

## Simulación de Manejo Integrado de Malezas: Sistema *Euphorbia davidii* – Soja

Franco A. Molinari<sup>1,2</sup>, Aníbal M. Blanco<sup>3</sup>, Federico R. Núñez Fré<sup>4</sup>, Víctor F. Juan<sup>4</sup>,  
Guillermo R. Chantre<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, San Andrés 800, Bahía Blanca (8000), Argentina. gchantre@criba.edu.ar

<sup>2</sup> CERZOS-UNS, CONICET-CCT Bahía Blanca, Camino La Carrindanga Km 7, Bahía Blanca (B8000FWB), Argentina. franco.molinari@uns.edu.ar

<sup>3</sup> Planta Piloto de Ingeniería Química – PLAPIQUI (Universidad Nacional del Sur-CONICET) Bahía Blanca, Buenos Aires (8000), Argentina. ablanco@plapiqui.edu.ar

<sup>4</sup> Facultad de Agronomía, Universidad Nacional Del Centro de La Provincia de Buenos Aires (U.N.C.P.B.A), Av. República de Italia N°780, Azul (7300), Provincia de Buenos Aires, Argentina. fronu@hotmail.com, vjuan@faa.unicen.edu.ar

**Resumen.** Se presenta una aplicación de un modelo de simulación cultivo-maleza que permite comparar y evaluar estrategias de Manejo Integrado de Malezas. Específicamente el modelo fue parametrizado para el cultivo de soja en competencia con *Euphorbia davidii*. Se utilizó la información demográfica de la maleza y del cultivo relevada a campo en la zona centro de la provincia de Buenos Aires, a lo largo de 2 ciclos de cultivo (2011/2012 y 2013/2014). El modelo se sometió a un proceso de calibración y posterior validación con 70 y 30% de las observaciones respectivamente (N=37). Se generaron 2 casos anuales con el objetivo de demostrar las prestaciones del modelo y se comparó el efecto de diversas estrategias de manejo, evaluando rendimiento, competencia, resultado económico e impacto ambiental. En uno de los casos analizados se observa que las medidas de manejo cultural podrían disminuir 46% la competencia interespecifica y 40% la producción de semillas, aumentando 6% el rendimiento esperado y 44 US\$.ha<sup>-1</sup> el margen bruto, para niveles similares de impacto ambiental.

**Palabras clave:** manejo de malezas, dinámica poblacional, modelo de simulación, margen bruto, impacto ambiental, toma de decisiones.

### 1 Introducción

Las malezas son una de las principales causas de pérdida de rendimiento en cultivos desde los comienzos de la agricultura. Actualmente, los métodos de control basados en herbicidas desempeñan un rol fundamental en la maximización de la productividad de los agroecosistemas en el corto plazo. Sin embargo, su uso ininterrumpido trae aparejado un consabido riesgo de impacto socio-ambiental. En este contexto la implementación conjunta de métodos preventivos (legales, culturales) y curativos (químicos, mecánicos, físicos y biológicos) se ha propuesto como un camino hacia la mitigación de externalidades (contaminación de suelos y aguas, pérdida de biodiversidad, ecotoxicidad, etc.). Por lo tanto, desde un punto de vista estratégico, un programa de Manejo

Integrado de Malezas (MIM) se debe basar en la combinación de métodos preventivos y curativos aplicando principios basados en el conocimiento. La utilización de medidas culturales para el manejo de malezas ha demostrado tener la capacidad de aumentar la habilidad competitiva de los cultivos, disminuyendo la dependencia sobre los herbicidas (Andrew et al., 2015). Sin embargo en Argentina la utilización de tácticas de manejo integrado es muy incipiente (Scursoni et al., 2019).

La cuantificación del costo/beneficio de las diferentes estrategias de MIM no resulta sencilla debido a la gran cantidad de información requerida y a la dificultad de sistematización de la misma para su implementación en un marco decisorio apropiado. Los modelos de simulación proporcionan una plataforma idónea para sistematizar este tipo de análisis, como lo demuestran numerosos antecedentes a nivel internacional (Bagavathiannan et al., 2020; Pannell et al., 2004).

Molinari et al., (2020) propusieron un modelo de simulación para asistir en la toma de decisiones relacionada con el MIM. El modelo se desarrolló en colaboración con técnicos y extensionistas de INTA y fue concebido como una herramienta flexible y adaptable a diversos sistemas de producción agrícola poseyendo un mayor nivel de detalle que otros modelos similares.

Dicho modelo emplea información biológica y agronómica de la maleza y del cultivo, registros meteorológicos diarios y datos relacionados con las medidas de manejo químicas, mecánicas y culturales. A partir de la información ingresada, proporciona un seguimiento diario de las variables demográficas de la maleza y del cultivo, y permite simular su interacción competitiva. Al finalizar cada campaña agrícola es posible comparar variables agronómicas de interés, como el resultado económico y el impacto ambiental de las medidas de manejo simuladas.

En este trabajo, dicho modelo se extendió para mejorar la evaluación medioambiental de las estrategias de manejo de malezas. Se amplió la cuantificación del impacto ambiental mediante el índice T, calculando el riesgo de erosión del suelo asociado a las labores mecánicas de control de malezas (Ferraro et al., 2003). También se agregó el índice P (Ferraro et al., 2003) para cuantificar del impacto ambiental de los pesticidas, complementando así al índice EIQ incorporado previamente al modelo.

