<i>Su</i>	Vida media del pesticida en el suelo	Vida media de los residuos del pesticida (días)	< 30	30-100	> 100
<i>SY^a</i>	Modo de acción del pesticida	Actividad sistémica del pesticida	Herbicidas	---	---
<i>L</i>	Potencial de lixiviación	Probabilidad de lixiviación	Baja	Mediana	Alta
<i>F</i>	Toxicidad en peces	CL50 ^c – 96 horas (ppm)	> 10	1-10	< 1
<i>R</i>	Potencial de pérdidas desde la superficie	Probabilidad de pérdidas desde la superficie	Baja	Mediana	Alta
<i>Da</i>	Toxicidad en aves	CL50 ^c – 8 días (ppm)	> 1000	100-1000	1-100
<i>Z</i>	Toxicidad en abejas	Probabilidad de intoxicación	Baja	Mediana	Alta
<i>Ba</i>	Toxicidad en artrópodos benéficos	Probabilidad de intoxicación	Baja	Mediana	Alta

^a Independientemente de si los productos son o no sistémicos, esta variable toma valor 1 para cualquier herbicida, debido a que se considera que estos productos no son directamente aplicados sobre alimentos.

^b Dosis letal 50: dosis del producto que elimina al 50% de la población en un tiempo determinado.

^c Concentración letal 50: concentración del producto (en el agua o en el aire) que elimina al 50% de la población en un tiempo determinado.

El PEA provee el costo externo por kg de ingrediente activo aplicado de un plaguicida promedio y está definido por la siguiente ecuación:

$$PEA = \sum_{\text{categorías EIQ}} (\text{coefEIQ} \cdot \text{CMD} \cdot \text{Dosis}) \cdot \text{CM} \cdot \text{RPIB} \quad (4.13)$$

Este costo externo se distribuye entre los ocho componentes del EIQ. Cada categoría es clasificada según su impacto (bajo, mediano o alto) de acuerdo al valor calculado con las ecuaciones 4.5 - 4.12 y se transforma en un coeficiente (*coefEIQ*) que puede tomar valores de 0,5, 1 y 1,5, respectivamente, empleando la Tabla 4.3. Por su parte cada categoría tiene asociado un costo externo promedio por hectárea (*CMD*, en Euros kg⁻¹ de ingrediente activo) (Tabla 4.3), el cual se ajusta a cada sustancia química, multiplicándolo por la dosis de aplicación a campo (*Dosis*, en kg de ingrediente activo ha⁻¹) del herbicida en cuestión, para obtener un costo externo estimado en Euros ha⁻¹.

Los costos externos calculados hasta el momento (en Euros ha⁻¹ aplicación⁻¹) están basados en estimaciones promedio de Estados Unidos de América, Reino Unido y Alemania, las cuales consideran los costos del monitoreo y remediación de hábitats dañados y del tratamiento por toxicidad aguda (Pretty *et al.*, 2000; 2001). Para adaptar estos cálculos a la situación de otros países, los costos deben ser convertidos a dólares (*CM*, factor de conversión entre las dos monedas) y escalados al Producto Interno Bruto (PIB) del país como una proporción del PIB promedio de los países de referencia (*RPIB*), de acuerdo con la metodología propuesta por Leach y Mumford (2008).

Tabla 4.3. Clasificación de los coeficientes para cada categoría del EIQ y costo externo promedio (en euros kg⁻¹ de ingrediente activo) correspondiente a cada categoría (Tomado de Leach y Mumford, 2008).

Categorías del EIQ	<i>coefEIQ</i>			Costo externo promedio (<i>CMD</i>) (euros kg ⁻¹ de i.a.)
	Rango bajo (0.5)	Rango medio (1)	Rango alto (1.5)	
Efectos sobre el aplicador	5 ≤ EA < 25	25 ≤ EA < 85	85 ≤ EA ≤ 125	0.87
Efectos sobre quien cosecha	1 ≤ EC < 14	14 ≤ EC < 76	76 ≤ EC ≤ 125	0.62
Efectos sobre el consumidor	1 ≤ ECon < 14	14 ≤ ECon < 76	76 ≤ ECon ≤ 125	4.05
Contaminación de aguas subterráneas	1 ≤ ECAS < 2	2 ≤ ECAS < 4	4 ≤ ECAS ≤ 5	0.97
Efectos sobre organismos acuáticos	1 ≤ EOAc < 5	5 ≤ EOAc < 17	17 ≤ EOAc ≤ 25	1.12
Efectos sobre aves	3 ≤ EAv < 15	15 ≤ EAv < 51	51 ≤ EAv ≤ 75	0.42
Efectos sobre abejas	3 ≤ EAb < 15	15 ≤ EAb < 51	51 ≤ EAb ≤ 75	0.31
Efectos sobre insectos benéficos	5 ≤ EIB < 25	25 ≤ EIB < 85	85 ≤ EIB ≤ 125	0.42

Los números entre paréntesis indican los pesos que se aplican a cada rango

4.2.3. Desarrollo del modelo de planeamiento

A continuación se presenta detalladamente el modelo de planeamiento operativo desarrollado. El mismo fue construido a partir de los elementos descriptos previamente y estructurado como un problema de programación matemática multiperíodo. Para los propósitos de modelado, se adoptó un horizonte de planeamiento de un año con un paso diario, compatible con el ciclo agronómico típico y la frecuencia de toma de datos habitual en ensayos a campo. El modelo proporciona la estrategia óptima de control de malezas al seleccionar qué herbicida aplicar en cada período del horizonte de planeamiento. En las Tablas 4.4 y 4.5 se presenta una descripción completa de los índices, los parámetros y las variables del modelo.

Tabla 4.4. Índices y variables del modelo operativo.

Índices	
Símbolo	Nombre
t	Tiempo (días calendarios)
h {hs, hns}	Herbicidas (s: selectivo, ns: no selectivo)
Variables	
Símbolo	Nombre
D_t	Densidad de la maleza (plantas m^{-2})
TDE_t	Equivalente de tiempo y densidad diario (plantas m^{-2})
DF	Densidad de la maleza al final de la temporada (plantas m^{-2})
TDE_{tot}	TDE total (plantas m^{-2})
E_{tt}	Plántulas de maleza emergidas el día t que sobreviven y afectan el rinde del cultivo (plantas m^{-2})
$EM_{t,h}$	Plántulas de maleza emergidas el día t eliminadas por la aplicación del herbicida h (plantas m^{-2})
$bigh_{t,h}$	Total de aplicaciones del herbicida h realizadas durante un período de $(nsh2_h - nsh1_h)$ días
M_t	Mortalidad diaria de plántulas de maleza (plantas m^{-2})
$Mth_{t,h}$	Mortalidad diaria de plántulas de maleza debida al herbicida h (plantas m^{-2})
S	Producción total de semillas de maleza al final de la temporada (semillas m^{-2})
SR	Lluvia total de semillas (semillas m^{-2})
yL	Pérdida de rinde del cultivo (%)
y	Rinde del cultivo ($kg\ ha^{-1}$)
B	Beneficio económico ($\$ ha^{-1}$)
Inc	Ganancia bruta ($\$ ha^{-1}$)
$Cost$	Costo de compra de herbicidas ($\$ ha^{-1}$)
Ext	Costo ambiental de la aplicación de herbicidas ($\$ ha^{-1}$)
Cap	Cost de la aplicación de herbicidas ($\$ ha^{-1}$)
Rep	Penalización por semillas de maleza producidas ($\$ ha^{-1}$)
$yh_{t,h}$	Variable binaria; 1 si se aplica el herbicida h ; 0 en caso contrario

Tabla 4.5. Parámetros del modelo operativo.

Parámetros	
E_t	Emergencia diaria de la maleza (plantas m ⁻² día ⁻¹)
a	Parámetro de la ecuación 4.1
i	Parámetro de la ecuación 4.1
c	Parámetro de la ecuación 4.4
Tem_t	Día de emergencia de la maleza (días)
y_{wf}	Rinde del cultivo libre de malezas (kg ha ⁻¹)
pc	Precio del cultivo (US\$ kg ⁻¹)
ns	Período de susceptibilidad del cultivo a los herbicidas (días)
Tec	Período de tiempo entre la siembra del cultivo y su emergencia (días)
Dec	Día de emergencia del cultivo (días)
Des	Día de siembra del cultivo (días)
RT_t	Tiempo relativo de emergencia cultivo-maleza (días)
$bigM$	Constante big M
$nsh1_h$	Día del comienzo de la susceptibilidad de la maleza al herbicida h (días)
$nsh2_h$	Día de finalización de la susceptibilidad de la maleza al herbicida h (días)
PEA_h	Costo externo de una aplicación del herbicida h (US\$ ha ⁻¹)
$costh_h$	Costo de compra del herbicida h (US\$ ha ⁻¹)
f	Máximo número de semillas que puede producir una planta de maleza (semillas planta ⁻¹)
sup	Área necesaria para que una planta produzca f semillas (m ²)
ap	Costo de una aplicación terrestre de herbicida (US\$ ha ⁻¹)
l	Proporción de semillas perdidas (semillas m ⁻²)
p	Penalización de la producción de semillas (US\$ m ² ha ⁻¹ semilla ⁻¹)
tc	Día a partir del cual no se pueden realizar operaciones de control (días)

Estimación de la densidad de malezas

El modelo predice la evolución de la densidad de la maleza durante el período de planeamiento considerado. El número de plantas por metro cuadrado presentes en el sistema el día t es la suma de plantas en todos los estados de crecimiento. La densidad (D_t) se calcula como un balance de plantas entre el número de plántulas emergidas el día t (E_t) más la densidad de la maleza del día anterior (D_{t-1}) menos las plántulas eliminadas por operaciones de control realizadas durante el día t (M_t):

$$D_t = D_{t-1} + E_t - M_t \quad \forall t \quad (4.14)$$

Mortalidad de plántulas de la maleza

Las malezas pueden ser efectivamente controladas por herbicidas solamente si las plantas se encuentran en el estadio de crecimiento adecuado. Se supone que las plántulas son eliminadas solamente por acción de los herbicidas aplicados y que todos los individuos susceptibles presentes el día en que se realiza la aplicación son

efectivamente controlados. Debe remarcar que se considera que las aplicaciones de herbicidas controlan únicamente la totalidad de los individuos susceptibles, no el 100% de las plantas de maleza presentes el día de la aplicación.

Las plantas de la maleza son consideradas susceptibles al herbicida h cuando sus edades pertenecen al período de tiempo comprendido entre $nsh1_h$ y $nsh2_h$. Los parámetros $nsh1_h$ y $nsh2_h$ representan el día de comienzo y finalización del período de susceptibilidad, respectivamente; son específicos para cada herbicida y dependen del estadio de crecimiento en que se encuentra la maleza. De acuerdo a este enfoque, las plántulas más jóvenes que $nsh1_h$ y más viejas que $nsh2_h$ sobreviven a la aplicación del herbicida correspondiente. Por ejemplo, si $nsh1_h = 3$ y $nsh2_h = 5$, las plántulas que emerjan el día 2 serán susceptibles entre los días 5 ($2+3$) y 7 ($2+5$). De este modo una “eficiencia reducida” es representada por un período de susceptibilidad más corto, mientras que un período de susceptibilidad mayor implica una acción de control del herbicida de mayor extensión.

El modelo calcula el número de plántulas de la maleza que son eliminadas por cada tratamiento disponible el día t ($Mth_{t,h}$) como se muestra a continuación:

$$Mth_{t,h} \leq \sum_{t-nsh2(h) \leq t}^{t \leq t-nsh1(h)} EMt_{t,h} + bigM(1 - yhth_{t,h}) \quad \forall t, \forall h \quad (4.15)$$

$$Mth_{t,h} \geq \sum_{t-nsh2(h) \leq t}^{t \leq t-nsh1(h)} EMt_{t,h} - bigM(1 - yhth_{t,h}) \quad \forall t, \forall h \quad (4.16)$$

$$Mth_{t,h} \leq yhth_{t,h} bigM \quad \forall t, \forall h \quad (4.17)$$

$yhth_{t,h}$ es una variable binaria que es igual a 1 si el herbicida h se aplica en el día t ; caso contrario, toma valor cero. El parámetro $bigM$ es una constante grande que representa un límite superior para la variable $Mth_{t,h}$. Las ecuaciones 4.15 – 4.17 constituyen una formulación bigM, que determina que si el herbicida h se aplica en el día t (i.e. si $yhth_{t,h} = 1$), $Mth_{t,h}$ es igual al número de plántulas de la maleza que se encuentran en el estadio susceptible y son eliminadas del sistema. De otro modo $Mth_{t,h}$ es igual a cero, lo que significa que ninguna planta es controlada ese día por acción de ese herbicida. Debe remarcar que las sumatorias presentes en las ecuaciones 4.15

y 4.16 cubren el período de susceptibilidad de la maleza para cada herbicida específico, indicado por los parámetros $nsh1_h$ y $nsh2_h$ (Tabla 4.5).

En las ecuaciones 4.18 – 4.20, $EMt_{t,h}$, también definido por una formulación $bigM$, es igual a E_t si las plántulas de la maleza emergidas el día t son eliminadas por una aplicación del herbicida h durante su período de susceptibilidad y es cero si lo anterior no se cumple:

$$EMt_{t,h} \geq E_t - bigM(1 - bigh_{t,h}) \quad \forall t, \forall h \quad (4.18)$$

$$EMt_{t,h} \leq E_t + bigM(1 - bigh_{t,h}) \quad \forall t, \forall h \quad (4.19)$$

$$EMt_{t,h} \leq bigM bigh_{t,h} \quad \forall t, \forall h \quad (4.20)$$

$bigh_{t,h}$ es una variable positiva que integra el número de aplicaciones de herbicidas realizadas durante el período de susceptibilidad de las plántulas de maleza emergidas el día t :

$$bigh_{t,h} = \sum_{t+nsh1(h) \leq t_1 \leq t+nsh2(h)} y h t_{t_1,h} \quad \forall t, \forall h \quad (4.21)$$

El número total de individuos controlados durante el día t se calcula por integración del número de plantas controladas ese día por cada herbicida en particular:

$$M_t = \sum_h Mth_{t,h} \quad \forall t \quad (4.22)$$

La Figura 4.1 esquematiza el funcionamiento de las ecuaciones mencionadas anteriormente para un herbicida h aplicado en el instante $t = 7$ con parámetros $nsh1_h$ y $nsh2_h$ que toman valores de 3 y 5, respectivamente.

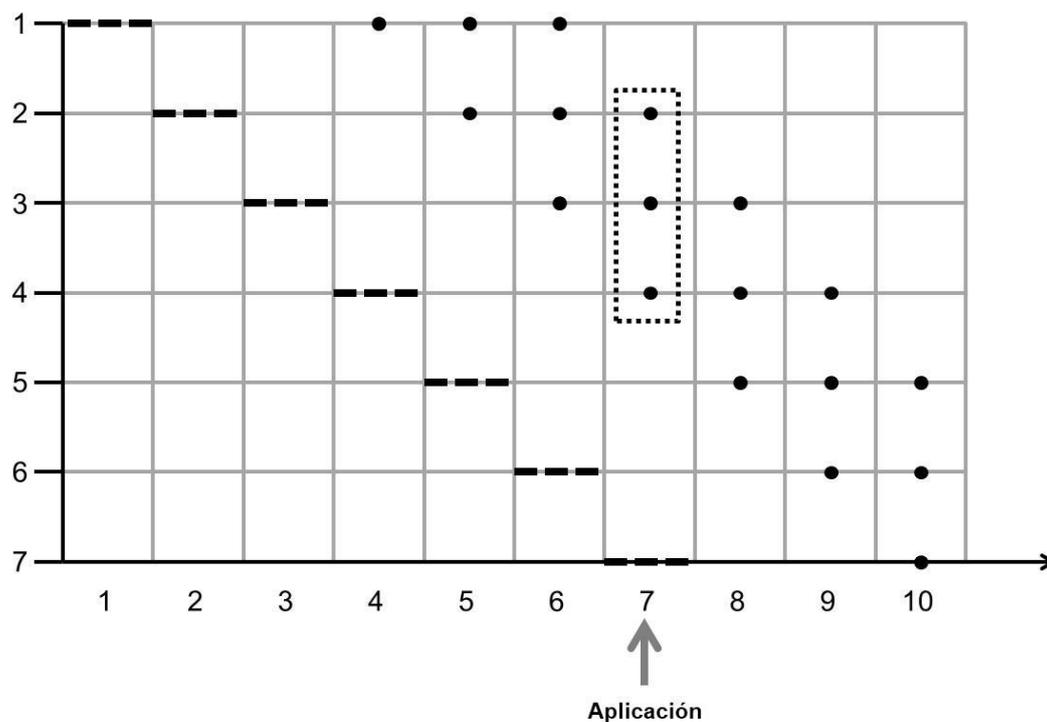


Figura 4.1. Esquema del funcionamiento del modelo sobre la línea de tiempo para ejemplificar la eliminación de plántulas de la maleza. Ambos ejes representan el tiempo (t , en días calendario). La línea punteada indica el momento de emergencia de las plántulas, mientras que los puntos negros hacen referencia a las plántulas que son susceptibles de ser eliminadas por aplicación de un herbicida ese mismo día. En el caso ejemplificado en la figura, las plántulas susceptibles de ser eliminadas por la aplicación del herbicida cuando $t=7$ se encuentran incluidas en el rectángulo punteado, correspondientes a las emergidas los días 2, 3 y 4. Las plántulas emergidas el día 1 no son susceptibles por ser muy grandes y las emergidas los días 5, 6 y 7 por ser muy jóvenes.

Estimación de la producción de semillas de maleza

Las plántulas de maleza que sobreviven y alcanzan el estadio reproductivo al final de la temporada producirán nuevas semillas, contribuyendo así a la preservación del banco de semillas del suelo y por lo tanto dando lugar a potenciales problemas de infestación durante los años siguientes (Cousens y Mortimer, 1995). En general, se observa que la producción de semillas en plantas de malezas depende de su densidad. A menor cantidad de plantas por metro cuadrado, la cantidad de semillas producidas por planta es mayor.

Las semillas de maleza producidas (S , semillas m^{-2}) al final de la temporada son estimadas en el modelo propuesto usando la siguiente ecuación:

$$S = \frac{f DF}{(1 + \text{sup } DF)} \quad (4.23)$$

donde DF es la densidad final que alcanza la maleza al final de la temporada, f es el número de semillas producido por una planta aislada y sup es el área que necesita una planta para producir f semillas (ver Capítulo 3).

Se considera que una proporción del total de semillas producido por la maleza se pierde por diversas causas (cosecha del cultivo, predación, etc). De este modo, para calcular la fracción de semillas que efectivamente contribuirá al banco de semillas (lluvia de semillas, SR), se utiliza la siguiente ecuación:

$$SR = (1 - I)S \quad (4.24)$$

donde I representa la proporción de semillas perdidas m^{-2} .

Estimación de la pérdida de rinde de cultivo y del rinde final

Como se mencionó anteriormente, el modelo adopta el concepto de TDE para calcular la pérdida de rinde del cultivo, con el objeto de considerar el impacto del momento de la emergencia de la maleza en la competencia. Para obtener el TDE diario (TDE_t) fue necesario considerar solamente aquellas plantas de maleza que continuarían presentes en el sistema hasta el momento de la cosecha del cultivo. Para las plántulas de maleza emergidas el día t , Ett_t se define como aquellos individuos que no son controlados por ninguna de las aplicaciones de herbicidas realizadas, y se calcula como se muestra a continuación:

$$Ett_t = E_t - \sum_h EMt_{t,h} \quad \forall t \quad (4.25)$$

Ett_t representa la densidad de maleza que se incorpora diariamente al sistema. Esta variable reemplaza a D en la ecuación 4.4 para calcular el TDE diario:

$$TDE_t = Ett_t e^{(-c RT_t)} \quad \forall t \quad (4.26)$$

donde RT_t es el tiempo relativo de emergencia de las plántulas de maleza emergidas el día t con respecto al cultivo. Para cada día del horizonte de planeamiento, RT_t se calcula como:

$$RT_t = Tem_t - Dec \quad \forall t \quad (4.27)$$

Tem_t es un parámetro que representa la fecha de emergencia de plántulas de maleza en el día t , y Dec es el día en que emerge el cultivo. Dec se calcula a partir de la fecha de siembra (Des) y del tiempo transcurrido entre la siembra y la emergencia del cultivo (Tec):

$$Dec = Des + Tec \quad (4.28)$$

En la Figura 4.2 se representa gráficamente el funcionamiento de las ecuaciones mencionadas anteriormente.

