

CAI, Congreso Argentino de AgroInformática

Manejo Integrado de Malezas: un enfoque de simulación. Aplicación al sistema AVEFA-Cebada

Franco Ariel Molinari^{1,2}, Aníbal Manuel Blanco³, Guillermo Rubén Chantre^{1,4}

¹Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, San Andrés 800, 8000 Bahía Blanca, Argentina.

²Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC)

³Planta Piloto de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur (PLAPIQUI-CONICET), 8000 Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

⁴Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS-CONICET), 8000 Bahía Blanca, Argentina

franco.molinari@uns.edu.ar

Resumen. El presente trabajo propone una aproximación computacional al Manejo Integrado de Malezas (MIM) por medio de un modelo matemático de simulación que tiene en cuenta la dinámica demográfica de una maleza anual en competencia con el cultivo. El modelo desarrollado permite simular: (i) la dinámica demográfica de la maleza, discriminando la composición numérica de los distintos estados fenológicos y la magnitud de los procesos demográficos, en función del impacto ejercido por las estrategias de control seleccionadas (químicas y no químicas); (ii) el nivel de competencia cultivo-maleza; y (iii) el rendimiento esperado del cultivo en función de las estrategias de manejo utilizadas. El modelo ha sido desarrollado sobre la plataforma Microsoft Excel® y programación en Visual Basic. Con fines demostrativos se utilizó como caso de estudio el sistema AVEFA (*Avena fatua* L.) – Cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) característico de la región centro-sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: Demografía de Malezas, Modelo de simulación, *Avena fatua* L.

1 Introducción

La agricultura moderna depende operativamente del uso intensivo de insumos (herbicidas, insecticidas, fertilizantes químicos, variedades transgénicas) con la finalidad de maximizar la productividad de los agroecosistemas. Si bien el empleo de herbicidas, tanto de acción total (ej. glifosato, paraquat), como selectivos de acción latifolicida (ej. 2,4-D, atrazina) o gramínicida (FOPs, DIMs, DENs) desempeñan un rol fundamental en el cumplimiento de dicho objetivo en el corto plazo, el efecto de su uso ininterrumpido trae aparejado un consabido riesgo de impacto ambiental (persistencia medioambiental y perjuicio a la flora autóctona) y de proliferación de malezas resistentes.

El Manejo Integrado de Malezas (MIM), al combinar distintos métodos de prevención y control, contribuye a mejorar la sustentabilidad de los agroecosistemas en el

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. 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. Una revisión reciente sobre unos doce sistemas de estas características puede encontrarse en [1]. Si bien estos sistemas poseen numerosas características deseables en un sistema de soporte a la toma de decisiones (SSD) de la actividad agronómica, se requiere de un modelo con características muy específicas para emplearlo con probabilidad de éxito a los sistemas agroecológicos regionales de nuestro país. Por ejemplo, para el caso del modelo RIM [2] sería menester realizar modificaciones que contemplen aspectos regionales o locales de la bioecología de las malezas, el comportamiento ecofisiológico de los cultivos, y las prácticas de manejo habituales. Actualmente, a nivel nacional, no se dispone en la práctica de herramientas de SSD agronómicas basados en la interacción entre demografía de malezas, ecofisiología de cultivos y medidas alternativas de manejo.

El objetivo del presente trabajo consistió en desarrollar una aproximación computacional para el MIM mediante un modelo matemático de simulación. Dicho modelo utiliza como base la dinámica demográfica de una maleza anual en competencia con un cereal de invierno. Se utilizó como caso de estudio el sistema AVEFA (*Avena fatua* L.) – Cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) característico de la región centro-sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. El modelo desarrollado permite simular: (i) la dinámica demográfica de la maleza, discriminando la composición numérica de los distintos estados fenológicos y la magnitud de los procesos demográficos involucrados, en función del impacto ejercido por las estrategias de control seleccionadas (químicas y no químicas); (ii) el nivel de competencia cultivo-maleza; y (iii) el rendimiento esperado del cultivo en función de las estrategias de manejo utilizadas.