El modelo descripto se aplica en este estudio al sistema agrícola *Euphorbia davidii* en competencia con soja en el centro de la provincia de Buenos Aires. *Euphorbia davidii* pertenece a la familia *Euphorbiaceae* Juss. representada por especies de importante valor económico y otras que afectan a los cultivos comportándose como malezas. En Argentina se han citado cuatro especies que se destacan como malezas importantes en cultivos de verano (*Euphorbia serpens*, *Euphorbia heterophylla*, *Euphorbia dentata* y *Euphorbia davidii*), con gran cantidad de características en común, al punto de ser confundidas, lo cual dificulta el intercambio de información sobre aspectos de biología y demografía de la especie, que podrían ser utilizados para diseñar estrategias de manejo (Marchessi et al., 2011). En agrosistemas del centro de la provincia de Buenos Aires dicha especie es considerada una maleza altamente competitiva y de difícil control. En general, se observa una estrecha relación entre el estado fenológico, la dosis y la eficacia del control (Istilart et al., 2014; Núñez Fré et al., 2018). Según Núñez Fré et al. (2018), bajo condiciones semicontroladas se alcanzan pérdidas de rendimiento de 35-45 % en el cultivo de soja a densidades mayores a 100 individuos m<sup>-2</sup> de *E. davidii*.

Análogamente, experimentos realizados a campo en la zona de estudio indican pérdidas de rendimiento del 30% con 100 individuos  $m^{-2}$ , observándose pérdidas significativas desde 8-10 individuos  $m^{-2}$  (Juan et al., 2003).

Este artículo tiene como objetivos: (i) evaluar las capacidades de adaptación del modelo propuesto por Molinari et al. (2020) al sistema soja/*E. davidii* en la región centro-sur bonaerense; (ii) generar escenarios para comparar el efecto de diferentes estrategias de manejo; (iii) evaluar beneficios/debilidades del modelo para su futura adaptación a otros agroecosistemas.

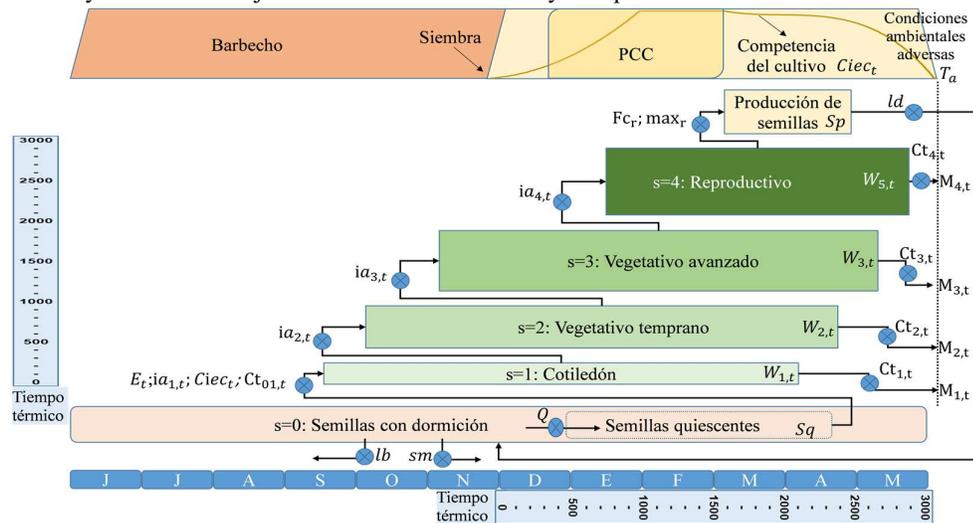
## 2 Materiales y métodos, parametrización

### 2.1 Descripción general

La metodología de modelado adoptada se ha reportado anteriormente (Molinari et al., 2020, 2018). Algunos procesos fueron modificados para una mejor adaptación al sistema *E. davidii* en competencia con el cultivo de soja en la región central de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Las modificaciones introducidas se detallan a continuación en las secciones correspondientes.

### 2.2 Diagrama, variables y parámetros del modelo

En la fig. 1 se presenta un diagrama general del modelo de simulación propuesto, considerando un ciclo anual de competencia maleza-cultivo. Las variables del modelo se resumen en la Tabla 1. Los parámetros demográficos de *E. davidii* y el cultivo de soja se detallan en las Tablas 2 y 3 respectivamente.



**Fig. 1.** Diagrama general ilustrando los principales componentes del modelo de simulación, considerando la maleza *E. davidii* en competencia con el cultivo de soja, a lo largo de una campaña

agrícola (ver Tablas 1-3 para descripción de las variables y parámetros). Sobre la izquierda se observa una escala de tiempo-térmico utilizada para guiar el desarrollo de la maleza. En la base se observan escalas de tiempo-térmico y cronológico utilizadas para el crecimiento y desarrollo del cultivo. Sobre la parte superior se observa una clara distinción entre los momentos de barbecho y cultivo. En el ciclo de cultivo se detallan momento de siembra, período crítico de competencia (PCC) e índice de competencia interespecífica del cultivo ( $Cie_{ct}$ ). El ciclo de vida de la maleza se representa de una manera simple definiendo los estados más representativos ( $W_{s,t}$ ), siendo  $s=0$ : Banco de semillas;  $s=1$ : Cotiledonal (cotiledones);  $s=2$ : Vegetativo temprano (2-4 hojas verdaderas);  $s=2$ : Vegetativo avanzado (6 hojas verdaderas a ramificación);  $s=3$ : Reproductivo (floración y fructificación).