El TDE global (TDE_{tot}) representa el número total de plantas de maleza que estarán presentes en el sistema hasta la cosecha del cultivo y que serán responsables de la pérdida de rinde. Se calcula, entonces, como se muestra a continuación:

$$TDE_{tot} = \sum_t TDE_t \quad (4.29)$$

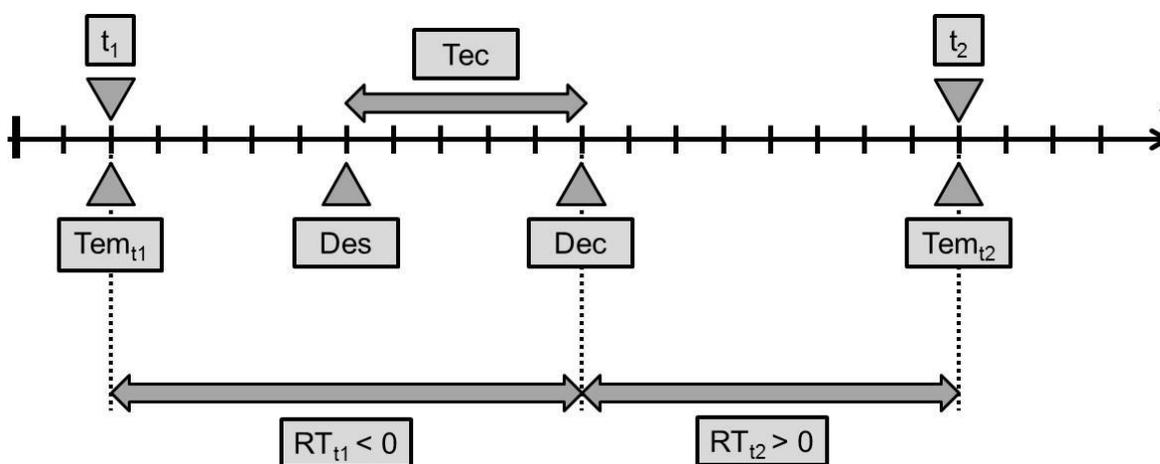


Figura 4.2. Representación gráfica de las ecuaciones 4.27 y 4.28. Des es el día en el que se siembra el cultivo, mientras que t_1 y t_2 representan días anterior y posterior a la misma, respectivamente. Tem_{t_1} y Tem_{t_2} marcan las fechas de emergencia de malezas, y Dec es el día en el que emerge el cultivo. Se puede observar que Tec es el período que transcurre entre Des y Dec . Debido a que Tem_{t_1} antecede a Des , RT_{t_1} tendrá un valor negativo, haciendo que el TED_{t_1} sea alto, mientras que como Tem_{t_2} es posterior a Des , RT_{t_2} tendrá un valor positivo y TED_{t_2} será menor.

Este TDE global reemplaza a la densidad de la maleza (D) en la ecuación 4.1 para estimar el impacto que estas plantas tienen sobre el rinde del cultivo. y_L se obtiene como un porcentaje del rinde potencial que podría obtenerse del cultivo:

$$y_L = \frac{i \text{ TDE}_{tot}}{1 + \frac{i \text{ TDE}_{tot}}{a}} \quad (4.30)$$

Finalmente, es necesario calcular el rinde final del cultivo usando la ecuación 4.2 para estimar las ganancias obtenidas al final de la temporada:

$$y = y_{wf} \left(1 - \frac{y_L}{100} \right) \quad (4.31)$$

Función objetivo

El problema de la planificación de la aplicación de herbicidas se formula como un modelo de optimización cuyo objetivo es maximizar el beneficio económico considerando un término de ingresos (Inc), proveniente de la venta del cultivo, un término de costo de compra de herbicidas ($Cost$) y otro de aplicación (Cap) de los mismos, ambos relacionados con las operaciones de control. Como se mencionó anteriormente, el impacto ambiental relacionado con los productos aplicados se trata en este estudio como un costo externo (Ext) que también se incluye en la función objetivo económica:

$$B = Inc - Cost - Cap - Ext \quad (4.32)$$

El ingreso bruto luego de la cosecha depende tanto del rinde final del cultivo (y) como de su precio de venta (pc):

$$Inc = pc \cdot y \quad (4.33)$$

El costo total de compra de los herbicidas aplicados se calcula a partir del costo de cada aplicación ($yhth_{t,h}$) como:

$$Cost = \sum_h costh_h \left(\sum_t yhth_{t,h} \right) \quad (4.34)$$

donde $costh_h$ es el costo de compra del herbicida h .

De manera similar, el costo de aplicación de los herbicidas se calcula a partir del costo de cada aplicación individual:

$$Cap = ap \sum_t \sum_h yhth_{t,h} \quad (4.35)$$

donde ap es el costo de realizar una aplicación del agroquímico.

Finalmente, el costo ambiental (Ext) asociado con el uso de los distintos herbicidas se calcula en función de los costos externos de cada aplicación (PEA_h) obtenidos de acuerdo a la metodología descrita en la sección 4.2.2:

$$Ext = \sum_t \left(\sum_h yhth_{t,h} PEA_h \right) \quad (4.36)$$

Como se mencionó anteriormente, el modelo presentado fue concebido como un módulo operativo, es decir, para ser empleado en el diseño de la secuencia de controles a lo largo de una temporada agronómica (año calendario). Sin embargo esta herramienta debe ser idealmente utilizada como parte de un sistema de planeamiento táctico/estratégico que tenga en cuenta un horizonte de largo plazo, basado en el monitoreo de la población de semillas a lo largo de varios años y considerando también otras opciones de manejo de las malezas durante el proceso de toma de decisiones.

Dado que dicho sistema de planeamiento de largo plazo está fuera del alcance de este estudio, para tener en cuenta en este trabajo el hecho de que las plántulas de maleza no controladas producirán semillas que eventualmente tendrán impacto en las siguientes temporadas, se incluyó un término adicional en la función objetivo para penalizar esta producción de semillas indeseada. Este término de penalización (rep) considera el impacto económico que las semillas de maleza producidas durante la presente temporada podrían tener durante los años siguientes, y fue modelado como:

$$rep = p \cdot SR \quad (4.37)$$

donde SR es la lluvia de semillas (calculada usando la ecuación 4.24) y p representa un costo de penalización. Detalles del cálculo de p se proporcionan en el capítulo siguiente (sección 5.3.3).

Herbidas

Los herbicidas no selectivos se emplean para controlar malezas antes de la emergencia del cultivo, y de esta forma eliminar tempranamente a individuos con una gran ventaja competitiva. Por otra parte, los herbicidas selectivos se utilizan para controlar las malezas una vez establecido el cultivo, en una ventana de tiempo en la cual el mismo no es susceptible a estos productos. Se incluyeron restricciones adicionales para evitar que se realicen aplicaciones de los distintos tipos de herbicidas fuera de dichas ventanas de aplicación. La restricción 4.38 evita la aplicación de herbicidas no selectivos luego de la siembra del cultivo:

$$yh_{t,h} = 0 \quad \forall t \geq Des, \forall h_{ns} \quad (4.38)$$

La restricción 4.39 evita que se apliquen herbicidas selectivos antes de la siembra y durante el período de susceptibilidad del cultivo a estos productos, luego de la emergencia del mismo (ns representa los días de susceptibilidad del cultivo a partir de la fecha de emergencia Dec):

$$yh_{t,h} = 0 \quad \forall t \leq Dec + ns, \forall h_s \quad (4.39)$$

La ecuación 4.40 evita la aplicación de un herbicida selectivo más de una vez durante la temporada en curso. Esta es una restricción “heurística” para simular una práctica recomendable a nivel agronómico, dado que en términos generales la aplicación reiterada de un mismo herbicida en una temporada no sólo no elimina las especies tolerantes al producto sino que también aumenta el riesgo de aparición de resistencia en las especies susceptibles; además, la aplicación de diferentes ingredientes activos permite aumentar la efectividad del tratamiento y ampliar el espectro de control de malezas.

$$\sum_t y_h t_{t,h} \leq 1 \quad \forall h_s \quad (4.40)$$

Finalmente, la restricción 4.41 evita la aplicación de herbicidas selectivos más allá del día (tc) en el que el cultivo alcanzó un estadio de crecimiento que no permita realizar tareas de control:

$$\sum_h y_h t_{t,h} = 0 \quad \forall t \geq tc \quad (4.41)$$

4.3. Discusión

Cabe aclarar que si bien el enfoque propuesto contempla los principales aspectos del manejo de malezas dentro de la temporada agronómica, es posible ampliar la capacidad de representación del modelo en varias facetas. A continuación se enumeran algunas de las simplificaciones adoptadas en el presente modelo, las cuales podrían modelarse más detalladamente para incrementar las prestaciones de la herramienta propuesta.

En la presente versión sólo se incluyeron opciones de control químico. Existen métodos de control alternativos que deberían tenerse en cuenta desde un punto de vista estratégico, como los métodos preventivos, culturales y mecánicos que fueron mencionados en el Capítulo 1. La importancia del planeamiento del manejo integrado de malezas ha sido ampliamente reconocida para considerar los efectos a largo plazo de las rotaciones de cultivos u otros métodos de control cultural sobre los niveles de infestación de las malezas y la aparición de biotipos resistentes a herbicidas (Pannell *et al.*, 2004; Parsons *et al.*, 2009). En este sentido el modelo propuesto puede considerarse como un módulo anual de control químico dentro de un sistema de planeamiento estratégico.

Por otra parte, el impacto ambiental se modeló como una externalidad que permitió su inclusión directa en la función objetivo económica adoptada. Si se analizaran indicadores alternativos de impacto ambiental, no formulados en términos económicos (como los propuestos en Kovach *et al.* (1992) y en Alister y Kogan (2006), por ejemplo), se debería adoptar un enfoque multi-objetivo para estudiar el equilibrio entre la maximización del beneficio económico y la minimización del impacto ambiental.

Otro aspecto a destacar es que en el presente trabajo, el perfil anual de emergencia de la maleza se considera un parámetro conocido (E_i). En la práctica resulta difícil predecir la emergencia a campo en competencia con el cultivo, ya que depende no sólo de las características bioecológicas de la especie maleza, sino también de las condiciones ambientales en las que ésta crece y se desarrolla (Forcella *et al.*, 2000). Aquellos modelos de emergencia que demuestren realizar predicciones confiables del perfil de emergencia (como los propuestos en Chantre *et al.*, 2012 y en Blanco *et al.*, 2014) pueden usarse en reemplazo del mencionado parámetro en combinación con información meteorológica.

En lo que respecta a la mortalidad de plántulas de la especie maleza, en este estudio se consideró que la misma se debe exclusivamente a la acción de los herbicidas aplicados. Sin embargo, la realidad indica que la mortalidad también puede deberse a múltiples factores ajenos a las prácticas de control, tales como la competencia inter o intraespecífica, las condiciones climáticas adversas y las enfermedades que puedan afectar a las plántulas (Fernández-Quintanilla *et al.*, 1986; Fenner, 1987; Pandey y Medd, 1991; Cousens y Mortimer, 1995; Fernández-Quintanilla *et al.*, 2000; Chauvel *et al.*, 2001; Colbach *et al.*, 2007; Gallart *et al.*, 2010). Estos efectos se potencian a mayores densidades tanto de maleza como de siembra del cultivo. Por lo tanto, los valores de mortalidad obtenidos a partir de este modelo subestiman en general las observaciones que se pueden realizar a campo.

En el enfoque presentado en este capítulo se considera, además, que toda plántula que por su edad sea susceptible a la aplicación de un determinado herbicida en un momento dado, será efectivamente eliminada. Sin embargo, algunas de estas plántulas pueden sobrevivir, ya sea porque quedaron protegidas de la aspersión por otras plantas de la misma especie o del cultivo, porque por azar la aspersión no las alcanzó, porque las condiciones climáticas anteriores y/o posteriores a la aplicación afectaron la eficacia del producto químico o por la existencia de resistencia al principio activo utilizado (Cousens y Mortimer, 1995; Colbach *et al.*, 2007).

Finalmente, otro supuesto realizado en este modelo es que toda planta que escapa al control produce semillas con normalidad. No obstante, se sabe que aunque el herbicida no elimine a la planta, ésta puede ver comprometida su capacidad reproductiva, ya que las aplicaciones de herbicidas pueden reducir la producción de

semillas (Buhler *et al.*, 1997; Ghera *et al.*, 2000; González-Andújar y Fernández-Quintanilla, 2004). Por este motivo, el cálculo de producción de semillas por parte de la maleza puede estar sobreestimando la producción real a campo.

CAPÍTULO 5

PLANEAMIENTO OPERATIVO PARA EL MANEJO DE MALEZAS BASADO EN EL USO DE HERBICIDAS.

APLICACIÓN AL SISTEMA TRIGO - *Lolium perenne*

El modelo descrito en el capítulo anterior fue evaluado en el sistema trigo (*Triticum aestivum*) – raigrás (*Lolium perenne*), típico de la región semiárida de Argentina. En todos los escenarios de emergencia estudiados los resultados indican que se requeriría al menos una aplicación de herbicidas no selectivos en presembrado para controlar efectivamente las plántulas que emergen tempranamente. También se sugirieron aplicaciones adicionales en presembrado y postemergencia en los casos en los que la presión competitiva fue significativa.

5.1. Introducción

Como se mencionó anteriormente, el raigrás (*Lolium perenne*) es una maleza que se encuentra típicamente presente en cultivos de trigo en la región semiárida argentina (Istilar y Yannicari, 2011). Esta especie es muy competitiva, aún en bajas densidades, provocando importantes pérdidas de rinde al cultivo. Para controlar la infestación, los productores de la región se han volcado principalmente al uso de herbicidas. En el barbecho es común la aplicación de herbicidas no selectivos, como el glifosato, mientras que en postemergencia del cultivo se utilizan graminicidas selectivos de trigo (López *et al.*, 2008; Vigna *et al.*, 2008). La decisión de aplicar o no estos productos y la determinación del momento óptimo de su aplicación son de gran importancia, ya que, como se ha explicado en el Capítulo 3, el período de tiempo en que son efectivos está relacionado con el estadio fenológico de la maleza.

En este capítulo se evaluó el modelo operativo descrito en el Capítulo 4 usando como caso de estudio el sistema trigo (*Triticum aestivum*) – raigrás (*L. perenne*), típico de la región semiárida argentina. Se considera que el cultivo se realiza en un sistema de siembra directa. El objetivo es maximizar el beneficio económico de la actividad agronómica, mediante la selección de los herbicidas adecuados y sus correspondientes momentos de aplicación a lo largo de la temporada de crecimiento y considerando de manera explícita el impacto ambiental provocado por las operaciones de control químico por medio del método PEA.

5.2. Materiales y métodos

Para testear el modelo propuesto se plantean estudios de escenarios y estudios de sensibilidad. Los primeros corresponden a ejecuciones del modelo con parámetros fijados en valores típicos, que pretenden ser representativos de las condiciones del sistema cultivo-maleza-manejo, de manera de cuantificar las principales variables de interés en el proceso de toma de decisiones. Por su parte, los estudios de sensibilidad apuntan a evaluar el impacto de la variación de los parámetros sobre los resultados del modelo, con el objeto de detectar los que más influyen sobre la solución.

5.2.1. Análisis de escenarios

Los patrones de emergencia de *Lolium perenne* en la región semiárida argentina son difíciles de predecir, principalmente debido a la gran variabilidad de las condiciones ambientales (precipitaciones y temperatura) en la zona, lo cual ha estimulado el desarrollo de adaptaciones ecológicas específicas de la especie en relación con la dinámica de la dormición del banco de semillas con el objeto de optimizar sus posibilidades de supervivencia (ver Capítulo 2).

Luego de analizar datos de emergencia a campo de *L. perenne* de 6 años (2007 – 2012) recolectados en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Bordenave en Bordenave, Argentina (37° 50' S; 63° 01' W), se seleccionaron tres patrones diferentes para probar el modelo propuesto. Estos patrones fueron elegidos de acuerdo con el tiempo que se tardó en alcanzar el 50% de la emergencia total de plántulas. Los escenarios seleccionados corresponden a los años 2007 (Caso 1), 2010 (Caso 2) y 2011 (Caso 3), donde el 50% de emergencia se alcanzó luego de 52, 173 y 80 días calendario, respectivamente (Figura 5.1). Estos patrones son considerados representativos del comportamiento de emergencia a campo observado en la zona y por lo tanto se los empleó para estudiar el desempeño del modelo de planeamiento operativo para la especie. El registro de precipitaciones de los años seleccionados se puede observar en la Tabla 5.1.

Para realizar los estudios, en todos los casos se adoptó arbitrariamente un banco de semillas no dormidas de 500 semillas m⁻² para el análisis de escenario de los casos base. Este número se considera representativo para caracterizar una posible situación a campo aunque debe aclararse que se trata de un parámetro grandemente

dependiente del campo y su determinación precisa requiere de ensayos de difícil realización (Vigna, comentario personal).

Tabla 5.1. Precipitaciones registradas (en mm) en la EEA INTA Bordenave (Bordenave, Argentina) durante los años seleccionados como caso de estudio.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
2007	43	155,5	114,5	84,3	9,7	0	3,2	5,5	137	112,5	45	35,5	745,7
2010	40,7	119,4	57,4	2,8	10,7	19,2	15,2	1,8	100,4	51,4	57	7,8	483,8
2011	185,2	33,3	74	79	22,5	18,8	14	28	0,8	97,8	195,5	14	762,9

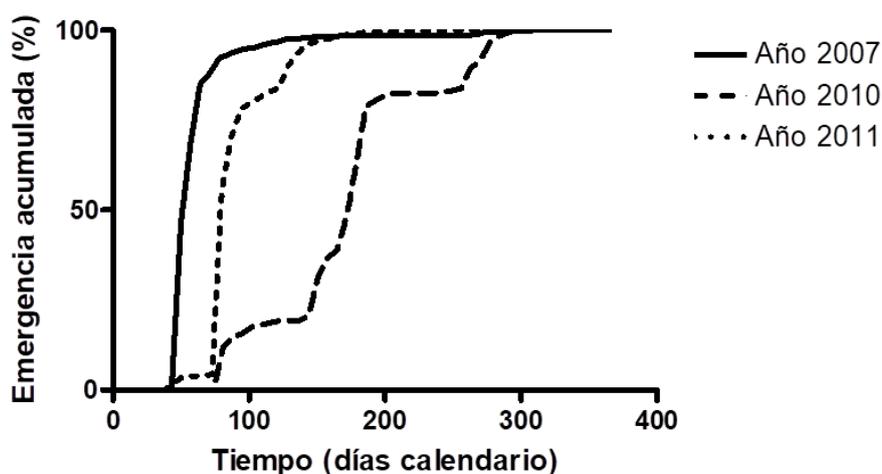


Figura 5.1. Patrones de emergencia de *Lolium perenne* en la EEA INTA Bordenave (Bordenave, Argentina) representativos de la región semiárida. El eje X representa un año completo, desde el día 1 (1º de enero) hasta el día 365 (31 de diciembre).

Los parámetros para el sistema *T. aestivum* – *L. perenne* se describen en la Tabla 5.2. Aquellos relacionados con la competencia (ecuaciones 4.1 y 4.4) se recabaron de literatura específica (Cousens *et al.*, 1987; Cousens y Mokhtari, 1998), mientras que los correspondientes a la producción de semillas se obtuvieron a partir de los resultados presentados en el Capítulo 3 de esta tesis. Los datos agronómicos específicos de la zona (patrones de emergencia, rinde del cultivo libre de malezas, fecha de siembra y de emergencia del cultivo) se obtuvieron a partir de registros históricos del INTA y del conocimiento de expertos (Tabla 5.2).