2 Detalles funcionales y de desarrollo del modelo

2.1 Horizonte de planeamiento

El modelo genera escenarios de simulación durante un ciclo agronómico anual, utilizando un paso diario (cada variable se calcula diariamente a lo largo del ciclo). El cálculo diario asegura una buena aproximación y adaptabilidad a los diferentes sistemas sobre los que se pretende aplicar el modelo, siendo compatible con la frecuencia habitual de toma de muestras de la actividad agronómica y de disponibilidad y pronóstico de datos meteorológicos.

2.2 Información agrometeorológica

La información agrometeorológica diaria generada a partir de las estaciones del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) sirve de insumo para el modelo. A partir del registro de temperaturas medias diarias y precipitación, el modelo calcula el tiempo-térmico (grados día, °Cd) requerido para cumplimentar las distintas etapas fenológicas de la maleza.

2.3 Dinámica demográfica de la maleza

La dinámica demográfica de la maleza fue simulada a partir de cohortes diarias. Cada cohorte se compone de los individuos que son incorporados al sistema de forma simultánea. El ciclo demográfico de la maleza se dividió en cinco estados: plántula (p), vegetativo temprano (vt), vegetativo avanzado (va), reproductivo inicial (ri) y reproductivo avanzado (ra). Cada estado es evaluado individualmente por medio de un balance diario en función de la incidencia de los factores demográficos intrínsecos (competencia intraespecífica, supervivencia, crecimiento y fecundidad denso dependiente) y extrínsecos a la población (antrópicos: prácticas de control) y/o meteorológicos (acumulación de grados-día, daños por heladas).

Habitualmente se utiliza una función de acumulación de tiempo-térmico (θ_T) para representar la transición entre estados hasta la finalización del ciclo vital [3].

$$\theta_T = \sum_{i=1,n} (T_i - T_b) \quad (1)$$

donde T es la temperatura media diaria y T_b es la temperatura base cardinal para la acumulación de tiempo-térmico.

En el enfoque propuesto se utilizan distintos valores de referencia para describir el cumplimiento de cada una de las etapas (GD_p , GD_{vt} , GD_{va} , GD_{ri}).

A continuación, se detalla cada uno de los *estados demográficos* considerados en el modelo:

Estado de plántula (cotiledón-1 HV). El estado de plántula representado por la interfase comprendida entre la emergencia del cotiledón y la primera hoja verdadera es la fase inicial del ciclo vital de la maleza. Como se mencionó anteriormente, el modelo simula la emergencia de los individuos (cohortes) de forma diaria a lo largo de la ventana de emergencia a campo.

Sobre esta primera fase fenológica inciden los factores de competencia intra e interespecífica (ver sección correspondiente).

Estado vegetativo temprano (2-4 HV). Es el segundo estado de la dinámica demográfica. Para alcanzar dicho estado deben cumplirse dos condiciones no excluyentes: (i) acumulación de GD_p para cada cohorte diaria, y (ii) supervivencia al efecto de la competencia intra e interespecífica.

Estado vegetativo avanzado (macollaje). Esta etapa está caracterizada por el crecimiento de nuevos tallos (macollos) a partir del tallo principal, lo que provoca un aumento de la capacidad competitiva de cada planta individual. La capacidad competitiva

de las plantas en estado vegetativo avanzado incide en la competencia intraespecífica sobre los individuos en estado de plántula, además de actuar sobre la competencia interespecífica sobre el cultivo. El estado vegetativo avanzado se alcanza cuando $\theta_T = GD_{vt}$.

Estado reproductivo inicial (floración). Se encuentra representada por el período comprendido entre la aparición de la panoja, y el estado de madurez fisiológica previo a la dispersión natural de las semillas. En este estado la competencia ejercida por la planta es máxima. La capacidad competitiva se ve reflejada de manera similar al estado de macollaje. Cada cohorte debe cumplir $\theta_T = GD_{va}$ para alcanzar este estado.

Estado reproductivo avanzado (dispersión). Es el quinto estado fenológico incluido en el modelo. Representa el período posterior al llenado del grano. En esta etapa la competencia ejercida por cada planta individual se considera poco significativa respecto de los estados previos (e.i. vegetativo avanzado y reproductivo inicial) ya que los individuos se encuentran en proceso de senescencia. Dicho estado se alcanza cuando $\theta_T = GD_{ri}$.