**Tabla 1.** Variables del modelo de simulación.

Variables	Descripción	Unidades
t	Día juliano	Día jul.
y	Año	Año
s	Estado fenológico de la maleza	-
$W_{s,t}$	Densidad acumulada de individuos en s y t	(i.m <sup>-2</sup> )
$I_{s,t}$	Cohorte diaria de individuos que ingresan en s y t	(i.m <sup>-2</sup> )
$O_{s,t}$	Cohorte diaria de individuos que egresan de s, en t	(i.m <sup>-2</sup> )
Sq	Semillas quiescentes (sin dormición)	(s.m <sup>-2</sup> )
Sp <sub>y</sub>	Producción total de semillas en el año y	(s.m <sup>-2</sup> )
$W_{k,s,t}$	Densidad ponderada de malezas entre s y ns en t	-
$Cie_{ct}$	Índice de competencia interespecífica del cultivo, en t	-
r	Grupo de cohortes reproductivas	-
$W_r$	Densidad de la maleza en r	(i.m <sup>-2</sup> )
Yld	Rendimiento esperado del cultivo (como proporción del rendimiento libre de malezas)	-
WC	Competencia interespecífica de la maleza sobre el cultivo	-
$Ct_{s,t}$	Tasa de mortalidad por control en s y t	-
$M_{stress_{s,t}}$	Número de individuos afectados por cond. amb. adversas en s y t	(i.m <sup>-2</sup> )
$Cr_{01,t}$	Tasa de mortalidad sobre el estado de pre-emergencia por control residual en t	-

**Tabla 2.** Parámetros de *Euphorbia davidii*. TT= tiempo térmico. CE= conocimiento experto.

Par.	Descripción	Valor	Unidad	Fuente
ns	Número de estados fenológicos (s)	4	-	(Nuñez Fré, 2019)
$T_b$	Temp. base cardinal para la acumulación de TT	8	°C	(Marchessi et al., 2011)
$Th_1$	TT requerido por una cohorte para pasar de $s=1$ a 2.	192	°Cd	(Nuñez Fré, 2019)
$Th_2$	TT requerido por una cohorte para pasar $s= 2$ a 3.	300	°Cd	(Nuñez Fré, 2019)
$Th_3$	TT requerido por una cohorte para pasar de $s= 3$ a 4.	700	°Cd	(Nuñez Fré, 2019)
K	Capacidad de porte del agroecosistema.	150	i.m <sup>-2</sup>	(Nuñez Fré, 2019)
$f_1$	Factor de competencia para $s=1$ .	0,1	-	(Nuñez Fré, 2019)
$f_2$	Factor de competencia para $s=2$ .	0,5	-	(Nuñez Fré, 2019)
$f_3$	Factor de competencia para $s=3$ .	0,75	-	(Nuñez Fré, 2019)
$f_4$	Factor de competencia para $s=4$ .	1	-	(Nuñez Fré, 2019)
nr	Número de grupos de cohortes reproductivas	1	.	(Nuñez Fré, 2019)
$t_a$	Día juliano en que se producen las condiciones ambientales adversas	$1 < T < 40$	func. de temp.	CE
$mstress_1$	Tasa de mortalidad por cond. amb. adversas, en $s=1$	1	-	CE
$mstress_2$	Tasa de mortalidad por cond. amb. adversas, en $s=2$	0,6	-	CE
$mstress_3$	Tasa de mortalidad por cond. amb. adversas, en $s=3$	0,4	-	CE
$mstress_4$	Tasa de mortalidad por cond. amb. adversas, en $s=4$	0	-	CE

**Tabla 3.** Parámetros del cultivo de soja (siembra standard y siembra tardía). CE= conocimiento experto. \* = adaptado de.

Parámetro	Descripción	Valor		Unidad	Fuente
		Standard	Tardía		
G1	TT acumulado al momento de cambiar de función	1325	780	°Cd	DSSAT*
G2	TT acumulado requerido para alcanzar la madurez fisiológica del cultivo	2750	1900	°Cd	DSSAT*
PCC	Período crítico de competencia del cultivo	450-1730	450-1120	°Cd	DSSAT*
Sf <sub>i</sub>	Susceptibilidad del cultivo entre $0 \leq t < PCC$	1	-	-	CE
Sf <sub>f</sub>	Susceptibilidad del cultivo durante los días t del PCC	5	-	-	CE
Sf <sub>t</sub>	Susceptibilidad del cultivo entre $PCC > t > 365$	1	-	-	CE
LAlhc	Valor de TPLA que representa una situación de alta competencia, para distintas distancias entre hileras a la siembra.	35 cm	0,9	-	CE y (Meira et al., 2019)
		52,5cm	1,5	-	
		70 cm	2,2	-	
Myl	Máxima proporción de pérdida de rendimiento	0.6	-	-	Cal. y Valid.
GY	Rendimiento esperado.	3000	-	Kg.ha <sup>-1</sup>	CE

### 2.3 Información agrometeorológica

Para la simulación de la dinámica poblacional de la maleza y del cultivo, se utilizó información agrometeorológica diaria obtenida de dos fuentes, la Estación Meteorológica Olavarría, dependiente del Servicio Meteorológico Nacional y del Centro Regional de Agrometeorología perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA)<sup>1</sup>, ambas de acceso libre.

### 2.4 Emergencia a campo de *E. davidii*

Para predecir la emergencia diaria a campo de *E. davidii* a lo largo del año, se ajustó un modelo basado en información meteorológica. Para ello se utilizaron datos meteorológicos y la información de emergencia proveniente del seguimiento de la dinámica poblacional reportada en (Nuñez Fré, 2019). Para modelar la emergencia se utilizó la metodología propuesta en Chantre et al. (2018), obteniendo un buen nivel de ajuste entre datos observados y predichos (RMSE=0.05).