La información económica se recolectó de fuentes públicas y la utilizada para el cálculo del cociente de impacto ambiental (EIQ) fue tomada de diversas bases de datos (CASAFE, 2007; EXTTOXNET; IPM center; US EPA Pesticide Fact Sheets).

El período de susceptibilidad de *L. perenne* a los herbicidas se estimó a partir de datos fenológicos de la especie tomados semanalmente en condiciones de campo, siguiendo la metodología explicada en el Capítulo 3. A partir del tiempo térmico así calculado, usando temperaturas diarias promedio, se estimó el tiempo (en días) necesario para alcanzar cada estadio, y consecuentemente los límites del período de susceptibilidad. Para los graminicidas, $nsh1_h$ corresponde al día en que las plantas alcanzan el estadio de dos hojas, mientras que para herbicidas no selectivos se refiere al día de emergencia de la cohorte; $nsh2_h$ es el día en que las plantas alcanzan el estadio de cuatro hojas o el inicio del macollaje, dependiendo del espectro de acción del herbicida h .

Tabla 5.2. Parámetros del modelo operativo para el sistema trigo - raigrás

Símbolo	Nombre	Valor del parámetro	Fuente
E_t	Emergencia diaria de la maleza (plantas m ² día ⁻¹)	Sección 5.2.1	EEA INTA Bordenave
a	Parámetro de la ecuación 4.1	92,75	Cousens y Mokhtari (1998)
i	Parámetro de la ecuación 4.1	0,885	Cousens y Mokhtari (1998)
c	Parámetro de la ecuación 4.4	0,119	Cousens <i>et al.</i> (1987)
Tem_t	Día de emergencia de la maleza (días)	Capítulo 4	EEA INTA Bordenave
y_{wt}	Rinde del cultivo libre de malezas (kg ha ⁻¹)	2000	Conocimiento específico
pc	Precio del cultivo (U\$S kg ⁻¹)	0,18	Conocimiento específico
ns	Período de susceptibilidad del cultivo a los herbicidas (días)	26	Conocimiento específico
Tec	Período de tiempo entre la siembra del cultivo y su emergencia (días)	17	Conocimiento específico
Dec	Día de emergencia del cultivo (días)	Capítulo 4	Conocimiento específico
Des	Día de siembra del cultivo (días)	152	Conocimiento específico
RT_t	Tiempo relativo de emergencia cultivo-maleza (días)	Capítulo 4	Conocimiento específico
$bigM$	Constante big M	50000	Conocimiento específico
$nsh1_h$	Día del comienzo de la susceptibilidad de la maleza al herbicida h (días)	Tabla 5.3	Conocimiento específico
$nsh2_h$	Día de finalización de la susceptibilidad de la maleza al herbicida h (días)	Tabla 5.3	Conocimiento específico
PEA_h	Costo externo de una aplicación del herbicida h (U\$S ha ⁻¹)	Tabla 5.3	Leach y Mumford (2008)
$costh_h$	Costo de compra del herbicida h (U\$S ha ⁻¹)	Tabla 5.3	Conocimiento específico
fe	Parámetro de la ecuación 5.1	0,48	Capítulo 3
$supe$	Parámetro de la ecuación 5.1	0,0014	Capítulo 3
EP	Promedio de espigas planta ⁻¹ de maleza	6	Datos propios
ap	Costo de una aplicación terrestre de herbicida (U\$S ha ⁻¹)	2,02	Mario Vigna y Ramón Gigón (comentario personal)
l	Proporción de semillas perdidas (semillas m ⁻²)	0,19	González-Andújar y Fernández-Quintanilla (2004)
p	Penalización de la producción de semillas (U\$S m ² ha ⁻¹ semilla ⁻¹)	0,06	Sección 5.3.3
tc	Día a partir del cual no se pueden realizar operaciones de control (días)	250	Conocimiento específico

Tabla 5.3. Parámetros relacionados con los herbicidas. $nsh1_h$ y $nsh2_h$ indican el día en que comienza y termina la susceptibilidad de la maleza al herbicida h , respectivamente; PEA_h es el costo externo de una aplicación del herbicida h .

Principio activo	Tipo	Costo de compra (US\$ ha ⁻¹)	$nsh1_h$ (días)	$nsh2_h$ (días)	PEA_h (US\$ ha ⁻¹)
Pinoxaden	Selectivo	49,3	9	55	0,04
Clodinafop	Selectivo	60,9	9	55	0,07
Pyroxsulam	Selectivo	224,9	9	55	0,05
Diclofop metil	Selectivo	40,7	9	65	0,44
Glifosato	No selectivo	11,3	1	53	0,47
Paraquat	No selectivo	19,1	1	53	0,51

Debido a que, de acuerdo con lo observado en el Capítulo 3, resulta mejor describir la producción de semillas de *L. perenne* en función de la densidad de espigas (espigas m⁻²) en lugar de hacerlo en función de la densidad de plantas (plantas m⁻²), se introdujeron modificaciones en su estimación respecto del modelo general descrito en el Capítulo 4. La ecuación utilizada para describir la producción de semillas fue la siguiente:

$$rootS = \frac{fe Es}{1 + supe Es} \quad (5.1)$$

donde $rootS$ es la raíz cuadrada de las semillas producidas por metro cuadrado, Es es el número de espigas m⁻² y fe y $supe$ son parámetros de la hipérbola. Para retransformar los datos y obtener la producción de semillas m⁻² se utilizó la siguiente ecuación:

$$S = rootS^2 \quad (5.2)$$

Para poder usar la ecuación 5.1, es necesario calcular el número de espigas por metro cuadrado a partir de la densidad final de la maleza:

$$Es = DF EP \quad (5.3)$$

donde DF es la densidad final de la maleza, y EP es el número promedio de espigas por planta de *L. perenne*.

En este caso de estudio se consideraron seis herbicidas con diferentes ingredientes activos, comúnmente utilizados para el control de *L. perenne* en la región. En la Tabla 5.3 se describen dos herbicidas no selectivos que se aplican en presiembra y cuatro herbicidas selectivos que se aplican en postemergencia. Cada herbicida tiene costos ambientales y de compra diferentes, y su propio espectro de acción sobre la maleza. Se considera que todos fueron aplicados utilizando la dosis de campo recomendada. Los detalles del cálculo del PEA para cada herbicida en particular se describen en las Tablas 5.4 y 5.5.

El modelo descrito fue programado en la plataforma de modelamiento y optimización GAMS y el modelo no lineal mixto entero resultante se resolvió con el solver Dicopt (GAMS 2008a, b).

Una instancia típica del modelo posee 2190 variables binarias, 10234 variables continuas (positivas) y 19364 restricciones (de igualdad y desigualdad) y demanda unos pocos minutos de ejecución en una computadora estándar.

Tabla 5.4. Cálculo del EIQ

Ingrediente activo	Pinoxaden	Clodinafop	Pyroxsulam	Diclofop metil	Glifosato	Paraquat	Cloquintocet mexyl	Metsulfurón metil ^d
EIQ^e por categoría								
Efectos sobre el aplicador	5	15	5	15	5	15	5	5
Efectos sobre quien cosecha	3	9	3	9	3	9	3	3
Efectos sobre el consumidor	2	6	2	6	3	4	2	4
Contaminación de aguas subterráneas	3	1	1	1	1	1	1	3
Efectos sobre organismos acuáticos	3	25	3	9	3	1	1	3
Efectos sobre aves	6	6	6	6	9	12	6	12
Efectos sobre abejas	9	9	9	9	9	9	9	9
Efectos sobre insectos benéficos	15	15	15	45	15	45	15	15
EIQ ^e	15,33	28,67	14,67	33,33	16	32	14	18
Dosis (kg de i.a. ha ⁻¹)	0,03	0,06	0,018	0,426	0,54	0,552	0,0075 ^b – 0,005 ^c – 0,0036 ^d	0,004
EIQ ^e field use rating	0,46	1,72	0,26	14,2	8,64	17,66	0,11 ^b – 0,07 ^c – 0,50 ^d	0,07

^a Dosis expresada en kg de equivalente ácido

^b Presente en la formulación de pinoxaden

^c Presente en la formulación de clodinafop

^d Presente en la formulación de pyroxsulam

^e Environmental Impact Quotient

Tabla 5.5. Costos externos estimados de los seis herbicidas incluidos en el modelo.

Ingrediente activo	Pinoxaden + Cloquintocet mexyl	Clodinafop + Cloquintocet mexyl	Pyroxsulam + Cloquintocet mexyl + Metsulfurón metil	Diclofop metil	Glifosato	Paraquat
Costo por hectárea (U\$S)						
Efectos sobre el aplicador	0,003	0,006	0,005	0,037	0,047	0,048
Efectos sobre quien cosecha	0,002	0,004	0,004	0,026	0,034	0,034
Efectos sobre el consumidor	0,015	0,026	0,024	0,173	0,219	0,224
Contaminación de aguas subterráneas	0,007	0,006	0,006	0,041	0,052	0,054
Efectos sobre organismos acuáticos	0,004	0,021	0,007	0,096	0,061	0,062
Efectos sobre aves	0,002	0,003	0,002	0,018	0,023	0,023
Efectos sobre abejas	0,001	0,002	0,002	0,013	0,017	0,017
Efectos sobre organismos benéficos	0,002	0,003	0,002	0,036	0,023	0,046
Total (U\$S)	0,036	0,071	0,052	0,440	0,476	0,508

5.2.2. Análisis de sensibilidad

Como se comentó anteriormente, para efectuar los análisis de escenarios se supuso que los parámetros del modelo toman valores constantes (Tablas 5.2 y 5.3 y perfiles de emergencia a campo). Sin embargo, se sabe que la mayoría de estos parámetros presenta un nivel significativo de incertidumbre. El propósito del análisis de sensibilidad es determinar cuán robusta es la solución del caso base en un entorno de valores típicos de los parámetros.

Cabe aclarar que dado el gran número de parámetros que posee el modelo, un estudio exhaustivo de sensibilidad de todos (o varios de) ellos está fuera del alcance de este estudio. Sin embargo, para ilustrar el procedimiento se seleccionaron los parámetros que se entiende podrían generar el mayor efecto sobre la solución, en particular sobre las acciones de control (número y tipo de aplicaciones de herbicidas).

Específicamente, empleando como caso base el perfil de emergencia del caso 3 (Figura 5.1, año 2011) se estudió el impacto del tamaño del banco de semillas, el cual fue variado en $\pm 10\%$, 20% y 25% , y de los períodos de susceptibilidad de la maleza a los herbicidas, los cuales se modificaron en $\pm 10\%$, -20% y -30% respecto del caso base. El modelo fue ejecutado cada vez, reportándose las variables más importantes con fines comparativos.

5.3. Resultados

5.3.1. Análisis de escenarios

Los resultados de la optimización indican que en el Caso 1 (Figura 5.2), donde el 50% de la emergencia del raigrás fue alcanzado muy tempranamente (día 52), el máximo beneficio se obtuvo luego de sólo dos tratamientos con glifosato (días 93 y 147) antes de la siembra (día 152). Estas aplicaciones controlaron casi la totalidad de las plántulas emergidas durante el horizonte de planeamiento considerado. Aunque luego de la última aplicación la densidad de la maleza aumentó, el número de plantas que afectaron el rinde del cultivo no fue grande. La densidad final de la maleza fue de 10 plantas m^{-2} y coincide con el número de plantas que tuvieron un impacto significativo sobre el rinde final del cultivo (Tabla 5.6).

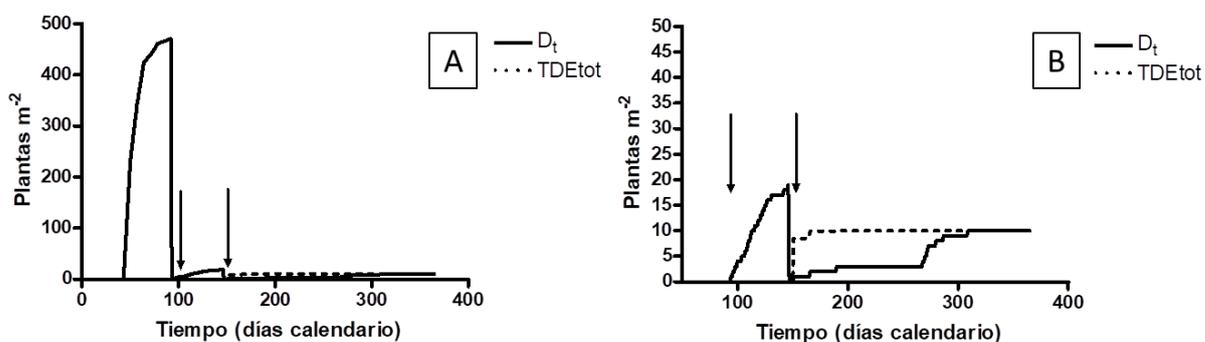


Figura 5.2. Caso 1: (A) evolución de la densidad total de la maleza (D_t , plantas m^{-2}) (línea sólida) y de la densidad de la maleza que afecta el rinde del cultivo (TDE_{tot} , plantas m^{-2}) (línea punteada). (B) Detalle de la evolución de D_t y de TDE_{tot} luego de la primera aplicación de herbicida. Las flechas indican los momentos de aplicación de glifosato (días 93 y 147).

En el Caso 2 (Figura 5.3), el modelo propuso una aplicación de glifosato en preemergencia del cultivo (día 125) y una de diclofop metil en postemergencia (día 203). La única aplicación de glifosato en preemergencia fue suficiente para controlar las plantas emergidas durante dicho período, ya que la emergencia comenzó más tarde en el año con respecto al caso anterior, y el 50% de emergencia acumulada se alcanzó recién el día 173. Las plántulas emergidas luego de la siembra del cultivo (día 152) y que tendrían el potencial de causar un gran impacto sobre el rinde del mismo fueron controladas con la aplicación de diclofop metil. Luego de dicha aplicación se produjeron nuevas emergencias, pero debido a que ocurrieron mucho después de la siembra, su impacto sobre el rinde del cultivo no fue significativo. Como se observa en la Tabla 5.6, prácticamente ninguno de los 97 individuos m^{-2} que llegaron hasta el final

del horizonte de planeamiento considerado tuvieron un impacto significativo sobre el rinde del cultivo.

Finalmente, en el Caso 3 (Figura 5.4), donde el 50% de la emergencia se alcanzó mucho antes de la siembra (día 80), se requirieron dos aplicaciones de glifosato en preemergencia (días 88 y 141) y una de diclofop metil en postemergencia (día 206). En este caso, las operaciones de control realizadas sirvieron para eliminar casi la totalidad de las plantas emergidas durante el horizonte de planeamiento considerado, por lo que el impacto de dichas plantas sobre el rinde final del cultivo fue prácticamente nulo (Tabla 5.6).

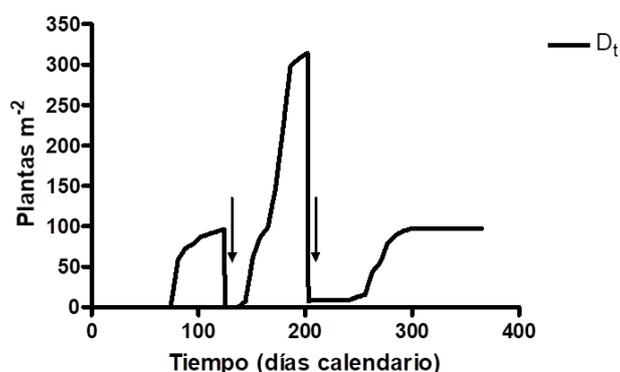


Figura 5.3. Caso 2: evolución de la densidad total de la maleza (D_t , plantas m^{-2}) (línea sólida). Las flechas indican los momentos de aplicación de herbicidas (días 125 para la aplicación de glifosato y día 203 para la aplicación de diclofop metil)

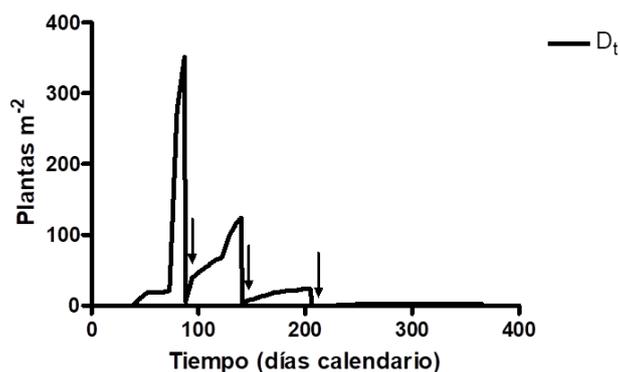


Figura 5.4. Caso 3: evolución de la densidad total de la maleza (D_t , plantas m^{-2}) (línea sólida). Las flechas indican los momentos de aplicación de herbicidas (días 88 y 141 para las aplicaciones de glifosato y día 206 para la aplicación de diclofop metil).

Del análisis de los escenarios estudiados se evidencia que las cohortes de raigrás emergidas tempranamente, las cuales tienen un gran impacto sobre el rinde del cultivo, requieren al menos una aplicación de herbicidas en preemergencia en

todos los casos. Si la emergencia es demasiado temprana (Caso 1), sólo se requieren tratamientos en preemergencia debido a que todas las malezas potencialmente competitivas son eliminadas en esta etapa. Si la emergencia se retrasa (Casos 2 y 3), se requieren, además, tratamientos en postemergencia. En el caso de que la emergencia se retrase considerablemente (Caso 2), luego del control realizado en postemergencia continúa la emergencia de plántulas. Debido a que dichas plántulas emergen luego del establecimiento del cultivo, no tienen un efecto significativo sobre el rinde del cereal, por lo que no se requieren aplicaciones adicionales.

El hecho de que en dos de los tres casos (Casos 1 y 2) el banco de semillas no sufriera una reducción de su tamaño indica que durante el año siguiente se necesitarán estrategias de manejo más intensas para controlar la emergencia potencial. En la sección 5.5.3 se presenta un estudio donde se tienen en cuenta el aporte de semillas al banco por plantas de raigrás no controladas.

Tabla 5.6. Resumen de resultados

	Caso 1 (2007)	Caso 2 (2010)	Caso 3 (2011)
Densidad final de la maleza (plantas m ⁻²)	10	97	2
<i>TDE_{tot}</i> (plantas m ⁻²)	10,03	0,26	0,0008
Producción de semillas de la maleza (semillas m ⁻²)	706	23696	32
Lluvia de semillas (semillas m ⁻²)	572	19194	26
Pérdida de rinde del cultivo (%)	8,1	0,23	0,0007
Rinde del cultivo (kg ha ⁻¹)	1838,01	1995,5	1999,99
Ingresos brutos (U\$S ha ⁻¹)	330,84	359,19	360
Costo de compra de herbicidas (U\$S ha ⁻¹)	22,6	52	63,3
Costo de aplicación de herbicidas (U\$S ha ⁻¹)	4,04	4,04	6,06
Externalidades (U\$S ha ⁻¹)	0,95	0,92	1,39
Beneficio (U\$S ha ⁻¹)	303,25	302,24	289,25
Tipo de herbicida seleccionado:		Glifosato: 125;	Glifosato: 88/141;
Días de aplicación	Glifosato: 93/147	Diclofop metil: 203	Diclofop metil: 206

En ausencia de operaciones de control, los patrones de emergencia analizados habrían dado lugar a grandes infestaciones. Lo mismo ocurre cuando se limita el número de aplicaciones. Con fines comparativos, en la Tabla 5.7 se presentan los resultados para los tres escenarios de emergencia en los que se ha restringido a uno el número total de aplicaciones posibles durante la temporada (permitiendo que el modelo decida el tipo de herbicida a aplicar y el día de aplicación). Como se puede observar en la Tabla 5.7, en todos los casos se realiza una aplicación de glifosato en presembrado (antes del día 152). Sin embargo, esta aplicación no es suficiente para controlar eficientemente la maleza, por lo que el número de plantas de raigrás que

compiten con el cultivo es alto, provocando pérdidas de rinde mayores al 80%. Además puede verse a través del elevado valor del TDE total cómo el efecto de las plantas que permanecen en el sistema es mucho mayor que el de la densidad final de la maleza.