La densidad de plantas que alcanzan el estado reproductivo avanzado se utiliza para el cálculo de producción total de semillas de la maleza.

A continuación se describen los restantes elementos relativos a la dinámica poblacional de la maleza, considerados en este trabajo:

Banco de semillas. El banco de semillas del suelo se define como el conjunto de semillas presentes en el suelo, que contribuyen al establecimiento y mantenimiento de las poblaciones de malezas en el agroecosistema. Es una componente demográfica de gran valor ya que permite estimar el riesgo de infestación, determinado por los balances interanuales. El balance del banco tiene en cuenta los ingresos y los egresos del sistema. Los ingresos corresponden a la producción de semillas a partir de las plantas que alcanzan el estado reproductivo avanzado. Los egresos resultan de la germinación-emergencia, predación y mortalidad (decaimiento fisiológico, ataque de hongos y bacterias). Al final del ciclo se obtendrá un valor estimado (Df_{BS}) que permitirá inferir el nivel de riesgo de infestación en los años subsiguientes:

$$Df_{BS} = Di_{BS} - Di_{BS} (G + Mo_{BS} + Dep_{BS}) + PS (1 - Mo_D) \quad (2)$$

donde Di_{BS} y Df_{BS} son la densidad inicial y final del banco de semillas respectivamente, G es la tasa de individuos que germinaron y emergieron; Mo_{BS} la tasa de mortalidad en el banco de semillas; Dep_{BS} es el nivel de predación sobre el banco; PS es la producción total de semillas, Mo_D es la pérdida de semillas al momento de la dispersión natural.

A continuación, se detallan los *procesos demográficos* incidentes en la dinámica demográfica de la maleza:

Producción de Semillas (fecundidad). Se calcula la producción individual de semillas (fecundidad) según la siguiente ecuación [4]:

$$PS = \sum_{i=1,365} \{st \rho_{ra i} / [1 + (b_{ps} \rho_{ra i})]\} \quad (3)$$

donde PS producción total de semillas, $\rho_{ra i}$ es la densidad de plantas en estado reproductivo avanzado en el momento i , st máxima producción de semillas por planta cuando $\rho_{ra i} \rightarrow 0$, b_{ps} proporción de st en condiciones de máxima producción de semillas por unidad de área.

Competencia intraespecífica. La competencia intraespecífica es la competencia que ejerce cada planta de maleza sobre los individuos de la misma especie. Dicho efecto de interferencia se considera mediante la aplicación de una tasa de mortalidad (Mo_{Cia}) que depende de la capacidad de porte del sistema (K), definida como el nivel más allá del cual no puede darse crecimiento poblacional importante alguno; por lo tanto, constituye el límite superior o umbral máximo de densidad de población. Cuando la densidad de malezas (ρ) es igual o superior a K ($\rho \geq K$) la mortalidad es máxima. A su vez, la densidad de plantas competitivas (pcc) en un momento dado i resulta de la ponderación resultante de la composición demográfica de la población en dicho momento i . La densidad ponderada por la capacidad competitiva intraespecífica se calcula como:

$$pcc_i = \rho_{va i} CC_{ia_{va i}} + \rho_{ri i} CC_{ia_{ri}} \quad (4)$$

donde pcc_i es la densidad de la maleza ponderada por la capacidad competitiva asociada al estado fenológico en un momento dado i ; $\rho_{va i}$ densidad de malezas en estado vegetativo avanzado en i ; $CC_{ia_{va i}}$ capacidad competitiva intraespecífica del estado vegetativo avanzado; $\rho_{ri i}$ densidad de malezas en estado reproductivo inicial en el momento i ; $CC_{ia_{ri}}$ capacidad competitiva intraespecífica del estado reproductivo inicial.