Consideramos que, aunque desarrollado con un número pequeño de observaciones, el modelo constituye un buen punto de partida para estimar la emergencia en las simulaciones de la dinámica de la maleza, en tanto no se cuente con nueva información de emergencia a campo que permita mejorar el ajuste y validar sus predicciones.

### 2.5 Dinámica poblacional

La dinámica poblacional de la maleza se simula a través de cohortes diarias. Los individuos de cada cohorte pasan a través de cuatro estados fenológicos dentro del ciclo de

<sup>1</sup> <http://www1.faa.unicen.edu.ar/centro/centroreg.php> (accedido última vez el 3 mayo 2021, en español)

vida, siendo  $s=1$ : Cotiledonar (Cotiledón);  $s=2$ : Vegetativo temprano (2-4 hojas verdaderas);  $s=3$ : Vegetativo avanzado (6 hojas verdaderas a ramificación);  $s=4$ : Reproductivo (floración y fructificación). Para pasar de un estado fenológico al siguiente cada cohorte debe acumular una determinada cantidad de tiempo-térmico ( $Th_s$ ). Al momento de pasar de un estado fenológico al siguiente, cada cohorte se verá afectada por tasas de mortalidad y competencia ( $C_{t,s,t}$ ,  $Cr_{01,t}$ ,  $mstress_i$ ), como se detalla en los trabajos explicativos del modelo (Molinari et al., 2020, 2018). Valores de referencia de estos parámetros se reportan en la Tabla 2.

## 2.6 Competencia intraespecífica

El efecto de la competencia que ejercen los individuos de la maleza entre sí se calculaba mediante una tasa de mortalidad en Molinari et al., (2020). En el presente trabajo fue remplazada por la función:

$$I_{s,t} = \max \left\{ O_{s-1,t} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{Wk_{s,t}}{K} \right) \right]; 0 \right\} \quad \forall t, \forall s \quad (1)$$

donde  $I_{s,t}$  representa la cohorte diaria de individuos que ingresan en  $s$  en el día  $t$ ;  $O_{s-1,t}$  cohorte diaria de individuos que egresan de  $s-1$ , en  $t$ ;  $Wk_{s,t}$  densidad ponderada de la maleza entre  $s$  y  $ns$  en  $t$ ; y  $K$  capacidad de porte del agroecosistema. La relación entre  $Wk_{s,t}$  y  $K$  determina entonces la mortalidad de las cohortes que ingresan al estado  $s$ . La función máximo establece que el ingreso sea nulo cuando la población supera la capacidad de porte. Esta situación, poco común, ocurre únicamente cuando las primeras cohortes son muy abundantes.

## 2.7 Mortalidad poblacional de la maleza

La mortalidad de individuos de *E. davidii* se divide en función de su origen, ya sea antrópica o natural. Respecto a la mortalidad natural, asociada a condiciones ambientales adversas, se generó una nueva aproximación detallada en la siguiente función:

$$\begin{cases} M\_stress_{s,t} = W_{s,t} \cdot mstress_s, & \text{If } Tmin_t < -1 \text{ or } Tmax_t > 40 \\ M\_stress_{s,t} = 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall s, \forall t \quad (2)$$

donde  $M\_stress_{s,t}$  es el número de individuos afectados por condiciones climáticas adversas en  $s$  y  $t$ ,  $mstress_s$  es la tasa de mortalidad por condiciones ambientales adversas en el estado fenológico  $s$ ,  $Tmin_t$  y  $Tmax_t$  son las temperaturas mínima y máxima en el día  $t$  (Tabla 2).

En lo que respecta a la mortalidad antrópica, relacionada al manejo y el control, se mantuvo la aproximación utilizada en versiones anteriores (Molinari et al., 2020, 2018). Los métodos de control utilizados se especifican en la Tabla 4, juntos con los correspondientes parámetros económicos y ambientales asociados.

**Tabla 4.** Detalle de acciones de control utilizadas, valores de toxicidad, Tmam, Tins y Tf, utilizados para el cálculo del índice P y valores de impacto de las herramientas de labranza, Timp, para el cálculo del índice T. Mort. = tasa de mortalidad.

Abreviatura	G+imz	AraD
Método de control/ herbicidas, formulación y dosis	Glifosato (66,2%): 2 L. ha <sup>-1</sup> + imazetapir (10%) LS, 1 L. ha <sup>-1</sup>	Arado de discos
Nombre comercial	Glifosato + Pivot	-
Duración del efecto residual [días]	30	-
Mort. por control residual (C <sub>T01,t</sub> )	1	-
Mort. Para s=1 (C <sub>t1</sub> )	0.99	0,99
Mort. Para s=2 (C <sub>t2</sub> )	0.85	0,99
Mort. Para s=3 (C <sub>t3</sub> )	0.8	0,99
Mort. Para s=4 (C <sub>t4</sub> )	0.29	0,99
Costo (aplicación + producto) [US\$.ha <sup>-1</sup> ]	40	40
EIQ.ha <sup>-1</sup>	22.25	0
Índice P		
Tmam	0.02	0
Tins	1	0
Tf	0.294	0
Índice T		
Timp	0	0,86

Fuente: (Istilar et al., 2014; Juan et al., 2006; Núñez Fré et al., 2015; 'Revista Margenes agropecuarios', 2022; University of Hertfordshire, 2022).