Tabla 5.7. Resumen de resultados restringiendo las aplicaciones a una sola durante toda la temporada.

	Caso 1 (2007)	Caso 2 (2010)	Caso 3 (2011)
Densidad final de la maleza (plantas m ⁻²)	27	404	127
<i>TDE_{tot}</i> (plantas m ⁻²)	18238,16	1152,21	216330
Producción de semillas de la maleza (semillas m ⁻²)	4018	70130	31318
Lluvia de semillas (semillas m ⁻²)	3254	56806	25368
Pérdida de rinde del cultivo (%)	92,22	85,02	92,71
Rinde del cultivo (kg ha ⁻¹)	155,6	299,66	145,9
Ingresos brutos (U\$S ha ⁻¹)	28	53,94	26,26
Costo de compra de herbicidas (U\$S ha ⁻¹)	11,3	11,3	11,3
Costo de aplicación de herbicidas (U\$S ha ⁻¹)	2,02	2,02	2,02
Externalidades (U\$S ha ⁻¹)	0,48	0,48	0,48
Beneficio (U\$S ha ⁻¹)	14,21	40,14	12,47
Tipo de herbicida seleccionado:	Glifosato: 97	Glifosato: 125	Glifosato: 92
Días de aplicación			

5.3.2. Análisis de sensibilidad

En la Tabla 5.8 se presenta la sensibilidad de las variables más relevantes respecto del tamaño del banco de semillas empleando como caso base el patrón de emergencia del año 2011 (Caso 3). Para todos los casos puede observarse que la estrategia de aplicación no cambia significativamente, dado que se realizan las dos aplicaciones de glifosato en pre-emergencia y la aplicación de diclofop metil en post-emergencia en todos los casos, con pequeños ajustes en los momentos en que dichas aplicaciones se realizan. Tampoco se observan modificaciones en el rinde del cultivo ni en el beneficio obtenido.

Con respecto a la producción de semillas, debido a que el número de plantas sobrevivientes no se modificó al variar el tamaño del banco, la lluvia de semillas se mantuvo constante en todos los casos respecto del caso base.

Tabla 5.8. Análisis de sensibilidad del tamaño del banco de semillas

Variable	Porcentaje de cambio						
	-25%	-20%	-10%	Caso Base	+10%	+20%	+25%
Banco de semillas (semillas m ⁻²)	375	400	450	500	550	600	625
Densidad final de la maleza (plantas m ⁻²)	2	2	2	2	2	2	2
Producción de semillas de la maleza (semillas m ⁻²)	32	32	32	32	32	32	32
Lluvia de semillas (semillas m ⁻²)	26	26	26	26	26	26	26
<i>TDEtot</i> (plantas m ⁻²)	0,001	0,001	0,0009	0,0008	0,0008	0,0007	0,0007
Pérdida de rinde del cultivo (%)	0,0009	0,0009	0,0008	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006
Rinde del cultivo (kg ha ⁻¹)	1999,99	1999,9	1999,99	1999,99	1999,99	1999,99	1999,99
Ingresos brutos (U\$S ha ⁻¹)	360	360	360	360	360	360	360
Costo de compra de herbicidas (U\$S ha ⁻¹)	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3
Costo de aplicación de herbicidas (U\$S ha ⁻¹)	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06
Externalidades (U\$S ha ⁻¹)	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39
Beneficio (U\$S ha ⁻¹)	289,25	289,25	289,25	289,25	289,25	289,25	289,25
Tipo de herbicida seleccionado:	Glifosato	Glifosato	Glifosato	Glifosato:	Glifosato	Glifosato	Glifosato
Día de aplicación	88/141;	92/145;	91/144;	88/141;	91/144;	91/144;	91/144;
	Diclofop metil 206	Diclofop metil 211	Diclofop metil 209	Diclofop metil 206	Diclofop metil 210	Diclofop metil 209	Diclofop metil 210

En la Tabla 5.9 se presenta la sensibilidad de la solución con respecto al período de susceptibilidad de la maleza a los herbicidas. Estas variaciones podrían simular, por ejemplo, condiciones ambientales que alarguen o reduzcan dichos períodos de control. La modificación del período de susceptibilidad se aplicó simultáneamente sobre todos los herbicidas disponibles. Un aumento en el período de susceptibilidad implica que $nsh1_h$ es menor y $nsh2_h$ es mayor, mientras que la disminución se modela aumentando el primero y reduciendo el segundo.

En el caso de un aumento del 10% de la longitud del período de susceptibilidad, la estrategia de control sugerida se mantiene igual a la del caso base (dos aplicaciones de glifosato en preemergencia y una aplicación de diclofop metil en postemergencia) con algunos cambios en los momentos de aplicación. En el resto de las variables no se observan modificaciones.

Al reducirse la eficacia del herbicida (casos -10%, -20% y -30%), la estrategia de control óptima incluye una aplicación más de glifosato en preemergencia que en el caso base, para compensar la pérdida de eficiencia del herbicida con el consecuente incremento del costo ambiental. Las dos aplicaciones que se realizan en el caso base fueron retrasadas al acortarse el período de susceptibilidad para controlar mejor las malezas emergidas. Se produce una pérdida de rinde levemente mayor que no afecta considerablemente los ingresos brutos y, al realizarse una aplicación más de herbicida durante la temporada, el beneficio final se ve disminuido.

Con respecto a la producción de semillas, un período de susceptibilidad mayor que el del caso base no provoca cambios en la densidad final de la maleza, por lo que la lluvia de semillas no sufrió modificaciones. Por otra parte, la reducción de un 20 y un 30% de la longitud de dicho período, provoca un aumento en la densidad final de la maleza en el campo (de 2 a 4 y 5 plantas m⁻², respectivamente), aún realizándose una aplicación adicional en preemergencia. Por este motivo, la lluvia de semillas se incrementa en un 288% y en un 496%, respectivamente.

Tabla 5.9. Análisis de sensibilidad del período de susceptibilidad de la maleza

Variable	Porcentaje de cambio				
	-30%	-20%	-10%	Caso base	+10%
Densidad final de la maleza (plantas m ⁻²)	5	4	2	2	2
<i>TDEtot</i> (plantas m ⁻²)	0,31	0,09	0,0008	0,0008	0,0008
Producción de semillas de la maleza (semillas m ⁻²)	191	124	32	32	32
Lluvia de semillas (semillas m ⁻²)	155	101	26	26	26
Pérdida de rinde del cultivo (%)	0,27	0,08	0,0007	0,0007	0,0007
Rinde del cultivo (kg ha ⁻¹)	1994,58	1998,34	1999,99	1999,99	1999,99
Ingresos brutos (U\$S ha ⁻¹)	359	359,7	360	360	360
Costo de compra de herbicidas (U\$S ha ⁻¹)	74,6	74,6	74,6	63,3	63,3
Costo de aplicación de herbicidas (U\$S ha ⁻¹)	8,08	8,08	8,08	6,06	6,06
Externalidades (U\$S ha ⁻¹)	1,86	1,86	1,86	1,39	1,39
Beneficio (U\$S ha ⁻¹)	274,48	275,16	275,45	289,25	289,25
Tipo de herbicida seleccionado:	Glifosato	Glifosato	Glifosato	Glifosato 88/141;	Glifosato 78/136;
Día de aplicación	75/114/151;	59/104/147;	56/103/150;	Diclofop metil	Diclofop metil
	196	201	209	206	204

5.3.3. Análisis de escenarios penalizando la producción de semillas de maleza

La supervivencia de plantas de raigrás que no tendrían un impacto significativo sobre el rinde del cultivo puede tener consecuencias importantes a largo plazo debido a que estas plantas producirán semillas que se incorporarán al banco de semillas del suelo, conduciendo a potenciales problemas de infestación en las siguientes temporadas. De hecho, los resultados de las secciones previas sugieren que, en dos de los tres casos analizados, las plantas de maleza que quedaron en el sistema produjeron una considerable cantidad de semillas. Dichas semillas deben ser consideradas en un sistema de asistencia en la toma de decisiones tácticas/estratégicas que monitoree la dinámica de la población a lo largo de varias temporadas y considere todas las opciones de control disponibles (mecánicas, culturales, etc.), además del uso de herbicidas.

Si bien un sistema de las características arriba mencionadas excede los alcances de esta tesis, en esta sección se proporciona un estudio adicional para investigar los potenciales efectos de la reproducción de las plantas sobrevivientes. El estudio propuesto se basa en la penalización de la lluvia de semillas de acuerdo a la ecuación 4.37 del Capítulo 4. Este término se emplea para cuantificar los costos potenciales de infestaciones futuras a través del parámetro p .

El parámetro p se definió como la pendiente de la combinación lineal entre los costos de control (es decir, la suma de los costos de compra, aplicación y externalidades medioambientales) correspondientes a dos tamaños contrastantes de bancos de semillas iniciales (17 y 500 semillas m^{-2}). Específicamente:

$$p = \frac{C_{500} - C_{17}}{SB_{500} - SB_{17}} \quad (5.4)$$

donde C_{500} y C_{17} son los costos totales de control cuando el banco tiene 500 y 17 semillas m^{-2} , respectivamente, y SB_{500} y SB_{17} son los tamaños de los bancos de semillas (500 y 17 semillas m^{-2} , respectivamente).

De acuerdo a esta definición, el parámetro p se calculó para cada uno de los tres patrones de emergencia, y los valores obtenidos fueron luego promediados para ser usados en la ecuación 4.37. Los detalles de los cálculos realizados se muestran en la Tabla 5.10. Los valores de 500 y 17 semillas m^{-2} fueron seleccionados luego de varios experimentos con el modelo, ya que se observó que éstos condujeron a soluciones sensiblemente diferentes.

Tabla 5.10. Costos de control utilizados para calcular el parámetro p . SB_{500} y SB_{17} son bancos de semillas con 500 y 17 semillas m^{-2} , respectivamente.

	Caso 1 (2007)		Caso 2 (2010)		Caso 3 (2011)	
	SB_{500}	SB_{17}	SB_{500}	SB_{17}	SB_{500}	SB_{17}
Costo de compra de herbicidas (U\$S ha^{-1})	22,6	11,3	52	22,6	63,3	22,6
Costo de aplicación de herbicidas (U\$S ha^{-1})	4,04	2,02	4,04	4,04	6,06	4,04
Externalidades (U\$S ha^{-1})	0,95	0,48	0,92	0,95	1,39	0,95
Costos totales (U\$S ha^{-1})	27,59	13,8	56,96	27,59	70,75	27,59
p (U\$S $m^2 ha^{-1} semilla^{-1}$)	0,03		0,06		0,09	

Los tres escenarios estudiados en la sección 5.3.1 también fueron analizados incluyendo el término de penalización de la semilla de maleza producida. Los resultados se resumen en la Tabla 5.11 y en las Figuras 5.5 – 5.7.

Tabla 5.11. Resumen de resultados (con penalización de la producción de semillas de maleza)

	Caso 1 (2007)	Caso 2 (2010)	Caso 3 (2011)
Densidad final de la maleza (plantas m ⁻²)	7	88	2
<i>TDE_{tot}</i> (plantas m ⁻²)	0,00002	0,001	0,0008
Producción de semillas de la maleza (semillas m ⁻²)	363	21235	32
Lluvia de semillas (semillas m ⁻²)	294	17200	26
Pérdida de rinde del cultivo (%)	0,00002	0,001	0,0007
Rinde del cultivo (kg ha ⁻¹)	2000	1999,98	1999,99
Ingresos brutos (U\$S ha ⁻¹)	360	359,99	359,99
Costo de compra de herbicidas (U\$S ha ⁻¹)	63,3	63,3	63,3
Costo de aplicación (U\$S ha ⁻¹)	6,06	6,06	6,06
Externalidades (U\$S ha ⁻¹)	1,39	1,39	1,39
Penalización de la producción de semillas (U\$S ha ⁻¹)	17,64	1032	1,56
Beneficio (U\$S ha ⁻¹)	271,63	-742,77	287,69
Tipo de herbicida seleccionado:	Glifosato 97/150; Diclofop	Glifosato 97/150; Diclofop	Glifosato 92/145; Diclofop
Día de aplicación	metil 212	metil 215	metil 209

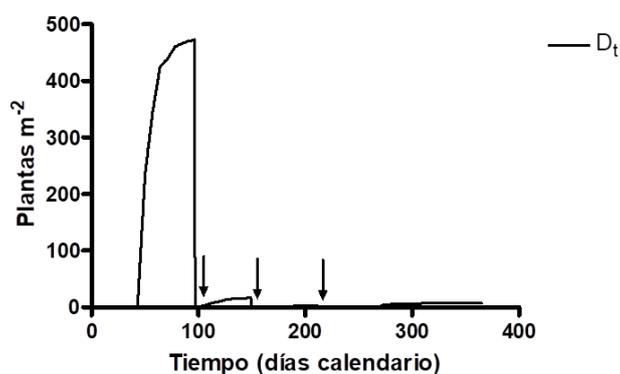


Figura 5.5. Caso 1: evolución de la densidad total de la maleza (D_t , plantas m⁻²) considerando en la función objetivo la penalización por cada semilla de maleza producida. Las flechas indican los momentos de aplicación de los herbicidas (días 97 y 150 para la aplicación de glifosato y día 212 para la aplicación de diclofop metil).

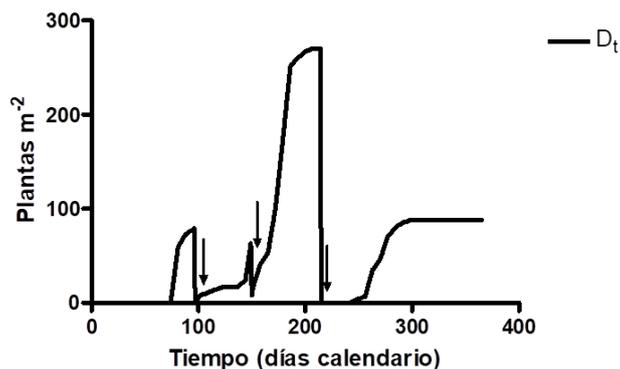


Figura 5.6. Caso 2: evolución de la densidad total de la maleza (D_t , plantas m^{-2}) considerando en la función objetivo la penalización por cada semilla de maleza producida. Las flechas indican los momentos de aplicación de los herbicidas (días 97 y 150 para la aplicación de glifosato y día 215 para la aplicación de diclofop metil).

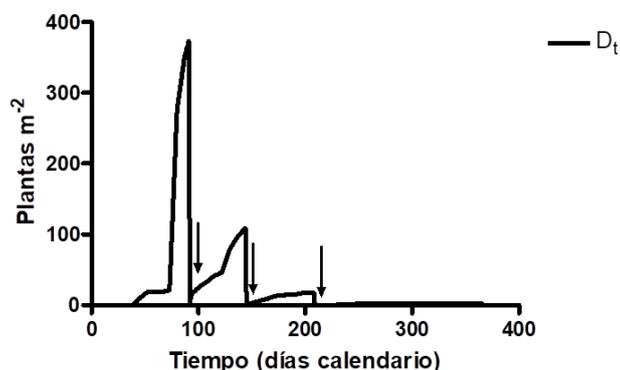


Figura 5.7. Caso 3: evolución de la densidad total de la maleza (D_t , plantas m^{-2}) considerando en la función objetivo la penalización por cada semilla de maleza producida. Las flechas indican los momentos de aplicación de los herbicidas (días 92 y 145 para la aplicación de glifosato y día 209 para la aplicación de diclofop metil).

En el Caso 3 (Figura 5.7), la estrategia de control seleccionada es igual a la del caso en el que no se aplicó la penalización, y sólo se observan algunos cambios en los días de aplicación (Tabla 5.11). El beneficio fue un 0,54% menor que en el caso sin penalizar debido al costo extra asignado a la producción de semillas.

Por otra parte, en los Casos 1 y 2 se observaron variaciones significativas respecto de los casos sin penalizar. En el Caso 1 (Figura 5.5), donde para el problema sin penalización se realizaban solamente dos aplicaciones de glifosato en pre-emergencia, cuando se incluye el término asociado a la producción de semillas, se recomienda una aplicación adicional de diclofop metil en post-emergencia (Tabla 5.11). Con esta nueva estrategia, la producción de semilla de maleza se redujo un 48,6% en comparación con el caso que no incluye la penalización. Los costos de control y las externalidades medioambientales aumentaron, lo que causó una reducción del beneficio del 10,43%, aunque éste aún resulta positivo.

En el Caso 2 (Figura 5.6) también se realiza una aplicación adicional respecto del estudio sin penalización, pero en esta oportunidad se trata de una aplicación adicional de glifosato en pre-emergencia (Tabla 5.11). A pesar de que la nueva estrategia reduce la producción de semillas en un 10,4%, ésta continúa siendo alta, debido a que la densidad de la maleza se mantiene elevada. La supervivencia de estas plantas se debe a que la aplicación que se necesitaría para controlarlas efectivamente debería realizarse luego del momento en que ya no se puede ingresar al cultivo con la maquinaria de aplicación (indicado en este modelo por el parámetro $t_c = 250$). Por este motivo, el término de penalización resulta mayor que el ingreso y el beneficio es negativo.

En la práctica, la realización de una aplicación de herbicida en post-emergencia es una estrategia razonable para reducir la pérdida de rinde del cultivo durante la presente temporada y/o reducir el impacto de la producción de semillas de maleza en la siguiente. Es necesario resaltar que este modelo fue diseñado para operar dentro del marco de un programa de manejo integrado de malezas que sugiera estrategias a mediano/largo plazo considerando no sólo el control químico, sino también métodos preventivos, mecánicos, biológicos y culturales. En un análisis de dicho alcance, podrían recomendarse otras estrategias de manejo, como por ejemplo la rotación de cultivos o el control mecánico, en lugar de las aplicaciones adicionales de herbicidas realizadas en los Casos 1 y 2.

5.4. Discusión

El modelo propuesto en el capítulo anterior se utilizó en este capítulo para automatizar el cálculo de los momentos óptimos de aplicación de herbicidas dentro de una temporada en el sistema trigo-raigrás. La solución depende de muchos datos, en particular del patrón de emergencia de la maleza, el cual a su vez es función de las condiciones microclimáticas del suelo y del nivel de dormición del banco de semillas (Forcella *et al.*, 2000). El patrón de emergencia fue considerado en este estudio como un dato disponible (información histórica) con el objetivo de condensar tanto el componente biológico como el climático, ambos involucrados en la emergencia de la maleza. De encontrarse disponibles, pueden usarse en su lugar submodelos que relacionen la emergencia de la maleza con los datos climáticos y de esta forma utilizar pronósticos del tiempo para estimar la emergencia a campo. Muchos de estos submodelos han sido desarrollados en los últimos años para diferentes sistemas (Forcella *et al.*, 2000; Chantre *et al.*, 2012; 2014; Blanco *et al.*, 2014). Por ejemplo, el

modelo de Blanco *et al.* (2014) utiliza pronósticos del tiempo para predecir la emergencia acumulada de *Avena fatua*.

Considerando que el raigrás es un competidor fuerte y puede reducir el rinde del cultivo hasta cerca de un 100%, los tratamientos de control propuestos por el modelo fueron capaces de reducir las pérdidas de rinde del cultivo a menos del 10% en todos los casos.

La realización de más de una aplicación de glifosato durante la misma temporada puede ser considerada como una práctica no recomendable debido a que representa una gran presión de selección sobre las poblaciones de la maleza, lo que podría conducir a un incremento en la tasa de resistencia al herbicida. El uso de otros productos no selectivos (por ejemplo, paraquat) nunca fue recomendado por el modelo debido a su alto costo relativo con respecto al glifosato. A pesar de no ser adecuado desde el punto de vista del manejo de malezas, se debe mencionar que en la región bajo estudio la repetición de las aplicaciones de glifosato durante el barbecho es una práctica comúnmente realizada, con el objetivo de controlar muchas especies problemáticas, tanto gramíneas como malezas de hoja ancha.