Competencia interespecífica. A fin de cuantificar el efecto competitivo del cultivo sobre la maleza, a partir de la estimación del crecimiento del cultivo, se aplicó una tasa de mortalidad sobre los individuos maleza empleando el concepto de área foliar total en un momento dado i ($TPLA_i$) [5]:

$$TPLA_i = TPLA_{max} / (1 + \exp(-a(TT_i - b_{tt}))) \quad (5)$$

donde $TPLA_{max}$ es el TPLA en el momento de cosecha [$cm^2/planta$]; TT_i es el tiempo-térmico acumulado en i ; a define la pendiente de la curva; b_{tt} es el valor de TT cuando el área foliar corresponde a $TPLA_{max}/2$.

A partir de la ec. 5 se calcula el *factor de competencia diario* (FC_i):

$$FC_i = (TPLA_i / TPLA_{max}) (P_c / P_{comp}) \quad (6)$$

donde P_c es la densidad de siembra del cultivo; P_{comp} es la densidad de siembra del cultivo que compite efectivamente con la maleza.

El valor obtenido de la ec. 6, se lo aplica como una tasa de mortalidad al primer estado fenológico de la maleza.

En el caso de la competencia ejercida por la maleza sobre el cultivo, el efecto se cuantifica a través de la función de rendimiento esperado [2]:

$$Y = (P_o + A_c/P_o) (P_l / A_c + P_c + (K_{av} W)) M + (1-M) \quad (7)$$

donde Y corresponde al rendimiento del cultivo (como proporción del rendimiento libre de malezas); P_o densidad estándar del cultivo; P_c densidad del cultivo actual; W densidad de malezas que alcanza el estado vegetativo avanzado; M máxima proporción de pérdida del rendimiento por una alta densidad de malezas; A_c constante que depende del cultivo; K_{av} constante que refleja la competitividad de la maleza sobre el cultivo.

Dado que en la ecuación anterior W no tiene en cuenta las malezas que son efectivamente controladas durante el ciclo del cultivo, se optó por realizar una adaptación *ad-hoc* de la ec. (7) a fin de lograr una mejor estimación del efecto competitivo ejercido por la maleza sobre el cultivo previo al control.

Se consideró, tanto la capacidad competitiva de la maleza según su estado fenológico (CCie), como la susceptibilidad del cultivo al momento del control (SC). La competencia interespecífica diaria se calcula como la densidad de malezas (ρ) ponderada en función del estado fenológico. Además, la SC pondera la competencia diaria a través de factores relacionados al *periodo crítico de control* (PCC) (eq. 8). El PCC indica la duración del periodo de tiempo durante la fenología del cultivo en donde en donde la interferencia con la maleza produce pérdidas significativas sobre el rendimiento potencial del cultivo.

A continuación, se detalla la fórmula utilizada para el cálculo de W:

$$W = \sum_{i=1, 365} \{(\rho_{pi} CCie_p + \rho_{vti} CCie_{vt} + \rho_{vai} CCie_{va} + \rho_{ri} CCie_{ri}) SC\} \quad (8)$$

donde CCie capacidad competitiva interespecífica que varía según el estado fenológico (CCie_p plántula, CCie_{vt} vegetativo temprano, CCie_{va} vegetativo avanzado, CCie_{ri} reproductivo inicial) y SC representa la susceptibilidad del cultivo, que puede tomar 3 valores diferentes según el estado fenológico: SC_{E-PCC} desde la emergencia de cultivo hasta el comienzo del PCC; SC_{PCC} durante el PCC, SC_{PCC-MF}, desde fin de PCC hasta madurez fisiológica del cultivo.

2.4 Control de malezas

A continuación se incluyen los métodos de control utilizados en el caso de estudio:

- Control químico:
 - Glifosato (LS 48%, 2 l.ha⁻¹)
 - Pinoxaden (Axial CE 6%, 0,8 l.ha⁻¹).
- Control mecánico
 - Labor de Arada

El modelo realiza el control a través una rutina programada en Visual Basic, que permite detectar y eliminar automáticamente las cohortes diarias susceptibles.