## 2.8 Impacto ambiental

El módulo de impacto ambiental cuantifica y compara el impacto de las diferentes estrategias de manejo a través de tres índices: el Cociente de Impacto Ambiental (Environmental Impact Quotient, EIQ) (Kovach et al., 1992), el índice de pesticidas (P) (Ferraro, 2022; Ferraro et al., 2003) y el índice de labranza (T) (Ferraro et al., 2003). Los índices EIQ y P se utilizan para cuantificar el impacto ambiental asociado al control químico y el índice T para cuantificar el impacto ambiental por erosión del suelo producido por las herramientas de laboreo.

Los valores de EIQ de cada principio activo se obtuvieron de una fuente actualizada (Eshenaur et al., 2019) y el valor de EIQ por hectárea fue calculado según (Kovach et al., 1992) (Tabla 4). Tmam, Tins, Tf y Timp se calcularon a partir de los valores de toxicidad obtenidos de (University of Hertfordshire, 2022).

## 2.9 Evaluación económica

El módulo económico se compone del Margen Bruto (MB), que compara directamente los costos y los ingresos más relevantes, sin tomar en cuenta el costo de oportunidad de la tierra o el valor de arrendamiento. Los parámetros económicos utilizados se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros económicos utilizados en el caso de estudio.

Descripción del parámetro	Valor		Fuente
	Densidad standard	Densidad alta	
Costo de siembra (semilla + siembra + fertilizante + inoculante)	164 US\$.ha <sup>-1</sup>	177 US\$.ha <sup>-1</sup>	('Revista Margenes agropecuarios', 2022)
Precio de venta de granos		370 US\$.tn <sup>-1</sup>	
Cosecha		72 US\$.ha <sup>-1</sup>	
Gastos comercialización		15 % del ingreso bruto	

### 2.10 Producción de semillas

Al finalizar el ciclo de vida de la maleza se calcula la producción de semillas en función de la densidad de individuos que alcanzan el estado reproductivo. Para el cálculo se utiliza la función de la Ec. 3, adaptada de Nuñez Fré (2019).

$$Sp_y = \begin{cases} (-80.37 \cdot \log W_r + 220.6) \cdot \log W_r, & \text{If } (W_r \leq 18) \\ 4870 \cdot \log W_r - 3952, & \text{If } (W_r > 18) \end{cases} \quad \forall r, \forall y \quad (3)$$

donde  $Sp_y$  es la producción de semillas en el año  $y$ , y  $W_r$  es la densidad de individuos en la cohorte reproductiva  $r$ .

## 3 Calibración y validación

### 3.1 Información experimental

Para la correcta estimación del rendimiento esperado ( $Yld$ ), se deben ajustar los parámetros  $a$  y  $k$  de la Ec. 4, para el sistema en estudio (Pannell et al., 2004).

$$Yld = \frac{cs+a}{cs} \cdot \left[ \frac{ca}{(a+ca+(k \cdot WC))} \cdot Myl + (1 - Myl) \right] \quad (4)$$

donde  $Yld$  corresponde al rendimiento esperado del cultivo (como proporción del rendimiento libre de malezas),  $Cs$  es la densidad estándar del cultivo,  $a$  es una constante que depende del cultivo,  $Ca$  es densidad de siembra actual del cultivo,  $k$  es una constante que refleja la competitividad de la maleza sobre el cultivo,  $WC$  es la sumatoria de los efectos competitivos de la maleza sobre el cultivo, al final del ciclo del cultivo, y  $Myl$  es la máxima proporción de pérdida del rendimiento en "alta competencia interespecífica".

En este trabajo los parámetros fueron calculados minimizando la diferencia entre las predicciones y la información experimental reportada en varios trabajos científicos realizados entre 1995 y 2001 (Juan and Saint-André, 1997; Juan et al., 2003, 2002, 2000).

Los experimentos a campo fueron realizados en el partido Azul (36°47'00"S 59°51'00"O), utilizando distintos tipos de manejo agronómico, variedades, momentos de siembra, distanciamiento entre hileras y densidades de siembra. Con respecto a la

maleza *E. davidii* también se cuentan con ensayos de competencia a lo largo de todo el ciclo de vida del cultivo, ensayos de control químico, control mecánico durante barbecho e información sobre el estado fenológico en el momento de control. Adicionalmente, los ensayos reportados en (Juan et al., 2003, 2002, 2000) se repitieron en dos campañas, es decir, dos ciclos de cultivo en competencia con la maleza, por lo tanto cada punto de comparación es el promedio de dos campañas. Los ensayos de (Juan and Saint-André, 1997) en cambio, se realizaron durante una campaña.

### 3.2 Calibración y validación

De los ensayos disponibles (N=37), 70% se usaron para calibración (N=26) y el 30% restante para validación (N=11). Los ensayos utilizados en cada conjunto fueron seleccionados al azar entre el pool de ensayos. Para la calibración, se obtuvieron los valores de  $a$  y  $k$  que minimizan el RMSE entre los Yld observados y los simulados (Excel SOLVER®). Los valores obtenidos fueron  $a=0.0$  y  $k=0.1$  con un RMSE=0.077 (Figura 2 A).

A continuación, se procedió a simular el set de datos de validación y a compararlos con los observados, obteniendo un RMSE=0.085 como se observa en la Figura 2 B.