La sugerencia del modelo sobre la conveniencia de aplicar o no un graminicida es de gran importancia práctica. Esta decisión es una de las más difíciles de tomar debido a que cada aplicación de estos herbicidas tiene un alto costo económico, y es de interés práctico para el productor o el asesor agropecuario saber si vale la pena realizarla.

Analizando las soluciones de la Tabla 5.6 a más largo plazo, puede concluirse que si bien las plantas sobrevivientes no tuvieron un impacto significativo sobre el rinde del cultivo del corriente año, su producción de semillas puede afectar las actividades del año siguiente (ver fila "Lluvia de semillas"). En el Caso 1, la lluvia de semillas (572 semillas m^{-2}) contribuye a mantener el tamaño del banco del suelo respecto del que tenía al inicio de la temporada, el cual tenía un tamaño de 500 semillas m^{-2} . En el Caso 2, debido a que la densidad de plantas sobrevivientes fue alta, hay una gran producción de semillas que contribuyó a aumentar el tamaño del banco 38 veces con respecto al del corriente año. En cambio, en el Caso 3, la producción de semillas es baja debido a que el número de plantas sobrevivientes es bajo.

Luego de analizar el estudio de sensibilidad se puede concluir que las soluciones son bastante robustas, en el sentido que básicamente se sugiere el mismo tratamiento (dos aplicaciones en pre-siembra y una en post-emergencia) en la mayoría de los casos. La mayor variabilidad se observa en los momentos de aplicación de los herbicidas. A través de cambios adecuados en los momentos de aplicación, el modelo es capaz de compensar situaciones desfavorables (por ejemplo, el aumento del número de semillas en el banco) o de explotar condiciones favorables (por ejemplo, el aumento en la longitud de los períodos de susceptibilidad de la maleza) sin cambiar la combinación general de herbicidas. Estos resultados contrastan con lo hallado por Lodovichi *et al.* (2013) para *Avena fatua*, donde los cambios en los valores de los parámetros produjeron modificaciones en el número de aplicaciones realizadas, la fecha de aplicación (retraso de la fecha de aplicación respecto del caso base), cambios en la producción de semillas y en la cantidad de plantas que afectan efectivamente el rinde del cultivo.

El análisis de sensibilidad llevado a cabo sobre los parámetros más influyentes reveló comportamientos interesantes, sugiriendo que la incertidumbre debería ser tratada explícitamente en las aplicaciones reales. Una solución práctica sería correr el modelo dentro de un marco de control predictivo de modo de identificar la solución óptima en el corto plazo con la información climática disponible y recalcularla a medida que dicha información se va actualizando, considerando las acciones de control ya implementadas (Ogunnaike y Ray, 1994). Esta estrategia, emparentada con las técnicas de “horizonte móvil” permitiría ir adaptando el manejo a medida que se dispone de información climática certera. Por supuesto, para lograr este objetivo es indispensable contar con buenos modelos de predicción de emergencia a campo basados en datos meteorológicos.

Otro de los aspectos a destacar fue el cálculo de la pérdida de rinde del cultivo en relación a la densidad de la maleza. Debido a que las plántulas de maleza que emergen más temprano tienen mayor importancia en la competencia, aquí fueron pesadas de acuerdo al momento de emergencia. Por lo tanto, aunque la densidad final de la maleza esté sobreestimada debido a que los patrones de emergencia ingresados al modelo consideran que las plántulas siguen emergiendo luego del cierre de la canopia del cultivo, se entiende que el efecto de estas plántulas tardías sobre la competencia no tiene un efecto significativo sobre el rinde del cereal. Sin embargo, para realizar un cálculo más realista, debería considerarse tanto la edad como el

tiempo de permanencia de la maleza en el sistema para la estimación de la pérdida de rinde.

Por otra parte, el aporte de nuevas semillas al banco por parte de plantas no controladas al final de la temporada también fue tratado de manera específica en este capítulo. Si la reproducción de las plantas sobrevivientes no se tiene en cuenta durante el análisis realizado dentro de la temporada, es posible que la estrategia óptima de control no elimine plantas de maleza que eventualmente producirán semillas, contribuyendo a la preservación del banco y de este modo a problemas de infestación en las temporadas subsiguientes. Con el objetivo de considerar esta situación, se penalizó la producción de semillas como un costo adicional en la función objetivo de planeamiento. La inclusión de un término de penalización debido a la producción de semillas permitió considerar gastos futuros provocados por dichas semillas. De este modo, el modelo sugirió aplicaciones adicionales (preventivas) de herbicidas, lo cual no fue económicamente óptimo desde el punto de vista de la presente temporada pero que tendrían sentido a mediano plazo. Sin embargo, cabe destacar que las decisiones a largo plazo deben tomarse desde un enfoque más estratégico. Un programa basado solamente en el uso de herbicidas conduciría no sólo a un gran impacto ambiental sino también a un mayor riesgo de aparición de poblaciones resistentes a herbicidas. Por lo tanto, opciones de manejo complementarias como la rotación de cultivos (con cultivos de verano, pasturas, etc) o un año sin usar el lote contribuirían a controlar las infestaciones de raigrás de un modo más sustentable (Pannell *et al.*, 2004). Dichas opciones de control deberían ser analizadas a un nivel estratégico de toma de decisiones.

Finalmente, la metodología del PEA fue seleccionada entre los distintos métodos de evaluación del impacto ambiental porque permite incluir directamente el componente ambiental como una externalidad en la función objetivo para considerar el impacto de la aplicación de herbicidas.

En todos los casos, los valores del costo ambiental fueron mucho menores que los correspondientes a los de compra y aplicación de los agroquímicos y, por lo tanto, no impactaron considerablemente sobre la elección de las estrategias de control. El impacto práctico de estas externalidades en el diseño de estrategias de control deberá ser validado con estudios adicionales en el contexto de una planificación de más largo plazo. Sin embargo, la inclusión de un componente ambiental en términos económicos resulta ser un enfoque práctico para poder cuantificar el efecto de los diferentes

productos disponibles y para explicitar la preocupación por el impacto medioambiental durante el proceso de toma de decisiones.

El poco peso de la externalidad ambiental puede atribuirse en parte a que los costos ambientales fueron calculados solamente para el principio activo y no para la formulación comercial de cada herbicida; en el caso de las formulaciones comerciales, el principio activo está acompañado por coadyuvantes que pueden tener un impacto ambiental igual o mayor al primero. Además, un mismo principio activo puede verse acompañado por diferentes coadyuvantes en diferentes formulaciones (ya sea por diferencias entre marcas comerciales o entre tipo de formulaciones). Por este motivo, el agregado de dichos coadyuvantes al cálculo del índice de impacto ambiental aportaría una mirada más global del impacto que tiene cada producto sobre el agroecosistema.

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN GENERAL

En la presente tesis se estudiaron aspectos de la biología y la ecología de *Lolium perenne* como maleza de cultivos de trigo en la región semiárida del sudoeste de la provincia de Buenos Aires, y se desarrollaron modelos matemáticos con el objetivo de diseñar herramientas que permitan predecir el comportamiento a campo de la maleza y controlarla de la manera más eficiente, de modo de maximizar el rinde del cultivo y, por ende, las ganancias netas del productor, y al mismo tiempo considerar el impacto ambiental de las prácticas de control sobre el agroecosistema en cuestión.

En los Capítulos 2 y 3 se estudiaron la salida de la dormición, la germinación, la producción de semillas y el desarrollo fenológico de *L. perenne*, y se construyeron modelos que intentan predecir la evolución de dichos aspectos demográficos en función de variables extrínsecas (temperatura, humedad edáfica) e intrínsecas (densidad poblacional, competencia con el cultivo). En el Capítulo 4 se desarrolló un modelo matemático de optimización general, adaptable a diferentes combinaciones de especies maleza y cultivos. Este modelo tiene la capacidad de seleccionar el tipo de herbicida que conviene aplicar y cuándo realizar dicha operación, en función de un monitoreo diario del estado del agroecosistema a lo largo de una temporada agronómica. Finalmente, en el Capítulo 5 el modelo desarrollado en el Capítulo 4 se adaptó al sistema trigo – raigrás, utilizando como base parte de la información recabada en el Capítulo 3.

En el desarrollo del Capítulo 2 se pusieron a prueba las dos primeras hipótesis específicas planteadas en la sección 1.7 del Capítulo 1. Por un lado, a partir del trabajo llevado a cabo se puede afirmar que la salida de la dormición y la germinación de las semillas de *L. perenne* L. dependen de la temperatura de postmaduración, del grado de contenido hídrico de las semillas y del tiempo de postmaduración, tal como se explica en las secciones 2.3 y 2.4 del Capítulo 2. Por otra parte, si bien se planteó la hipótesis de que la germinación y emergencia a campo de esta especie pueden predecirse utilizando modelos de tiempo térmico, no fue posible la elaboración de modelos cuantitativos de tiempo térmico que permitan predecir la capacidad germinativa de las semillas y los flujos de emergencia de las plántulas a campo, y por lo tanto, comprobar la veracidad de dicha hipótesis. Esto se debió a que el alto

porcentaje de error encontrado a la hora de predecir los parámetros térmicos de la población de semillas, y la gran sensibilidad de los mismos, impidieron obtener las predicciones esperadas. Por estos motivos, si bien no se pudo comprobar que la hipótesis fuera verdadera, para poder rechazarla deberían realizarse nuevos experimentos para obtener series de datos con porcentajes de error mucho más reducidos. Lograr la comprobación de este hipótesis sería de gran importancia, ya que este tipo de enfoques es importante como punto de partida para el desarrollo de un modelo mecanístico de emergencia de la especie, que contenga información de la salida de la dormición, la germinación y el crecimiento de la plántula en preemergencia, procesos sucesivos que dan lugar a la emergencia a campo (Forcella *et al.*, 2000).

Cabe aclarar que la mayor parte de los modelos de emergencia a campo de malezas existentes en la literatura son de tipo empírico, en los que se relaciona el tiempo térmico acumulado con la emergencia, sin tener en cuenta ninguno de los procesos mencionados anteriormente (Grundy y Mead, 2000; Leblanc *et al.*, 2003; Myers *et al.*, 2004; Leguizamón *et al.*, 2005; Martinson *et al.*, 2007). Al no dividir el proceso en los subprocesos que los componen, no se consideran los factores biológicos y físicos del ambiente que interactúan con las semillas y plántulas, y, por ende, estos modelos no pueden ser extrapolados y/o usados en condiciones y sistemas de producción diferentes a donde fueron creados (Colbach y Debaeke, 1998).

Por otra parte, en el Capítulo 3 se pudieron probar la tercera y la cuarta hipótesis planteadas en la sección 1.7. En el trabajo detallado en dicho capítulo se pudo observar que la producción de semillas de *L. perenne* depende tanto de la densidad de la maleza como de la del cultivo, y se elaboraron modelos no lineales que permiten describir esta relación. Además, se cuantificó el tiempo térmico necesario para que se produzcan los cambios de estadio fenológico en esta especie y se pudo observar que dicha acumulación es independiente de las condiciones de riego y fertilización a las que se vieran sometidas las plantas de la maleza.

Es importante destacar que la información recabada en el Capítulo 3 fue de gran utilidad para la adaptación del modelo de planeamiento óptimo al sistema trigo – raigrás (Capítulo 5), ya que para su implementación se utilizaron datos de producción de semillas y duración de estadios fenológicos obtenidos. Como conclusión sobre la determinación de los períodos de susceptibilidad, es importante resaltar que el tiempo

térmico requerido por las plantas de raigrás para pasar del estado de 4 hojas al inicio del macollaje es prácticamente no significativo. En los meses en los que se producen temperaturas bajas, la acumulación de tiempo térmico será más lenta y permitirá observar la diferencia entre las dos etapas, pero a medida que las temperaturas suben, las plantas emergidas tardíamente pasarán rápidamente del estado de 3-4 hojas al de macollaje, reduciendo así el tiempo disponible para realizar operaciones de control con ciertos herbicidas. Esto es de gran importancia, ya que muchos de los herbicidas que permiten controlar a *L. perenne* pueden hacerlo mientras no se haya iniciado el macollaje. El poco tiempo térmico requerido para iniciar el macollaje luego de alcanzar el estadio de 4 hojas nos indica que es necesaria una precisa determinación del momento de aplicación del producto para lograr los efectos deseados, por lo que un retraso en las operaciones de control puede provocar que éstas sean menos eficaces.

Finalmente, la última hipótesis planteada en la sección 1.7 se puso a prueba en los Capítulos 4 y 5. El modelo desarrollado en el Capítulo 4 y aplicado al sistema trigo - raigrás en el Capítulo 5 mostraron que podría convertirse en una herramienta de gran utilidad para productores y asesores agropecuarios, tal como ha ocurrido con aquellos desarrollados por Pannell *et al.* (2004) para *L. rigidum* y por Parsons *et al.* (2009) para varias especies de malezas. Previamente, sería necesario que los resultados obtenidos fueran validados con datos de campo independientes; se deberían implementar las estrategias de control sugeridas, para luego realizar la comparación de los resultados al final de la temporada, ya que, como se mencionó en la sección 1.4, la validación es un paso fundamental en la construcción de modelos matemáticos aplicables al control de malezas (Rykiel, 1996).

El desarrollo de esta tesis permitió identificar varios frentes de investigación con un interesante potencial de desarrollo. En particular, nos referimos a dos aspectos que consideramos se destacan por su potencial impacto en el manejo del raigrás y de otras malezas problemáticas de la zona y que, de hecho, constituyen en la actualidad líneas de trabajo vigentes en nuestro grupo de investigación.

En primer lugar, como se mencionó anteriormente, contar con una estimación precisa de la emergencia de la maleza a campo es un elemento crucial para aspirar a un adecuado control. Dicho parámetro constituye una de las entradas más importantes de cualquier sistema de soporte de decisiones agronómicas. Específicamente se requieren modelos que utilicen pronósticos meteorológicos.

Dichos modelos pueden utilizarse, por ejemplo, como módulos en el sistema propuesto en el Capítulo 4. En este caso, es posible reemplazar el parámetro E_t , que representa el perfil de emergencia de la maleza a lo largo de todo el año, por los valores de emergencia predichos por el submodelo. De esta forma, la precisión de la predicción del planeamiento aumenta, ya que se correlaciona la emergencia con las condiciones climáticas reinantes. Además, a medida que las predicciones climáticas se van actualizando, es posible realizar actualizaciones en las estrategias de control sugeridas por el modelo. Son posibles enfoques basados en técnicas de *soft-computing* como los propuestos en Chantre *et al.* (2014) y Blanco *et al.* (2014) para *Avena fatua*.

El otro aspecto de interés para investigar a partir de los hallazgos de esta tesis tiene que ver con el diseño de sistemas de soporte a la toma de decisiones (SSD) relacionados con el Manejo Integrado de Malezas (MIM). Se sabe que un MIM, al combinar distintos métodos de prevención y control (químicos, mecánicos, culturales), contribuye a mejorar la sustentabilidad de los agroecosistemas a largo plazo, sin perjudicar necesariamente la ecuación económica de la actividad agrícola. Se busca básicamente mitigar los perjuicios que produce la agricultura moderna al ambiente y a la sociedad, tales como la presencia de residuos en los alimentos, contaminación de suelos y aguas, efectos negativos sobre la flora y fauna natural y disminución de la biodiversidad, entre otros, además de los problemas relacionados con la aparición de variedades resistentes a los herbicidas.

Sin embargo, cuantificar el costo/beneficio de las diferentes estrategias o decisiones de manejo no resulta sencillo debido fundamentalmente a la gran cantidad de información requerida y a la dificultad de sistematizar adecuadamente dicha información para su implementación en un marco decisorio apropiado. El modelado matemático proporciona una plataforma idónea para sistematizar este tipo de análisis, como lo demuestra una interesante cantidad de antecedentes a nivel internacional como los revisados en el Capítulo 4 de esta tesis (Tabla 4.1).

Los principales desafíos asociados con el desarrollo de SSD para MIM son, por una parte, el desarrollo de un modelo de simulación que permita reflejar de manera realista los sistemas cultivo-maleza y por otro contar con algoritmos de optimización que puedan usar dicho simulador para cuantificar las diferentes opciones de manejo en un período prolongado, por ejemplo una década, y recomendar la de mejor compromiso económico/ambiental. Respecto del simulador, la dificultad radica en

considerar varias especies de malezas presentes en cualquier ecosistema, la posibilidad de desarrollar hasta dos cultivos diferentes por año y las muchas opciones de control (químico, mecánico y cultural) disponibles para el productor.

Las líneas de investigación arriba comentadas (emergencia a campo y MIM) son necesariamente interdisciplinarias y requieren del trabajo conjunto de investigadores en ingeniería agronómica y especialistas en sistemas de información e ingeniería de procesos, así como la participación de productores y asesores agropecuarios. En ambos casos se requiere de abundante información de campo, de un conocimiento profundo de la biología y ecología subyacentes en los complejos sistemas agroecológicos y de un adecuado manejo de las tecnologías que ofrecen hoy en día las ciencias de la computación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alister, C y Kogan, M.** 2006. ERI: Environmental Risk Index. A simple proposal to select agrochemicals for agricultural use. *Crop Protection* 25: 202-211.
- Allen, PS y Meyer, SE.** 2002. Ecology and ecological genetics of seed dormancy in downy brome. *Weed Science* 50: 241-247.
- Allinson, G; Bui, AD; Zhang, P; Rose, G; Wightwick, AM; Allinson, M y Pettigrove, V.** 2014. Investigation of 10 herbicides in surface waters of a horticultural production catchment in southeastern Australia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 67: 358-373.
- Alm, DM; Stoller, EW y Max, LM.** 1993. An index model for predicting seed germination and emergence rates. *Weed Technology* 7: 560-569.
- Alonso, SI; Guma, IR y Clausen, AM.** 1999. Variability for salt tolerance during germination in *Lolium mutiflorum* Lam. naturalized in the pampean grasslands. *Genetic Resources and Crop Evolution* 46: 87-94.
- Alvarado, V y Bradford, KJ.** 2002. A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. *Plant, Cell and Environment* 25: 1061-1069.
- Anderson, F y Al-Thani, NNJ.** 2015. Feasibility study of a national web-based GIS application to assess the risk of pesticide drift in the U.S. *Journal of Geoscience and Environmental* 3: 20-24.
- Andersson, L; Milberg, P; Schütz, W y Steinmetz, O.** 2002. Germination characteristics and emergence time of annual *Bromus* species of differing weediness in Sweden. *Weed Research* 42: 135-147.
- Andrade, MI; Laporta, P y Iezzi, L.** 2009. Sequías en el sudoeste bonaerense: vulnerabilidad e incertidumbre. *Geograficando* 5: 213-233.
- Bair, NB; Meyer, SE y Allen, PS.** 2006. A hydrothermal after-ripening time model for seed dormancy loss in *Bromus tectorum* L. *Seed Science Research* 16: 17-28.
- Baker, HG.** 1974. The evolution of weeds. *Annual Review of Ecology and Systematics* 5: 1-24.
- Baker, HG.** 1991. The continuing evolution of weeds. *Economic Botany* 45: 445-449.
- Balfourier, F; Imbert, C y Charmet, G.** 2000. Evidence for phylogeographic structure in *Lolium* species related to the spread of agriculture in Europe. A cpDNA study. *Theoretical and Applied Genetics* 101: 131-138.

- Barroso, J; Navarrete, L; Sánchez del Arco, MJ; Fernández-Quintanilla, C; Lutman, PJW; Perry, NH y Hull, RI.** 2006. Dispersal of *Avena fatua* and *Avena sterilis* patches by natural dissemination, soil tillage and combine harvesters. *Weed Research* 46:118-128.
- Baskin, CC y Baskin, JM.** 2014. *Seeds. Ecology, Biogeography and Evolution of Dormancy and Germination*. Segunda edición. Elsevier, Estados Unidos de América. 1583 pp.
- Baskin, JM y Baskin, CC.** 2004. A classification system for seed dormancy. *Seed Science Research* 14: 1-16.
- Bastiaans, L; Kropff, MJ; Goudriaan, J y van Laar, HH.** 2000. Design of weed management systems with a reduced reliance on herbicides poses new challenges and prerequisites for modeling crop-weed interactions. *Field Crops Research* 67: 161-179.
- Batlla, D y Benech-Arnold, RL.** 2003. A quantitative analysis of dormancy loss dynamics in *Polygonum aviculare* L. seeds: development of a thermal time model based on changes in seed population thermal parameters. *Seed Science Research* 13: 55-68.
- Batlla, D y Benech-Arnold, RL.** 2006. The role of fluctuations in soil water content on the regulation of dormancy changes in buried seeds of *Polygonum aviculare* L. *Seed Science Research* 16: 47-59.
- Batlla, D y Benech-Arnold, RL.** 2007. Predicting changes in dormancy level in weed seed soil banks: implications for weed management. *Crop Protection* 26: 189-197.
- Beddows, AR.** 1967. *Lolium perenne* L. *Journal of Ecology* 55(2): 567-587.
- Bellostas, A y Aibar, J.** 1994. La importancia de *Lolium rigidum* Gaudin como infestante de los cereales de invierno en la provincial de Huesca. *Lucas Mallada* 6: 55-76.
- Benech-Arnold, RL; Ghera, CM; Sánchez, RA e Insausti, P.** 1990. Temperature effects on dormancy release and germination rate in *Sorghum halepense* (L.) Pers. seeds: a quantitative analysis. *Weed Research* 30: 81-89.
- Benech-Arnold, RL; Sánchez, RA; Forcella, F; Kruk, BC y Ghera, CM.** 2000. Environmental control of dormancy in weed seed banks in soil. *Field Crops Research* 67: 105-122.
- Benjamin, LR; Milne, AE; Parsons, DJ y Lutman, PJW.** 2010. A model to simulate yield losses in winter wheat caused by weeds, for use in a weed management decision support system. *Crop Protection* 29: 1264-1273.

- Benjamin, LR; Milne, AE; Parsons, DJ; Cussans, J y Lutman, PJW.** 2009. Using stochastic dynamic programming to support weed management decisions over a rotation. *Weed Research* 49: 207-216.
- Berti, A y Zanin, G.** 1997. GESTINF: a decision model for post-emergence weed management in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Crop Protection* 16(2): 109 – 116.
- Berti, A; Bravin, F y Zanin, G.** 2003. Application of decision-support software for postemergence weed control. *Weed Science* 51: 618 – 627.
- Berti, A; Dunan, C; Sattin, M; Zanin, G y Westra, P.** 1996. A new approach to determine when to control weeds. *Weed Science* 44(3): 496-503.
- Bewley, JD.** 1997. Seed germination and dormancy. *The Plant Cell* 9: 1055-1066.
- Bhupander, K; Richa, G; Gargi, G; Meenu, M; Kumar, SS; Dev, P; Sanjay, K y Sekhar, SC.** 2011. Residues of pesticides and herbicides in soils from agriculture areas of Delhi region, India. *Journal of Environmental and Earth Science* 1: 1-8.
- Blanco, AM; Chantre, GR; Lodovichi, MV; Bandoni, JA; López, RL; Vigna, MR; Gigón, R y Sabbatini, MR.** 2014. Modeling seed dormancy release and germination for predicting *Avena fatua* L. field emergence: a genetic algorithm approach. *Ecological Modelling* 272: 293-300.
- Blanco-Moreno, JM; Chamorro, L; Masalles, RM; Recasens, J y Sans, FX.** 2004. Spatial distribution of *Lolium rigidum* seedlings following seed dispersal by combine harvesters. *Weed Research* 44: 375-387.
- Bohnenblust, EW; Vaudo, AD; Egan, F; Mortensen, DA y Tooker, JF.** 2016. Effects of the herbicide dicamba on nontarget plants and pollinator visitation. *Environmental Toxicology and Chemistry* 35: 144-151.
- Bond, W y Grundy, AC.** 2001. Non-chemical weed management in organic farming systems. *Weed Research* 41: 383-405.
- Borger, CPD; Scott, JK; Walsh, M y Powles, SB.** 2009. Demography of *Salsola australis* populations in the agricultural region of south-west Australia. *Weed Research* 49: 391-399.
- Borza, JK; Westerman, PR y Liebman, M.** 2007. Comparing estimates of seed viability in three foxtail (*Setaria*) species using the imbibed seed crush test with and without additional tetrazolium testing. *Weed Technology* 21: 518:522.
- Bradford, KJ.** 2002. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science* 50: 248-260.
- Bravin, F; Zanin G y Preston, C.** 2001. Diclofop-methyl resistance in populations of *Lolium spp.* from central Italy. *Weed Research* 41: 49-58.

- Buckley, YM; Hinz, HL; Matthies, D y Rees, M.** 2001. Interactions between density-dependent processes, population dynamics and control of an invasive plant species, *Tripleurospermum perforatum* (scentless chamomile). *Ecology Letters* 4: 551-558.
- Buhler, DD; Hartzler, RG y Forcella, F.** 1997. Implications of weed seedbank dynamics to weed management. *Weed Science* 45: 329-336.
- Bulinska-Radomska, Z y Lester, RN.** 1985. Relationships between five species of *Lolium* (Poaceae). *Plant Systematics and Evolution* 148: 169-175.
- Burnet, MWM; Hart, Q; Holtum, JAM y Powles, SB.** 1994. Resistance to nine herbicide classes in a population of rigid ryegrass (*Lolium rigidum*). *Weed Science* 42: 369-377.
- Cabrera, AL y Zardini, EM.** 1993. *Manual de la flora de los alrededores de Buenos Aires*. Segunda edición. Editorial ACME, Buenos Aires. 755 pp.
- Campo, AM; Ramos, MB y Zapperi, PA.** 2009. Análisis de las variaciones anuales de precipitación en el suroeste bonaerense, Argentina. XII Encuentro de Geógrafos de América latina. Montevideo, Uruguay.
- Canner, SR; Wiles, LJ y McMaster, GS.** 2002. Weed reproduction model parameters may be estimated from crop yield loss data. *Weed Science* 50: 763-772.
- Cantamutto, M; Bertucci, C y Huarte, D.** 2016. *El trigo en el sudoeste bonaerense*. INTA. 76 pp.
- Cardina, J; Sparrow, DH y McCoy, EL.** 1996. Spatial relationships between seedbank and seedling populations of common lambsquarters (*Chenopodium album*) and annual grasses. *Weed Science* 44: 298-308.
- CASAFE.** 2007. Guía de productos fitosanitarios. Tomo II. Generalidades y productos para la República Argentina. Cámara Argentina de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes (CASAFE), Argentina.
- Castro, S; Loureiro, J; Santos, C; Ater, M; Ayensa, G y Navarro, L.** 2007. Distribution of flower morphs, ploidy level and sexual reproduction of the invasive weed *Oxalis pes-caprae* in the western area of the Mediterranean region. *Annals of Botany* 99: 507-517.
- Chantre, GR; Blanco, AM; Forcella, F; Van Acker, RC; Sabbatini, MR y González-Andújar, JL.** 2014. A comparative study between nonlinear regression and artificial neural network approaches for modeling wild oat (*Avena fatua*) field emergence. *The Journal of Agricultural Science* 152: 254-262.
- Chantre, GR; Batlla, D; Sabbatini, MR y Orioli, G.** 2009. Germination parameterization and development of an after-ripening thermal-time model for

primary dormancy release of *Lithospermum arvense* seeds. *Annals of Botany* 103: 1291-1301.

- Chantre, GR; Blanco, AM; Lodovichi, MV; Bandoni, AJ; Sabbatini, MR; López, RL; Vigna, MR y Gigón, R.** 2012. Modeling *Avena fatua* seedling emergence dynamics: an artificial neural network approach. *Computer and Electronics in Agriculture* 88: 95-102.
- Chauhan, BS y Abugho, SB.** 2013. Effects of water regime, nitrogen fertilization and rice plant density on growth and reproduction of lowland weed *Echinochloa crus-galli*. *Crop Protection* 54: 142-147.
- Chauhan, BS; Gill, G y Preston, C.** 2006. Influence of environmental factors on seed germination and seedling emergence of rigid ryegrass (*Lolium rigidum*). *Weed Science* 54: 1004-1012.
- Chauvel, B; Guillemin, JP y Letouze, A.** 2005. Effect of intra-specific competition on development and growth of *Alopecurus myosuroides* Hudson. *European Journal of Agronomy* 22: 301-308.
- Chauvel, B; Guillemin, JP; Colbach, N y Gasquez, J.** 2001. Evaluation of cropping systems for management of herbicide-resistant populations of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.). *Crop Protection* 20: 127-137.
- Chauvel, B; Munier-Jolain, NM; Grandgirard, D y Gueritain, G.** 2002. Effect of vernalization on the development and growth of *Alopecurus myosuroides*. *Weed Research* 42: 166-175.
- Chicouene, D.** 2007. Mechanical destruction of weeds. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 27: 19-27.
- Christoffoleti, PJ y López-Ovejero, R.** 2003. Principais aspectos da resistência de plantas daninhas ao herbicida glyphosate. *Planta Daninha* 21: 507-515.
- Cici, SZH y Van Acker, RC.** 2008. A review of the recruitment biology of winter annual weeds in Canada. *Canadian Journal of Plant Science* 89: 575-589.
- Colbach, N y Debaeke, P.** 1998. Integrating crop management and crop rotation effects into models of weed population dynamics: a review. *Weed Science* 46: 717-728.
- Colbach, N; Chauvel, B; Gauvrit, C y Munier-Jolain, NM.** 2007. Construction and evaluation of ALOMYSYS modelling the effects of cropping systems on the blackgrass life-cycle: from seedling to seed production. *Ecological Modelling* 201: 283-300.
- Colbach, N; Dürr, C; Roger-Estrade, J; Chauvel, B y Caneill, J.** 2006. ALOMYSYS: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and

- emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate. I. Construction. *European Journal of Agronomy* 24: 95-112.
- Cousens, R y Mortimer, M.** 1995. *Dynamics of weed populations*. Cambridge University Press. Gran Bretaña. 332 pp.
- Cousens, R.** 1985a. A simple model relating yield loss to weed density. *Annals of Applied Biology* 107: 239-252.
- Cousens, R.** 1985b. An empirical model relating crop yield to weed and crop density and a statistical comparison with other models. *The Journal of Agricultural Science* 105: 513-521.
- Cousens, R; Brain, P; O'Donovan, JT y O'Sullivan, PA.** 1987. The use of biologically realistic equations to describe the effects of weed density and relative time of emergence on crop yield. *Weed Science* 35(5): 720-725.
- Cousens, R; Doyle, CJ; Wilson, BJ y Cussans, GW.** 1986. Modelling the economics of controlling *Avena fatua* in winter wheat. *Pesticide Science* 17: 1 – 12.
- Cousens, R; Weaver, SE; Porter, JR; Rooney, JM; Butler, DR y Johnson, MP.** 1992. Growth and development of *Avena fatua* (wild-oat) in the field. *Annals of Applied Biology* 120: 339-351.
- Cousens, RD y Mokhtari, S.** 1998. Seasonal and site variability in the tolerance of wheat cultivars to interference from *Lolium rigidum*. *Weed Research* 38: 301-307.
- Cousens, RD; Weaver, SE; Martin, TD, Blair, AM y Wilson, J.** 1991. Dynamics of competition between wild oats (*Avena fatua* L.) and winter cereals. *Weed Research* 31: 203-210.
- Covell, S; Ellis, RH; Roberts, EH y Summerfield, RJ.** 1986. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. *Journal of Experimental Botany* 37: 705-715.
- Dai, J; Wiersma, JJ; Martinson, KL y Durgan, BR.** 2012. Influence of time of emergence on the growth and development of wild oat (*Avena fatua*). *Weed Science* 60: 389-393.
- De Buck, AJ; Schoorlemmer, HB; Wossink, GAA y Janssens, SRM.** 1999. Risks of post-emergence weed control strategies in sugar beet: development and application of a bio-economic model. *Agricultural Systems* 59: 283 – 299.
- De Souza Maia, M; Maia, FC y Pérez, M.A.** 2006. Bancos de semillas en el suelo. *Agriscientia* 23: 33-44.
- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini, MG; González, L; Tablada, M y Robledo, CW.** 2008. *InfoStat, version 2008*, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

- Diez de Ulzurrun, P y Leaden, MI.** 2012. Análisis de la sensibilidad de biotipos de *Lolium multiflorum* a herbicidas inhibidores de la enzima ALS, ACCasa y glifosato. *Planta Daninha* 30: 667-673.
- Diez de Ulzurrun, P; Massa, G; Feingold, S y Leaden, MI.** 2008. *Lolium multiflorum* resistente a glifosato en la provincial de Buenos Aires: presentación del proyecto de estudio. *CD del XVIII Congreso de la Asociación Latinoamericana de Malezas*. Ouro Preto, Brasil, del 4 al 8 de mayo.
- Doole, GJ y Pannell, DJ.** 2008. Optimisation of a large, constrained simulation model using compressed annealing. *Journal of Agricultural Economics* 59: 188-206.
- Doyle, CJ.** 1997. A review of the use of models of weed control in Integrated Crop Protection. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 64: 165-172.
- Doyle, CJ; Cousens, R y Moss, SR.** 1986. A model of the economics of controlling *Alopecurus myosuroides* Huds. in winter wheat. *Crop Protection* 5(2): 143 – 150.
- Dürr, C; Dickie, JB; Yang, XY y Pritchard, HW.** 2015. Ranges of critical temperature and water potential values for the germination of species worldwide: contribution to a seed trait database. *Agricultural and Forest Meteorology* 200: 222-232.
- Egan, JF; Bohnenblust, E; Goslee, S; Mortensen, D y Tooker, J.** 2014. Herbicide drift can affect plant and arthropod communities. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 185: 77-87.
- Eichelberger, L; De Souza Maia, M y Brião Camacho, JC.** 2001. Períodos de pré-esfriamento na superação da dormência de sementes de azevém-anual (*Lolium multiflorum* Lam). *Revista Brasileira de Sementes* 23: 212-218.
- Ellis, AT; Morgan, GD y Mueller, TC.** 2008. Mesosulfuron-resistant Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) biotype from Texas. *Weed Technology* 22: 431-434.
- Ellis, RH y Butcher, PD.** 1988. The effects of priming and “natural” differences in quality amongst onion seed lots on the response of the rate of germination to temperature and the identification of the characteristics under genotypic control. *Journal of Experimental Botany* 39: 935-950.
- Ellis, RH; Covell, S; Roberts, EH y Summerfield, RJ.** 1986. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. II. Intraspecific variation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) at constant temperatures. *Journal of Experimental Botany* 37: 1503-1515.
- Ellis, RH; Simon, G y Covell, S.** 1987. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. III. A comparison of five faba bean

genotypes at constant temperatures using a new screening method. *Journal of Experimental Botany* 38: 1033-1043.

EXTOXNET. <http://pmep.cce.cornell.edu/profiles/extoxnet/> Último acceso: 21 de diciembre de 2017.

Falconer, K y Hodge, I. 2001. Pesticide taxation and multi-objective policy-making: farm modelling to evaluate profit/environment trade-offs. *Ecological Economics* 36: 263 – 279.

Fantke, P y Jolliet, O. 2016. Life cycle human health impacts of 875 pesticides. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21: 722-733.

Fenner, M. 1987. Seedlings. *New Phytologist* 106: 35-47.

Fernández-Quintanilla, C; Barroso, J; Recasens, J; Sans, X; Torner, C y Sánchez del Arco, MJ. 2000. Demography of *Lolium rigidum* in winter barley crops: analysis of recruitment, survival and reproduction. *Weed Research* 40: 281-291.

Fernández-Quintanilla, C; Navarrete, L; González-Andújar, JL; Fernández, A y Sánchez, MJ. 1986. Seedling recruitment and age-specific survivorship and reproduction in populations of *Avena sterilis* L. spp. *ludoviciana* (Durieu) Nyman. *Journal of Applied Ecology* 23: 945-955.

Ferreira, EA; Concenço, G; Silva, AA; Reis, MR; Vargas, L; Viana, RG; Guimarães, AA y Galon, L. 2008. Potencial competitivo de biótipos de azevém (*Lolium multiflorum*). *Planta Daninha* 26: 261-269.

Ferreira, MI; Reinhardt, CF; Lamprecht, SC; Sinclair, M; MacKenzie, L y van Coller, G. 2015. Morphological identification of the ryegrass hybrid *Lolium multiflorum* x *Lolium perenne* and isolation of the pathogen *Fusarium pseudograminearum* in the Western Cape. *South African Journal of Plant and Soil* 32: 9-15.

Ferris, IG; Frecker, TC; Haigh, BM y Durrant, S. 1992. HERBICIDE ADVISER: A decision support system to optimise atrazine and chlorsulfuron activity and crop safety. *Computer and Electronics in Agriculture* 6: 295 – 317.

Finch-Savage, WE y Leubner-Metzger, GL. 2006. Seed dormancy and the control of germination. *New Phytologist* 171: 501-523.

Firbank, LG y Watkinson, AR. 1986. Modelling the population dynamics of an arable weed and its effects upon crop yield. *Journal of Applied Ecology* 23(1): 147-159.

Fleet, B y Gill, G. 2012. Seed dormancy and seedling recruitment in smooth barley (*Hordeum murinum* ssp. *glaucum*) populations in southern Australia. *Weed Science* 60: 394-400.

Foley, ME. 2001. Seed dormancy: an update on terminology, physiological genetics, and quantitative trait loci regulating germinability. *Weed Science* 49: 305-317.

- Forcella, F; Benech-Arnold, RL; Sanchez, R y Ghera, CM.** 2000. Modeling seedling emergence. *Field Crops Research* 67: 123-139.
- Forcella, F; King, RP; Swinton, SM; Buhler, DD y Gunsolus, JL.** 1996. Multi-year validation of a decision aid for integrated weed management in row crops. *Weed Science* 44: 650-661.
- Freckleton, RP; Sutherland, WJ; Watkinson, AR y Stephens, PA.** 2008. Modelling the effects of management on population dynamics: some lessons from annual weeds. *Journal of Applied Ecology* 45: 1050-1058.
- Freckleton, RP y Stephens, PA.** 2009. Predictive models of weed population dynamics. *Weed Research* 49: 225-232.
- Freckleton, RP y Watkinson, AR.** 1998. Predicting the determinants of weed abundance: a model for the population dynamics of *Chenopodium album* in sugar beet. *Journal of Applied Ecology* 35: 904-920.
- Fylstra, D; Lasdon, L; Watson, J y Waren, A.** 1998. Design and use of Microsoft Excel Solver. *Interfaces* 28: 29-55.
- Galantini, JA; Landriscini, MA; Fernández, R; Minoldo, G; Cacchiarelli, J e Iglesias, JO.** 2006. Trigo: fertilización con nitrógeno y azufre en el sur y sudoeste bonaerense. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur, INPOFOS*, 23-25.
- Gallagher, RS; Steadman, KJ y Crawford, AD.** 2004. Alleviation of dormancy in annual ryegrass (*Lolium rigidum*) seeds by hydration and after-ripening. *Weed Science* 52: 968-975.
- Gallandt, ER y Weiner, J.** 2007. Crop-weed competition. En: *Encyclopedia of Life Science*. Wiley & Sons Ltd, Chichester. <http://www.els.net/>. doi: 10.1002/9780470015902.a0020477.
- Gallart, M.; Mas, MT y Verdú, AMC.** 2010. Demography of *Digitaria sanguinalis*: effect of the emergence time on survival, reproduction, and biomass. *Weed Biology and Management* 10: 132-140.
- GAMS.** 2008a. A User's Guide. GAMS Development Corporation.
- GAMS.** 2008b. The Solvers Manual. GAMS Development Corporation.
- García Torres, L y Fernández-Quintanilla, C.** 1991. Fundamentos sobre malas hierbas y herbicidas. Ediciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid. Mundi-Prensa, Madrid, 348 pp.
- García-Huidobro, J; Monteith, JL y Squire, GR.** 1982. Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.). *Journal of Experimental Botany* 33: 288-296.