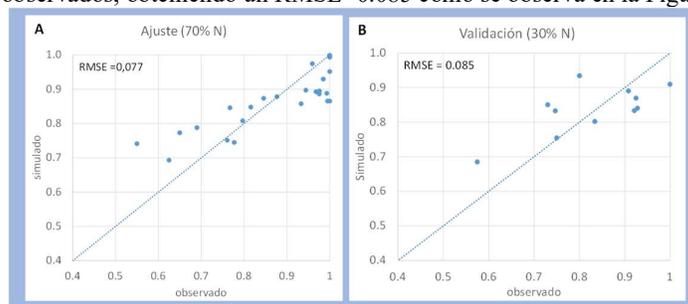


Fig. 2. Calibración (A) y validación (B) de la función de rendimiento esperado Yld.

## 4 Resultados y análisis

### 4.1 Casos de estudio

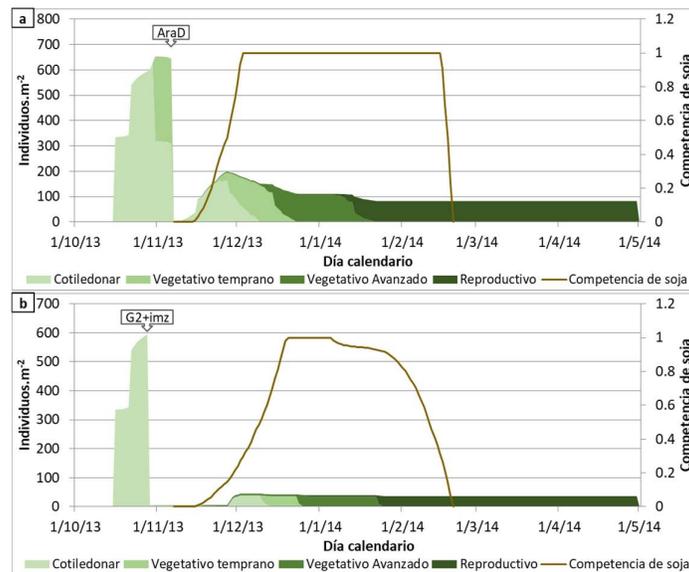
Se generaron casos de estudio con el objetivo de analizar las prestaciones del modelo para el cultivo de soja en competencia con la maleza *E. davidii* en el centro de la provincia de Buenos Aires. Se representaron distintas prácticas de manejo y su impacto el cultivo y la maleza en dos casos de estudio anuales, con 2 sub-casos comparativos en cada uno. En la Tabla 6 se detallan los casos y sub-casos analizados a modo comparativo. En la Tabla 7 se detallan los resultados de las simulaciones de la Figura 3.

**Tabla 6.** Parámetros de entrada para la simulación de los casos anuales, detallando los sub-casos A y B cuando corresponda. Caso I manejo mecánico y cultural. Caso II control químico y manejo cultural.

Descripción	Caso I		Caso II		Unidades
	Sub-caso A	Sub-caso B	Sub-caso A	Sub-caso B	
Semillas quiescentes (Maleza)	1400		1400		s.m <sup>2</sup>
Emergencia	Observada		Observada		-
Densidad de siembra	42	30	42	30	Pl. m <sup>2</sup>
Grupo de madurez	4	3	4		-
Distancia entre hileras	35	35	35	70	cm
Fecha de siembra	7/11/13	20/12/13	7/11/13		d/m/a
Fecha y tipo de control durante barbecho	6/11/13	19/12/13	28/10/13		d/m/a
	Arado de discos		Mezcla no selectivo + residual (G+Imz)		-

**Tabla 7.** Variables de salida del modelo de simulación correspondientes a los casos anuales.

Variable	Caso I		Caso II		Unidades
	Sub-caso A	Sub-caso B	Sub-caso A	Sub-caso B	
EIQ		0		0.002	-
Índice P		0		22.25	-
Índice T		0.6		0.29	-
Producción total de semillas de la maleza (Sp)	5388	598	2237	3667	Sem. m <sup>2</sup>
Competencia de <i>E. davidii</i> sobre el cultivo de soja (WC)	230,06	7,97	35,58	65,41	-
Rendimiento esperado del cultivo (Yld)	78	98	95	89	%
Margen Bruto Anual	455	654	651	607	US\$ ha <sup>-1</sup>



**Fig. 3.** Dinámica poblacional de *E. davidii* mostrando en diferentes tonos de verde la composición relativa de cada estado fenológico, partiendo de una alta infestación de semillas (1.400 semillas quiescentes.m<sup>-2</sup>). Se simulan diferentes métodos de control indicados con una flecha. El cultivo de soja, se representa a través del índice de competencia del cultivo. a) Caso I Sub-caso A y b). Caso II, Sub-caso B.

### *Caso I. Manejo mecánico y cultural.*

Para el caso I se realizaron dos simulaciones utilizando únicamente métodos de manejo de tipo cultural y mecánico, omitiendo el control químico. Específicamente se representa la aplicación de una medida de control mecánico durante el barbecho, combinada con medidas de manejo cultural como son diferentes densidades y fechas de siembra, grupos de madurez y distanciamiento entre hileras del cultivo de soja. Las medidas de manejo utilizadas para cada sub-caso se encuentran detalladas en la Tabla 6. El resultado de las simulaciones se reporta en la Tabla 7 y la Figura 3.

En el sub-caso A se simuló un control mecánico luego de finalizada la emergencia de la primera cohorte y la siembra del cultivo de soja a la correspondiente densidad de siembra y distancia entre hileras.

Puede observarse que las medidas culturales de manejo, si bien ejercieron control sobre algunos individuos, fueron insuficientes para suprimir la mayoría de las nuevas plántulas de *E. davidii* alcanzando unos 80 ind. /m<sup>2</sup> al estado reproductivo (Figura 3 a).