- Gardarin, A; Dürr, C y Colbach, N.** 2011. Prediction of germination rates of weed species: relationships between germination speed parameters and species traits. *Ecological Modelling* 222: 626-636.
- Gertsev, VI y Gertseva, VV.** 2004. Classification of mathematical models in ecology. *Ecological Modelling* 178: 329-334.
- Ghersa, CM y Holt, JS.** 1995. Using phenology prediction in weed management: a review. *Weed Research* 35: 461-470.
- Ghersa, CM y Martínez-Ghersa, MA.** 2000. Ecological correlates of weed seed size and persistence in the soil under different tilling systems: implications for weed management. *Field Crops Research* 67: 141-148.
- Ghersa, CM; Benech-Arnold, RL; Satorre, EH y Martínez-Ghersa.** 2000. Advances in weed management strategies. *Fields Crops Research* 67: 95-104.
- Ghersa, CM; Roush, ML; Radosevich, SR y Cordray SM.** 1994. Coevolution of agroecosystems and weed management. *BioScience* 44: 85-94.
- Gnanavel, I.** 2015. Eco-friendly weed control options for sustainable agriculture. *Science International* 3: 37-47.
- Goggin, DE; Steadman, KJ y Powles, SB.** 2008. Green and blue light photoreceptors are involved in maintenance of dormancy in imbibed annual ryegrass (*Lolium rigidum*) seeds. *New Phytologist* 180: 81-89.
- González-Andújar, JL y Fernández-Quintanilla, C.** 1991. Modelling the population dynamics of *Avena sterilis* under dry-land cereal cropping systems. *Journal of Applied Ecology* 28: 16-27.
- González-Andújar, JL y Fernández-Quintanilla, C.** 2004. Modelling the population dynamics of annual ryegrass (*Lolium rigidum*) under various weed management systems. *Crop Protection* 23: 723-729.
- González-Andújar, JL; Jiménez-Hidalgo, M; García-Torres, L y Saavedra, M.** 2005. Demography and population dynamic of the arable weed *Phalaris brachystachys* L. (short-spiked canary grass) in winter wheat. *Crop Protection* 24: 581-584.
- González-Díaz, L; Leguizamón, E; Forcella, F y González-Andújar, JL.** 2007. Short communication. Integration of emergence and population dynamic models for long term weed management using wild oat (*Avena fatua* L.) as an example. *Spanish Journal of Agricultural Research* 5: 199-203.
- Gramshaw, D.** 1972. Germination of annual ryegrass seeds (*Lolium rigidum* Gaud.) as influenced by temperature, light, storage environment, and age. *Australian Journal of Agricultural Research* 23: 779-787.

- GraphPad Prism.** 2003. GraphPad Prism version 4.00 for Windows, Graph Pad Software, San Diego, California, USA.
- Griepentog, HW y Dedousis, AP.** 2010. Mechanical weed control. En: *Soil Engineering* (eds. Dedousis, AP y Bartzanas, T), 171-179. Springer, Heidelberg (Alemania).
- Grundy, AC y Mead, A.** 2000. Modeling weed emergence as a function of meteorological records. *Weed Science* 48: 594-603.
- Grundy, AC.** 2003. Predicting weed emergence: a review of approaches and future challenges. *Weed Research* 43: 1-11.
- Grundy, AC; Mead, A y Burston, S.** 1999. Modelling the effect of cultivation on seed movement with application to the prediction of weed seedling emergence. *Journal of Applied Ecology* 36: 663-678.
- Grundy, AC; Mead, A y Burston, S.** 2003. Modelling the emergence response of weed seeds to burial depth: interactions with seed density, weight and shape. *Journal of Applied Ecology* 40: 757-770.
- Grundy, AC; Phelps, K; Reader, RJ y Burston, S.** 2000. Modelling the germination of *Stellaria media* using the concept of hydrothermal time. *New Phytologist* 148: 433-444.
- Gummerson, RJ.** 1986. The effect of constant temperatures and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *Journal of Experimental Botany* 37: 729-741.
- Hardegree, SP.** 2006. Predicting germination response to temperature. I. Cardinal-temperature models and subpopulation-specific regression. *Annals of Botany* 97: 1115-1125.
- Hardegree, SP; Van Vactor, SS; Pierson, FB y Palmquist, DE.** 1999. Predicting variable-temperature response of non-dormant seeds from constant-temperature germination data. *Journal of Range Management* 52: 83-91.
- Hashem, A; Radosevich, SR y Roush, ML.** 1998. Effect of proximity factors on competition between winter wheat (*Triticum aestivum*) and Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*). *Weed Science* 46: 181-190.
- Heap, I.** 2016. The International Survey of Herbicide Resistant Weeds. Disponible en: <http://www.weedscience.com>. Último acceso: 22 de diciembre de 2017.
- Hegazy, AK; Fahmy, GM; Ali, MI y Gomaa, NH.** 2005. Growth and phenology of eight common weed species. *Journal of Arid Environments* 61: 171-183.
- Hijosa-Valsero, M; Bécares, E; Fernández-Aláez, C; Fernández-Aláez, M; Mayo, R y Jiménez, JJ.** 2016. Chemical pollution in inland shallow lakes in the Mediterranean region (NW Spain): PAHs, insecticides and herbicides in water and sediments. *Science of the Total Environment* 544: 797-810.

- Holman, JD; Bussan, AJ; Maxwell, BD; Miller, PR y Mickelson, JA.** 2006. Persian darnel (*Lolium persicum*) fecundity response to spring wheat, canola and sunflower interference. *Weed Technology* 20:430-437.
- Holst, N; Rasmussen, IA y Bastiaans, L.** 2007. Field weed population dynamics: a review of model approaches and applications. *Weed Research* 47: 1-14.
- Ichihara, M; Yamashita, M; Sawada, H; Kida, Y y Asai, M.** 2009. Influence of after-ripening environments on the germination characteristics and seed fate of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*). *Weed Biology and Management* 9: 217-224.
- Inda Aramendia, LA.** 2005. El género *Lolium*. Claves dicotómicas. *Revista de la Real Academia de Ciencias. Zaragoza* 60: 143-155.
- IPMCenter.** <http://www.ipmcenters.org/ecotox/> Último acceso: 22 de diciembre de 2017.
- Istilart, C y Yanniccari, M.** 2011. Análisis de la evolución de malezas en cereales de invierno durante 27 años en la zona sur de la pampa húmeda argentina. *Revista Técnica Especial: Malezas problema (Aapresid)*: 47-50.
- Jamieson, PD; Brooking, IR; Porter, JR y Wilson, DR.** 1995. Prediction of leaf appearance in wheat: a question of temperature. *Field Crops Research* 41: 35-44.
- Jensen, PK.** 2010. Longevity of seeds of *Poa pratensis* and *Lolium perenne* as affected by simulated soil tillage practices and its implications for contamination of herbage seed crops. *Grass and Forage Science* 65: 85-91.
- Kalsing, A; Tronquini, SM; Paim Mariot, CH; Rubin, RS; Da Cas Bundt, A; Fadin, DA y Marques, LH.** 2017. Susceptibility of *Echinochloa* populations to cyhalofop-butyl in Southern region of Brazil and impact of the weed phenology on its efficacy of control. *Ciência Rural* 47: 1-7.
- Kim, DS; Brain, P; Marshall, EJP y Caseley, JC.** 2002. Modelling herbicide dose and weed density effect on crop:weed competition. *Weed Research* 42: 1-13.
- Kovach, J; Petzold, C; Degnil, J y Tette, J.** 1992. A method to measure the environmental impact of pesticides. *New York's Food and Life Sciences Bulletin* 139: 1-8.
- Kruk, B; Insausti, P; Razul, A y Benech-Arnold, R.** 2006. Light and thermal environments as modified by a wheat crop: effects on weed seed germination. *Journal of Applied Ecology* 43: 227-236.
- Kusvuran, A; Nazli, RI y Kusvuran, S.** 2015. The effects of salinity on seed germination in perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) varieties. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences* 2: 78-84.

- Larsen, SU; Bailly, C; Côme, D y Corbineau, F.** 2004. Use of hydrothermal time model to analyse interacting effects of water and temperature on germination of three grass species. *Seed Science Research* 14: 35-50.
- Leach, AW y Mumford, JD.** 2008. Pesticide Environmental Accounting: a method for assessing the external costs of individual pesticide applications. *Environmental Pollution* 151: 139-147.
- Leach, AW y Mumford, JD.** 2011. Pesticide environmental accounting: a decision-making tool estimating external costs of pesticides. *Journal of Consumer Protection and Food Safety* 6(1): S21-S26.
- Leblanc, ML; Cloutier, DC; Stewart, KA y Hamel, C.** 2003. The use of thermal time to model common lambsquarters (*Chenopodium album*) seedling emergence in corn. *Weed Science* 51: 718-724.
- Leguizamón, ES; Fernández-Quintanilla, C; Barroso, J y González-Andújar, JL.** 2005. Using thermal and hydrothermal time to model seedling emergence of *Avena sterilis* spp. *Ludoviciana* in Spain. *Weed Research* 45: 149-156.
- Lemerle, D; Verbeek, B y Coombes, N.** 1995. Losses in grain yield of winter crops from *Lolium rigidum* competition depend on crop species, cultivar and season. *Weed Research* 35: 503-509.
- Liebl, R y Worsham, AD.** 1987. Interference of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) in wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Science* 35: 819-823.
- Liebman, M y Mohler, CL.** 2004. Weeds and the soil environment. En: *Ecological Management of Agricultural Weeds* (eds. Liebman, M; Mohler, CL y Staver, CP), 210-268. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Liebman, M y Staver, CP.** 2004. Crop diversification for weed management. En: *Ecological Management of Agricultural Weeds* (eds. Liebman, M; Mohler, CL y Staver, CP), 322-374. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Liebman, M.** 2004a. Weed management: a need for ecological approaches. En: *Ecological Management of Agricultural Weeds* (eds. Liebman, M; Mohler, CL y Staver, CP), 1-39. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Liebman, M.** 2004b. Managing weeds with insects and pathogens. En: *Ecological Management of Agricultural Weeds* (eds. Liebman, M; Mohler, CL y Staver, CP), 375-408. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Lintell-Smith, G; Freckleton, RP; Firbank, LG y Watkinson, AR.** 1999. The population dynamics of *Anisantha sterilis* in winter wheat: comparative demography and the role of management. *Journal of Applied Ecology* 36: 455-471.

- Llewellyn, RS y Powles, SB.** 2001. High levels of herbicide resistance in rigid ryegrass (*Lolium rigidum*) in the wheat belt of western Australia. *Weed Technology* 15: 242-248.
- Lodovichi, MV; Blanco, AM; Chantre, GR; Bandoni, JA; Sabbatini, MR; Vigna, M; López, R y Gigón, R.** 2013. Operational planning of herbicide-based weed management. *Agricultural Systems* 121: 117-129.
- Lodovichi, MV; Chantre, GR y Sabbatini, MR.** 2014. Estimación de los parámetros térmicos asociados a la germinabilidad durante el proceso de postmaduración a campo en semillas de *Lolium perenne*. *XV Congreso Latinoamericano y XXX Reunión Argentina de Fisiología Vegetal*. Mar del Plata, Argentina, del 21 al 24 de septiembre de 2014. Página 81.
- Loewy, T y Puricelli, CA.** 1982. Disponibilidad de fósforo en suelos del área de la EEA Bordenave. Informe técnico N° 28, 16 p.
- Loewy, T y Seewald, HA.** 1980. Fertilidad nitrogenada para trigo en suelos del sudoeste bonaerense. Actas IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Paraná II: 533-536.
- Loos, BP.** 1993. Morphological variation in *Lolium* (Poaceae) as a measure of species relationships. *Plant Systematics and Evolution* 188: 87-99.
- López, RL; Vigna, MR y Gigón, R.** 2008. Evaluación de herbicidas para el control de *Lolium multiflorum* Lam. en barbecho para cereales de invierno. *CD del XVIII Congreso de la Asociación Latinoamericana de Malezas*. Ouro Preto, Brasil, del 4 al 8 de mayo.
- Maia, FC; De Souza Maia, M; Bekker, RM; Previatti Berton, R y Caetano, LS.** 2007. *Lolium multiflorum* seeds in the soil: I. Soil seed bank dynamics in a no till system. *Revista Brasileira de Sementes* 29: 100-110.
- Martínez-Ghersa, MA y Ghersa, CM.** 2006. The relationship of propagule pressure to invasion potential in plants. *Euphytica* 148: 87-96.
- Martinson, K; Durgan, B; Forcella, F; Wiersma, J; Spokas, K y Archer, D.** 2007. An emergence model for wild oat (*Avena fatua*). *Weed Science* 55: 584-591.
- Maxwell, BD; Wilson, MV y Radosevich, SR.** 1988. Population modeling approach for evaluating leafy spurge (*Euphorbia esula*) development and control. *Weed Technology* 132-138.
- Melander, B; Holst, N; Jensen, PK; Hansen, EM y Olesen, JE.** 2008. *Apera spica-venti* population dynamics and impact on crop yield as affected by tillage, crop rotation, location and herbicide programmes. *Weed Research* 48: 48-57.

- Menalled, FD; Gross, KL y Hammond, M.** 2001. Weed aboveground and seedbank community responses to agricultural management systems. *Ecological Applications* 11: 1586-1601.
- Meyer, SE y Allen, PS.** 2009. Predicting seed dormancy loss and germination timing for *Bromus tectorum* in a semi-arid environment using hydrothermal time models. *Seed Science Research* 19: 225-239.
- Meyer, SE; Debaene-Gill, SB y Allen, PS.** 2000. Using hydrothermal time concepts to model seed germination response to temperature, dormancy loss, and priming effects in *Elymus elymoides* 10: 213-223.
- Mistro, DC; Rodrigues, LAD y Schmid, AB.** 2005. A mathematical model for dispersal of an annual plant population with a seed bank. *Ecological Modelling* 188: 52-61.
- Moechnig, MJ; Stoltenberg, DE; Boerboom, CM y Binning, LK.** 2003. Empirical corn yield loss estimation from common lambsquarters (*Chenopodium album*) and giant foxtail (*Setaria faberi*) in mixed communities. *Weed Science* 51: 386-393.
- Mohler, CL.** 2004a. Weed life history: identifying vulnerabilities. En: *Ecological Management of Agricultural Weeds* (eds. Liebman, M; Mohler, CL y Staver, CP), 40-98. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Mohler, CL.** 2004b. Mechanical management of weeds. En: *Ecological Management of Agricultural Weeds* (eds. Liebman, M; Mohler, CL y Staver, CP), 139-209. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Mohler, CL.** 2004c. Enhancing the competitive ability of crops. En: *Ecological Management of Agricultural Weeds* (eds. Liebman, M; Mohler, CL y Staver, CP), 269-321. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Mohler, CL.** 2004d. Weed evolution and community structure. En: *Ecological Management of Agricultural Weeds* (eds. Liebman, M; Mohler, CL y Staver, CP), 444-493. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Mohler, CL; Liebman, M y Staver, CP.** 2004. Weed management: the broader context. En: *Ecological Management of Agricultural Weeds* (eds. Liebman, M; Mohler, CL y Staver, CP), 494-518. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Momayyezy, M y Upahyaya, MK.** 2017. Influence of soil moisture stress on vegetative growth and mycorrhizal colonization in hound's tongue (*Cynoglossum officinale*). *Weed Science* 65: 107-114.

- Mullen, JD; Taylor, DB; Fofana, M y Kebe, D.** 2003. Integrating log-run biological and economic considerations into *Striga* management programs. *Agricultural Systems* 76: 787 – 795.
- Munier-Jolain, NM; Chauvel, B y Gasquez, J.** 2002. Long-term modelling of weed control strategies: analysis of threshold-based options for weed species with contrasted competitive abilities. *Weed Research* 42: 107-122.
- Murdoch, AJ; Roberts, EH y Goedert, CO.** 1989. A model for germination responses to alternating temperatures. *Annals of Botany* 63: 97-111.
- Myers, MW; Curran, WS; Van Gessel, MJ; Calvin, DD.** 2004. Predicting weed emergence for eight annual species in the northeastern United States. *Weed Science* 52: 913-919.
- Neve, P; Sadler, J y Powles, SB.** 2004. Multiple herbicide resistance in a glyphosate-resistant rigid ryegrass (*Lolium rigidum*) population. *Weed Science* 52: 920-928.
- Nicolopoulou-Stamati, P; Maipas, S; Kotampasi, C; Stamatis, P y Hens, L.** 2016. Chemical pesticides and human health: the urgent need for a new concept in agriculture. *Frontiers in Public Health* 4: 1-8.
- Norris, RF.** 2007. Weed fecundity: current status and future needs. *Crop protection* 26: 182-188.
- O'Donovan, JT; de St. Remy, EA; O'Sullivan, PA; Dew, DA y Sharma, AK.** 1985. Influence of the relative time of emergence of wild oat (*Avena fatua*) on yield loss of barley (*Hordeum vulgare*) and wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Science* 33: 498-503.
- Ogunnaike, B y Ray H.** 1994. *Process Dynamics, Modeling, and Control*. Oxford University Press, New York. 1260 pp.
- Ohadi, S; Mashhadi, HR; Tavakol-Afshari, R.** 2009. Seasonal changes in germination response of seeds of the winter annual weed littleseed canarygrass (*Phalaris minor*) to light. *Weed Science* 57: 613-619.
- Okayi, HC; Claudius-Cole, AO y Awodoyin, RO.** 2017. Phenology of tick weed (*Cleome viscosa* L.) and its interaction with okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and *Meloidogyne incognita*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection* 50: 389-397.
- Owen, MJ y Powles, SB.** 2010. Glyphosate-resistant rigid ryegrass (*Lolium rigidum*) populations in the western Australian grain belt. *Weed Technology* 24: 44-49.
- Pandey, S y Medd, RW.** 1991. A stochastic dynamic programming framework for weed control decision making: an application to *Avena fatua* L. *Agricultural Economics* 6: 115 – 128.

- Pannell, DJ; Stewart, V; Bennett, A; Monjardino, M; Schmidt, C y Powles, SB.** 2004. RIM: a bioeconomic model for integrated weed management of *Lolium rigidum* in Western Australia. *Agricultural Systems* 79: 305-325.
- Parsons, DJ; Benjamin, LR; Clarke, J; Ginsburg, D; Mayes, A; Milne, AE y Wilkinson, DJ.** 2009. Weed Manager – A model-based decision support system for weed management in arable crops. *Computer and Electronics in Agriculture* 65: 155-167.
- Pedrerros, A.** 2001. Efecto de avenilla (*Avena fatua* L.) y ballica (*Lolium multiflorum* Lam.) en el rendimiento de trigo en dos áreas agroecológicas. *Agricultura Técnica (Chile)* 61(3): 294-305.
- Pérez, A y Kogan, M.** 2003. Glyphosate-resistant *Lolium multiflorum* in Chilean orchards. *Weed Research* 43: 12-19.
- Pérez-Jones, A; Park, KW; Colquhoun, J; Mallory-Smith, C y Shaner, D.** 2005. Identification of glyphosate-resistant Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) in Oregon. *Weed Science* 53: 775-779.
- Pimentel, D.** 2005. Environmental and economics costs of the application of pesticides primarily in the United States. *Environment, Development and Sustainability* 7: 229-252.
- Pretty, JN; Brett, C; Gee, D; Hine, RE; Mason, CF; Morison, JIL; Raven, H; Rayment, MD y van der Bijl, G.** 2000. An assessment of the total external costs of UK agriculture. *Agricultural Systems* 65: 113-136.
- Pretty, J; Brett, C; Gee, D; Hine, R; Mason, C; Morison, J; Rayment, M; van der Bijl, G y Dobbs, T.** 2001. Policy challenges and priorities for internalizing the externalities of modern agriculture. *Journal of Environmental Planning and Management* 44: 263-283.
- Prosser, RS; Anderson, JC; Hanson, ML; Solomon, KR y Sibley, PK.** 2016. Indirect effects of herbicides on biota in terrestrial edge-of-field habitats: a critical review of the literature. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 232: 59-72.
- Puricelli, E y Tuesca, D.** 2005. Efecto del sistema de labranza sobre la dinámica de la comunidad de malezas en trigo y en barbechos de secuencias de cultivos resistentes a glifosato. *Agriscientia* 22: 69-78.
- Puricelli, E; Faccini, D; Orioli, G y Sabbatini, MR.** 2004. *Anoda cristata* control with glyphosate in narrow- and wide-row soybean. *Weed Research* 44: 150-156.
- Puricelli, E; Orioli, G y Sabbatini, MR.** 2002. Demography of *Anoda cristata* in wide- and narrow-row soybean. *Weed Research* 42: 456-463.

- Puricelli, E; Vitta, JI; Sabbatini, MR y Orioli, G.** 2007. Modeling population dynamics of *Anoda cristata* in a glyphosate-resistant soybean crop under different management systems. *Agriscientia* 24(1): 1-9.
- Ramos, MB y Campo, AM.** 2008. Caracterización de estados de tiempo en el suroeste bonaerense, Argentina. *Revista de Geografía Norte Grande* 40: 85-97.
- Rees, NE; Quimby, PC y Mullin, BH.** 1996. Section I: Biological control of weeds. En: *Biological Control of Weeds in the west* (eds. Rees, NE; Quimby, PC; Piper, GL; Coombs, EM; Turner, CE; Spencer, NR y Knutson, LV), 3-23. Color World Printers, Bozeman (USA).
- Reeves, TG.** 1976. Effect of annual ryegrass (*Lolium rigidum* Gaud.) on yield of wheat. *Weed Research* 16: 57-63.
- Ribeiro, JEMM; Pieterse, PJ y Famba, SI.** 2017. Vegetative growth of *Amaranthus hybridus* and *Amaranthus tricolor* under different watering regimes in different seasons in southern Mozambique. *South African Journal of Plant and Soil* 1-10.
- Roberts, EH.** 1988. Temperature and seed germination. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 42: 109-132.
- Rowse, HR y Finch-Savage, WE.** 2003. Hydrothermal threshold models can describe the germination response of carrot (*Daucus carota*) and onion (*Allium cepa*) seed populations across both sub- and supra-optimal temperatures. *New Phytologist* 158: 101-108.
- Ruisi, P; Frangipane, B; Amato, G; Badagliacca, G; Di Miceli, G; Plaia, A y Giambalvo, D.** 2015. Weed seedbank size and composition in a long-term tillage and crop sequence experiment. *Weed Research* 55: 320-328.
- Rydahl, P.** 2004. A Danish decision support system for integrated management of weeds. *Aspects of Applied Biology* 72: 43-53.
- Rykiel, EJ.** 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90: 229-244.
- Sabbatini, MR; Irigoyen, JH y Vernavá, MN.** 2004. Parte VIII, Capítulo 11. Estrategias para el manejo integrado de malezas: problemática, resistencia a herbicidas y aportes de la biotecnología. En: *Biotecnología y Mejoramiento Vegetal*, Eds: V. Echenique, C. Rubinstein y L. Mroginski. Editorial INTA. Pp 343-353.
- Salas, RA; Burgos, NR; Mauromoustakos, A; Lassiter, RB, Scott, RC y Alcober, EA.** 2013. Resistance to ACCase and ALS inhibitors in *Lolium perenne* ssp. *multiflorum* in the United States. *Journal of Crop and Weed* 9: 168-183.
- Salas, RA; Dayan, FE; Pan, Z; Watson, SB; Dickson, JW; Scott, RC y Burgos, NR.** 2012. EPSPS gene amplification in glyphosate-resistant Italian ryegrass (*Lolium*

perenne ssp. *multiflorum*) from Arkansas. *Pest Management Science* 68: 1223-1230.

- Salehian, H; Jamshidi, M; Karamzade, H y Modaresi, H.** 2013. An investigation of the phenology some weed species. *International Journal of Agronomy and Plant Production* 4: 1511-1520.
- Sasal, MC; Demonte, L; Cislighi, A; Gabioud, EA; Oszust, JD; Wilson, MG; Michlig, N; Beldoménico, HR y Repetti, MR.** 2015. Glyphosate loss by runoff and its relationship with phosphorus fertilization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 63: 4444-4448.
- Seefeldt, SS; Kidwell, KK y Waller, JE.** 2002. Base growth temperatures, germination rates and growth response of contemporary spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars from the US Pacific Northwest. *Field Crops Research* 75: 47-52.
- Sells, JE.** 1995. Optimising weed management using stochastic dynamic programming to take account of uncertain herbicide performance. *Agricultural Systems* 48: 271 – 296.
- Sester, M; Delanoy, M; Colbach, N y Darmency, H.** 2004. Crop and density effects on weed beet growth and reproduction. *Weed Research* 44: 50-59.
- Shea, K; Sheppard, A y Woodburn, T.** 2006. Seasonal life-history models for the integrated management of the invasive weed nodding thistle *Carduus nutans* in Australia. *Journal of Applied Ecology* 43: 517-526.
- Sohrabi, S; Gherekhloo, J; Kamkar, B; Ghanbari, A y Mohassel, MHR.** 2016. The phenology and seed production of *Cucumis melo* as an invasive weed in northern Iran. *Australian Journal of Botany* 64: 227-234.
- Steadman, KJ; Bignell, GP y Ellery, AJ.** 2003a. Field assessment of thermal after-ripening time for dormancy release prediction in *Lolium rigidum* seeds. *Weed Research* 43: 458-465.
- Steadman, KJ; Crawford, AD y Gallagher, RS.** 2003b. Dormancy release in *Lolium rigidum* seeds is a function of thermal after-ripening time and seed water content. *Functional Plant Biology* 30: 345-352.
- Steinmaus, SJ; Prather, TS y Holt, JS.** 2000. Estimation of base temperature for nine weed species. *Journal of Experimental Botany* 51: 275-286.
- Sutherland, S.** 2004. What makes a weed a weed: life history traits of native and exotic plants in the USA. *Oecologia* 141: 24-39.
- Székács, A; Mörtl, M y Darvas, B.** 2015. Monitoring pesticide residues in surface and ground water in Hungary: surveys in 1990-2015. *Journal of Chemistry – Hindawi Publishing Corporation* 2015: 1-15.

- Taberner, A.** 1996. Biología de *Lolium rigidum* Gaud. como planta infestante del cultivo de cebada. Aplicación al establecimiento de métodos de control. Tesis doctoral. Universitat de Lleida, España.
- Tardif, FJ; Holtum, JAM y Powles, SB.** 1993. Occurrence of a herbicide-resistant acetyl-coenzyme A carboxylase mutant in annual ryegrass (*Lolium rigidum*) selected by sethoxydim. *Planta* 190: 176-181.
- Terrell, E.** 1968. A taxonomic revision of the genus *Lolium*. Technical Bulletin No 1392. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture. U.S. Government Printing Office, Washington DC. 73 pp.
- Thorogood, D y Hayward, MD.** 1991. The genetic control of self-compatibility in an imbred line of *Lolium perenne* L. *Heredity* 67: 175-181.
- Tomer, V; Sangha, JK y Ramya, HG.** 2015. Pesticide: an appraisal on human health implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India – Section B* 85:451-463.
- Tongo, I y Ezemonye, L.** 2015. Human health risks associated with residual pesticide levels in edible tissues of slaughtered cattle in Benin City, Southern Nigeria. *Toxicology Reports* 2: 1117-1135.
- Torra, J; Cirujeda, A; Recasens, J; Taberner, A y Powles, SB.** 2010. PIM (Poppy Integrated Management): a bio-economic decision support model for the management of *Papaver rhoeas* in rain-fed cropping systems. *Weed Research* 50, 127 – 139.
- Torra, J; González-Andújar, JL y Recasens, J.** 2008. Modelling the population dynamics of *Papaver rhoeas* under various weed management systems in a Mediterranean climate. *Weed Research* 48: 136-146.
- Tucker, KP; Morgan, GD; Senseman, SA; Miller, TD y Baumann, PA.** 2006. Identification, distribution, and control of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) ecotypes with varying levels of sensitivity to triasulfuron in Texas. *Weed Technology* 20: 745-750.
- Tuesca, D y Puricelli, E.** 2001. Análisis de los cambios en las comunidades de malezas asociados al sistema de labranza y al uso continuo de glifosato. En: Díaz Rossello, R. (Ed.). Siembra directa en el Cono Sur. PROCISUR, Montevideo, 450 pp.
- Tungate, KD; Burton, MG; Susko, DJ; Sermons, SM y Ruffy, TW.** 2006. Altered weed reproduction and maternal effects under low-nitrogen fertility. *Weed Science* 54: 847-853.

- Tungate, KD; Susko, DJ y Ruffy, TW.** 2002. Reproduction and offspring competitiveness of *Senna obtusifolia* are influenced by nutrient availability. *New Phytologist* 154: 661-669.
- US EPA Pesticide Fact Sheets.** <http://www.epa.gov/pesticides> Último acceso: 22 de diciembre de 2017.
- Vandana, S y Keshav, S.** 2016. Herbicides and earthworm population. *International Journal of Technology* 6: 31-48.
- Vazan, S; Oveisi, M y Baziar, S.** 2011. Efficiency of mesosulfuron-methyl and clodinafop-propargyl dose for the control of *Lolium perenne* in wheat. *Crop Protection* 30: 592-597.
- Vidotto, F; Ferrero, A y Ducco, G.** 2001. A mathematical model to predict the population dynamics of *Oryza sativa* var. *sylvatica*. *Weed Research* 41: 407-420.
- Vigna, MR; López, RL y Gigón, R.** 2008. Evaluación de herbicidas sobre el control de *Lolium multiflorum* en diferentes ambientes del SO de Buenos Aires. *VII Congreso Nacional de Trigo, V Simposio Nacional de Cereales de Siembra Otoño-invernal y I Encuentro del Mercosur*. Santa Rosa, La Pampa, del 2 al 4 de julio de 2008.
- Vila-Aiub, MM; Neve, P y Powles, SB.** 2005. Resistance cost of a cytochrome P450 herbicide metabolism mechanism but not an ACCase target site mutation in a multiple resistant *Lolium rigidum* population. *New Phytologist* 167: 787-796.
- Vila-Aiub, MM; Neve, P y Powles, SB.** 2009. Evidence for an ecological cost of enhanced herbicide metabolism in *Lolium rigidum*. *Journal of Ecology* 97: 772-780.
- Vleeshouwers, LM y Kropff, MJ.** 2000. Modelling field emergence patterns in arable weeds. *New Phytologist* 148: 445-457.
- Wallinga, J.** 1997. Analysis of the rational long-term herbicide use: evidence for herbicide efficacy and critical weed kill rate as key factors. *Agricultural Systems* 56(3): 323 – 340.
- Wang, H; Liu, Y; Li, J; Lin, M y Hu, X.** 2016. Biodegradation of atrazine by *Arthrobacter* sp. C3, isolated from the herbicide-contaminated corn field. *International Journal of Environmental Science and Technology* 13: 257-262.
- Wanic, M; Jastrzebska, M; Kostrzevska, MK y Treder, K.** 2013. Competition between spring barley (*Hordeum vulgare* L.) and Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) under different water supply conditions. *Acta Agrobotanica* 66: 73-80.

- Washitani, I.** 1987. A convenient screening test system and a model for thermal germination responses of wild plant seeds: behaviour of model and real seeds in the system. *Plant, Cell and Environment* 10: 587-598.
- Weaver, SE; Kropff, MJ y Cousens, R.** 1993. A simulation model of *Avena fatua* L. (wild oat) growth and development. *Annals of Applied Biology* 122: 537-554.
- Wiles, LJ; King, RP; Schweizer, EE; Lybecker, DW y Swinton, SM.** 1996. GWM: General Weed Management model. *Agricultural Systems* 50: 355 – 376.
- Wilson, BJ y Wright, KJ.** 1990. Predicting the growth and competitive effects of annual weeds in wheat. *Weed Research* 30: 201-211.
- Wilson, BJ; Cousens, R y Wright, KJ.** 1990. The response of spring barley and winter wheat to *Avena fatua* population density. *Annals of Applied Biology* 116: 601-609.
- Winston, PW y Bates, DH.** 1960. Saturated solutions for the control of humidity in biological research. *Ecology* 41: 232-237.
- Yan, W y Wallace, DH.** 1998. Simulation and prediction for five crops based on photoperiod x temperature interaction. *Annals of Botany* 81: 705-716.
- Yannicari, M; Istilart, C; Giménez, DO y Castro, AM.** 2012. Glyphosate resistance in perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) from Argentina. *Crop Protection* 32: 12-16.
- Yannicari, M; Istilart, C; Giménez, DO y Castro, AM.** 2015. Inheritance of glyphosate resistance in *Lolium perenne* and hybrids with *Lolium multiflorum*. *Crop Protection* 71: 72-78.
- Yannicari, ME; Istilart, CM y Giménez, OD.** 2009. Evaluación de la resistencia a glifosato de una población de *Lolium perenne* del sur de la provincial de Buenos Aires. *XIX Congreso de la Asociación Latinoamericana de Malezas*. Lisboa, Portugal, del 10 al 13 de noviembre de 2009.
- Yu, Q; Cairns, A y Powles, S.** 2007. Glyphosate, paraquat and ACCase multiple herbicide resistance evolved in a *Lolium rigidum* biotype. *Planta* 225: 499-513.
- Yu, Q; Han, H; Nguyen, L; Forster, JW y Powles, SB.** 2009. Paraquat resistance in a *Lolium rigidum* population is governed by one major nuclear gene. *Theoretical and Applied Genetics* 118: 1601-1608.
- Zadoks, JC; Chang, TT y Konzak, CF.** 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14: 415-421.

APÉNDICE

VARIABLES Y PARÁMETROS

Símbolo	Nombre
a	Máxima pérdida potencial de rinde cuando la D tiende a infinito
ap	Costo de una aplicación terrestre de herbicidas
b	Valor de i cuando $RT = 0$
B	Beneficio económico
Ba	Toxicidad en artrópodos benéficos
$big_{t,h}$	Total de aplicaciones del herbicida h realizadas durante un período de $(nsh_{2h} - nsh_{1h})$ días
$bigM$	Constante big M
c	Tasa a la que i decrece cuando RT aumenta
C	Toxicidad crónica
Cap	Costo de la aplicación de herbicidas
CM	Factor de conversión monetaria
CMD	Costo externo promedio por unidad de superficie
$coefEIQ$	Coeficiente del EIQ
$Cost$	Costo de compra de herbicidas
$costh_h$	Costo de compra del herbicida h
D	Número de plantas por unidad de superficie
D_t	Densidad de plantas de maleza en el momento t
Da	Toxicidad en aves
Dec	Día de emergencia del cultivo
Des	Día de siembra del cultivo
DF	Densidad de la maleza al final de la temporada
DM	Número de plantas maduras por unidad de superficie
$Dosis$	Dosis de aplicación a campo de un pesticida
DT	Toxicidad dermal
E_t	Número de plántulas emergidas el día t
Es	Número de espigas por unidad de superficie
EA	Efectos sobre el aplicador
EAb	Efectos sobre abejas
EAv	Efectos sobre aves
EC	Efectos sobre quien cosecha

<i>ECAS</i>	Contaminación de aguas subterráneas
<i>ECon</i>	Efectos sobre el consumidor
<i>EIB</i>	Efectos sobre insectos benéficos
<i>EIQ</i>	Cociente de impacto ambiental
<i>EMt_{t,h}</i>	Plántulas de maleza emergidas el día <i>t</i> eliminadas por la aplicación del herbicida <i>h</i>
<i>EOAc</i>	Efectos sobre organismos acuáticos
<i>EP</i>	Promedio de espigas por planta de maleza
<i>Ett_t</i>	Plántulas de maleza emergidas el día <i>t</i> que sobreviven y afectan el rinde del cultivo
<i>Ext</i>	Costo ambiental de la aplicación de herbicidas
<i>f</i>	Número de semillas producido por una planta aislada
<i>F</i>	Toxicidad en peces
<i>fe</i>	Número de semillas producido por una espiga aislada
Φ	Integral de probabilidad de la distribución normal
<i>h</i>	Herbicida
<i>hns</i>	Herbicida no selectivo
<i>hs</i>	Herbicida selectivo
<i>HR</i>	Humedad relativa
<i>i</i>	Porcentaje de pérdida de rinde por planta de maleza por unidad de superficie
<i>Inc</i>	Ganancia bruta
<i>l</i>	Proporción de semillas perdidas
<i>L</i>	Potencial de lixiviación
<i>M_t</i>	Número de plántulas eliminadas por operaciones de control el día <i>t</i>
<i>Mth_{t,h}</i>	Mortalidad diaria de plántulas de maleza debida al herbicida <i>h</i>
μ	Media poblacional
<i>ns</i>	Período de susceptibilidad del cultivo a los herbicidas
<i>nsh1_h</i>	Día de comienzo de la susceptibilidad de la maleza al herbicida <i>h</i>
<i>nsh2_h</i>	Día de finalización de la susceptibilidad de la maleza al herbicida <i>h</i>
<i>p</i>	Penalización de la producción de semillas
<i>P</i>	Vida media de los residuos del pesticida en la superficie de la planta
<i>pc</i>	Precio del cultivo
<i>PEA</i>	Cuantificación Ambiental de Pesticidas
<i>PEA_h</i>	Costo externo de una aplicación del herbicida <i>h</i>
<i>R</i>	Potencial de pérdidas desde la superficie

<i>RCME</i>	Raíz cuadrada media de error
<i>Rep</i>	Penalización por semillas de maleza producidas
<i>rootS</i>	Raíz cuadrada del número de semillas producido por unidad de superficie
<i>RPIB</i>	PIB promedio de los países de referencia
<i>RT_t</i>	Intervalo de tiempo entre la emergencia de la maleza y del cultivo
<i>S</i>	Número de semillas producidas por unidad de superficie
σ	Desvío poblacional
<i>SR</i>	Lluvia total de semillas
σ_{Tb}	Desvío de la temperatura media base
σ_{Tc}	Desvío de la temperatura media máxima
<i>Su</i>	Vida media del pesticida en el suelo
<i>sup</i>	Área requerida por una planta para producir <i>f</i> semillas
<i>supe</i>	Área requerida por una espiga para producir <i>fe</i> semillas
<i>SY</i>	Modo de acción del pesticida
<i>T</i>	Temperatura ambiente
<i>t</i>	Tiempo
<i>T_b</i>	Temperatura base para la germinación
<i>T_{b50}</i>	Temperatura media base
<i>T_{bAR}</i>	Temperatura base de postmaduración
<i>T_{b(g)}</i>	Temperatura base para la germinación de la fracción <i>g</i> de la población de semillas
<i>tc</i>	Día a partir del cual no se pueden realizar operaciones de control
<i>T_c</i>	Temperatura máxima para la germinación
<i>T_{c50}</i>	Temperatura media máxima
<i>T_{c(g)}</i>	Temperatura máxima para la germinación de la fracción <i>g</i> de la población de semillas
<i>TDE</i>	Equivalente de densidad y tiempo
<i>TDE_t</i>	Equivalente de densidad y tiempo diario
<i>TDEtot</i>	<i>TDE</i> total
<i>Tec</i>	Período de tiempo entre la siembra del cultivo y su emergencia
<i>Tem_t</i>	Día de emergencia de la maleza
<i>Tm_t</i>	Temperatura media diaria del día <i>t</i>
<i>TT_x</i>	Tiempo térmico acumulado para alcanzar el estadio fenológico <i>x</i>
θ_1	Tiempo térmico de germinación en el rango de temperaturas subóptimas
θ_2	Tiempo térmico de germinación en el rango de temperaturas supraóptimas

θ_{AR}	Tiempo térmico de postmaduración acumulado
t_g	Tiempo de germinación de la fracción g de la población de semillas
TG_g	Tasa de germinación de la fracción g de la población de semillas
T_o	Temperatura óptima para la germinación
UI	Temperatura umbral inferior de crecimiento
y	Rinde final del cultivo
$yh_{t,h}$	Variable binaria que indica si el herbicida h se aplica o no el día t
y_L	Pérdida de rinde de un cultivo
y_{obs}	Valores observados
y_{sim}	Valores simulados
y_{wf}	Rinde del cultivo libre de malezas
Z	Toxicidad en abejas