En el sub-caso B (resultados no mostrados gráficamente), el principal elemento de manejo cultural introducido fue el atraso de la siembra de soja para evitar la competencia con el pico de emergencia de *E. davidii* que afectó al sub-caso A. El barbecho mecánico fue realizado el día previo a la siembra controlando así a todos los individuos emergidos hasta esa fecha. Los resultados finales de la simulación (Tabla 7) delimitaron dos sub-casos contrastantes, con mejores resultados de control para el sub-caso B. Las ventajas de la estrategia del sub caso B respecto del A se manifiestan claramente en los indicadores económicos (MB y VA) de la Tabla 7. Ambos sub-casos poseen exactamente los mismos valores de los indicadores de impacto ambiental dado que solo se distinguen por las medidas culturales. Específicamente el impacto por control químico es nulo (EIQ y P) debido a que no se aplican fitosanitarios. Se obtiene si una penalización en el índice T por la realización de una labranza y la siembra de soja.

### *Caso II. Control químico y manejo cultural.*

En el caso II se representa la aplicación en barbecho de una mezcla de herbicidas, de acción no selectiva y residual, realizada 10 días antes de la siembra del cultivo de soja. Además, el presente caso se encuentra dividido en dos sub-casos diferenciados en las medidas de manejo cultural aplicadas (densidad de siembra y distanciamiento entre hileras). El objetivo principal de este caso es ilustrar tanto el efecto de la aplicación de medidas culturales, como el impacto de tratamientos de control químico residual sobre la dinámica poblacional de la maleza. En la (Figura 3 b) y Tabla 7 pueden observarse los resultados obtenidos con los parámetros detallados en la Tabla 6.

Al igual que en el ejemplo anterior, en este escenario simulado de la campaña 2013/2014 se presentan dos flujos de emergencia de gran magnitud ubicados a mediados de octubre. Dichos flujos son controlados con la aplicación de la mezcla de herbicidas a fines de octubre y cuyo accionar residual se extiende durante gran parte del mes de noviembre.

Los resultados finales de la simulación demarcaron dos sub-casos con algunas diferencias, en los cuales se vio favorecida la estrategia utilizada en el sub-caso A debido a

la aplicación de medidas de manejo cultural (Tabla 7). Ambos sub-casos poseen exactamente los mismos valores de los indicadores de impacto ambiental dado que solo se distinguen por las medidas culturales. Se manifiesta un impacto por aplicación de herbicidas (EIQ y P) mientras que el indicador de impacto por labranzas es bajo debido únicamente al impacto de la siembra del cultivo (T).

## 5 Conclusiones

Los modelos de simulación y los sistemas de ayuda a la toma de decisiones aplicados al control de malezas surgen como herramientas que posibilitan mejorar la interpretación de los sistemas y probar “in silico” estrategias de manejo y evaluar los resultados minimizando la necesidad de realizar costosos y laboriosos ensayos a campo (Holst, 2020). Este tipo de herramientas varían en sus objetivos de uso. En este trabajo se presentan como una aproximación orientada a cuantificar y comparar las variables agronómicas, el impacto ambiental y el beneficio económico de distintas estrategias de manejo de malezas consideradas típicamente por parte de asesores y productores.

En este trabajo dicho modelo se adaptó a un sistema agronómico ubicado en el centro de la provincia de Buenos Aires compuesto por el cultivo de soja en competencia con la maleza *Euphorbia davidii*.

Los casos de estudio presentados en este trabajo se generaron con el objetivo de analizar el sistema cultivo-maleza bajo estudio. En los mismos se definieron distintas estrategias de manejo, y se propusieron sub-casos con pequeñas variaciones para ampliar la gama de resultados obtenidos y comparar rápidamente las diferencias. Específicamente se probaron manejos basados en controles químicos, culturales y mecánicos.

Los experimentos realizados permitieron comparar las estrategias propuestas desde los puntos de vista agronómico, medioambiental y económico empleando indicadores de relativa sencilla evaluación.

## 6 Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por la beca de finalización de doctorado otorgada a Franco A. Molinari. Esta investigación fue parcialmente financiada por subsidios de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica MINCyT (PICT-2016-1575), CONICET (PIP N°0 11220150100257CO) y la Universidad Nacional del Sur (PGI 24/A254), (PGI-TIR-80020190100001SU). A la Dra. Adriana Confalone, por facilitar la información necesaria para la simulación del cultivo de soja y por la información meteorológica histórica para las localidades de Azul y Olavarria.

## 7 Bibliografía

1. Andrew, I.K.S., Storkey, J., Sparkes, D.L., 2015. A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management. *Weed Res.* 55, 239–248. <https://doi.org/10.1111/wre.12137>
2. Bagavathiannan, M. V., Beckie, H.J., Chantre, G.R., Gonzalez-Andujar, J.L., Leon, R.G., Neve, P., Poggio, S.L., Schutte, B.J., Somerville, G.J., Werle, R., Van Acker, R., 2020. Simulation models on the ecology and management of arableweeds: Structure, quantitative insights, and applications. *Agronomy* 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101611>
3. Chantre, G.R., Vigna, M.R., Renzi, J.P., Blanco, A.M., 2018. A flexible and practical approach for real-time weed emergence prediction based on Artificial Neural Networks. *Biosyst. Eng.* 170, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.014>
4. Eshenaur, B., Grant, J., Kovach, J., Petzoldt, C., Degni, J., Tette, J., 2019. Environmental Impact Quotient: “A Method to Measure the Environmental Impact of Pesticides.” [WWW Document]. New York State Integr. Pest Manag. Program, Cornell Coop. Extension, Cornell Univ. URL [www.nysipm.cornell.edu/publications/EIQ](http://www.nysipm.cornell.edu/publications/EIQ) (accessed 12.13.19).
5. Ferraro, D.O., 2022. PRORIPEST [WWW Document]. URL <http://proripest.malezas.agro.uba.ar/inicio.php> (accessed 5.9.22).
6. Ferraro, D.O., Ghersa, C.M., Sznajder, G.A., 2003. Evaluation of environmental impact indicators using fuzzy logic to assess the mixed cropping systems of the Inland Pampa, Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 96, 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00017-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00017-3)
7. Holst, N., 2020. Mathematical Models BT - Decision Support Systems for Weed Management, in: Chantre, G.R., González-Andújar, J.L. (Eds.), . Springer International Publishing, Cham, pp. 3–23. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44402-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44402-0_1)
8. Istilart, C., Yannicari, M., Gigón, R., Manso Lucrecia, Forjan Horacio, 2014. Control de lecherón (*Euphorbia davidii*) en post-emergencia de maíz resistente a glifosato.
9. Juan, V., Saint-André, H.M., 1997. Control of Lecheron (*Euphorbia dentata*) in soybean with imazethapyr applied at different developmental stages. XIII Congr. Latinoam. Malezas. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3899.4086>
10. Juan, V.F., Marchessi, J.E., Núñez Fré, F., 2006. Control de lecheron (*Euphorbia dentata*) con glifosato. *Planta Daninha* 24, 347–352.
11. Juan, V.F., Saint-André, H., Fernandez, R.R., 2003. Competencia de lecheron (*Euphorbia dentata*) en soja. *Planta Daninha* 21, 175–180. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582003000200002>
12. Juan, V.F., Saint-André, H.M., Fernández, R.R., Bazzano, J., Videla, M., 2002. Control de *Euphorbia dentata* con diferentes formulaciones de glifosato en soja transgénica resistente a glifosato. *Rev. Bras. Herbic.* 3, 29. <https://doi.org/10.7824/rbh.v3i1.368>

13. Juan, V.F., Saint-André, H.M., Fernández, R.R., Videla, M., Bazzano, J., 2000. Control de *Euphorbia dentata* en soja con herbicidas post-emergentes. *Rev. Bras. Herbic. 1*, 147. <https://doi.org/10.7824/rbh.v1i2.329>
14. Kovach, J., Petzoldt, C., Degni, J., Tette, J., 1992. A Method to Measure the Environmental Impact of Pesticides. *New York's Food Life Sci. Bull.* 1–8.
15. Marchessi, J.E., Subils, R., Scaramuzzino, R.L., Crosta, H.N., Eseiza, M.F., André, H.M. Saint, Juan, V.F., 2011. Presencia de *Euphorbia davidii* Subils (Euphorbiaceae) en la Provincia de Buenos Aires: morfología y anatomía de la especie Presence of *Euphorbia davidii* Subils (Euphorbiaceae) in Buenos Aires Province: morphology and anatomy. *Kurtziana 36*, 45–53.
16. Meira, S., Rodríguez Baide, J.M., Confalone, A., Fatecha Fois, D.A., Fernandes, J.M., González Pérez, O., Berg, M. Van den, 2019. Modelación del cultivo de soja en Latinoamérica Estado del arte y base de datos para parametrización. <https://doi.org/10.2760/639226>
17. Molinari, F.A., Blanco, A.M., Chantre, G.R., 2018. Manejo Integrado de Malezas : Simulación del sistema multianual AVEFA-Trigo / Cebada, in: Congreso Argentino de AgroInformática. pp. 110–122.
18. Molinari, F.A., Blanco, A.M., Vigna, M.R., Chantre, G.R., 2020. Towards an integrated weed management decision support system: A simulation model for weed-crop competition and control. *Comput. Electron. Agric.* 175, 105597. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105597>
19. Núñez Fré, F., Juan, V., Saint André, H., Fernández, R., 2015. Evaluación de herbicidas residuales complementando a glifosato para el control de *Euphorbia davidii* en barbechos. XXII Congreso de la ALAM I Congreso de la ASACIM, p. 90.
20. Nuñez Fré, F.R., 2019. Manejo de *Euphorbia davidii* Subils: Dinámica poblacional, control químico y evaluación de sensibilidad a glifosato. Tesis Magister. Universidad Nacional del Sur.
21. Núñez Fré, F.R., Juan, V.F., Saint-André, H.M., Chantre, G.R., 2018. Demographic and Phenological Studies on David's Spurge (*Euphorbia davidii*) in the Central Area of Buenos Aires Province, Argentina. *Planta Daninha 36*. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582018360100088>
22. Pannell, D.J., Stewart, V., Bennett, A., Monjardino, M., Schmidt, C., Powles, S.B., 2004. RIM: A bioeconomic model for integrated weed management of *Lolium rigidum* in Western Australia. *Agric. Syst.* 79, 305–325. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(03\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00089-1)
23. Revista Margenes agropecuarios, 2022. 0–5.
24. Scursoni, J.A., Vera, A.C.D., Oreja, F.H., Kruk, B.C., De La Fuente, E.B., 2019. Weed management practices in Argentina crops. *Weed Technol.* 33, 459–463. <https://doi.org/10.1017/wet.2019.26>
25. University of Hertfordshire, 2022. PPDB: Pesticide Properties DataBase [WWW Document]. URL <https://sitem.herts.ac.uk/> (accessed 4.30.22).