3 Sistema AVEFA-Cebada

Este caso representa la aplicación del enfoque propuesto a la dinámica demográfica de la especie maleza *Avena fatua* L. (código Bayer: AVEFA), en competencia con el cultivo de Cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.), para un sistema agrícola típico del sudoeste bonaerense. Para este estudio se utilizaron datos climáticos obtenidos de la EEA-Bordenave [6]. En particular se seleccionó la campaña 1993 por disponerse de información específica sobre la maleza [7]. El PCC se estimó utilizando el software *CronoCebada*© [8].

A continuación se proporcionan los detalles de la información empleada para la simulación.

Tabla 1. Parámetros del modelo de simulación para el sistema AVEFA- Cebada cervecera. Se detallan los parámetros demográficos de la maleza. CE= Conocimiento experto.

Parámetro	Descripción	Valor	Fuente
<i>BANCO DE SEMILLAS</i>			
D _{IBS}	Densidad inicial (semillas m ⁻²)	479	[7]
Dep _{BS}	Tasa de depredación durante el barbecho	0,5	[7]
Mo _{BS}	Tasa de mortalidad anual	0,0732	[7]
G	Proporción de Emergencia a campo período Febrero-Mayo	0,118	[7]
	Proporción Emergencia a campo período Octubre-Enero	0,304	[7]
Mo _D	Pérdidas de semillas al momento de la dispersión natural	0,54	[4][7]
<i>PRODUCCIÓN DE SEMILLAS</i>			
st	Máxima producción de semillas por planta cuando $\rho_{ri} \rightarrow 0$	37	[4]
b _{ps}	Proporción de st en condiciones de máxima producción de semillas por unidad de área.	0,005	[4]
<i>COMPETENCIA INTRAESPECÍFICA</i>			
K	Capacidad de porte del agroecosistema	200	CE
Mo _{Cia}	Tasa de mortalidad por competencia (solo si $\rho \geq K$)	1	CE
CC _{ia_{va}}	Factor competencia intraespecífica al estado veg. avanzado	0,7	CE
CC _{ia_{ri}}	Factor competencia intraespecífica al estado rep. inicial	1	CE
<i>REQUERIMIENTO TIEMPO-TÉRMICO</i>			
T _b	Temperatura base cardinal	0°C	[9]
GD _p	GD plántula	200 °Cd	CE
GD _{vt}	GD vegetativo temprano	800°Cd	CE
GD _{va}	GD vegetativo avanzado	2800°Cd	CE
GD _{ri}	GD reproductivo inicial	3800°Cd	CE
<i>COMPETENCIA INTERESPECÍFICA</i>			
Mo _{Cie}	Tasa de mortalidad por competencia interespecífica	0 a 1	CE
CC _{ie_p}	Factor competencia interespecífica al estado de plántula	0,1	CE
CC _{ie_{vt}}	Factor competencia interespecífica al estado veg. temprano	0,2	CE
CC _{ie_{va}}	Factor competencia interespecífica al estado veg. avanzado	0,7	CE
CC _{ie_{ri}}	Factor competencia interespecífica al estado rep. inicial	1	CE

Tabla 2. Parámetros del modelo de simulación para el sistema AVEFA- Cebada cervecera. Se detallan parámetros ecofisiológicos del cultivo. CE= Conocimiento experto.

Parámetro	Descripción	Valor	Fuente
<i>CURVA DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO</i>			
a	Pendiente de la curva	0,0091	[5]
b _{tt}	TT específico correspondiente a $TPLA_{max}/2$	736	[5]
<i>RENDIMIENTO ESPERADO – COMPETENCIA INTERESPECÍFICA MALEZA-CULTIVO</i>			
P ₀	Densidad estándar del cultivo	160	[7]
P _c	Densidad del cultivo actual	160	[7]
P _{comp}	Densidad de siembra del cultivo que compite efectivamente con la maleza	280	CE
M	Máxima proporción de pérdida del rendimiento por elevada densidad de malezas	0,45	[2]
A _C	Constante dependiente del cultivo	3	[2]
K _{Av}	Constante que refleja la competitividad de la maleza en un cultivo de cebada	3,3	[2]
<i>COMPETENCIA INTERESPECÍFICA</i>			
SC _{E-PCC}	Susceptibilidad del cultivo desde emergencia a PCC	0,5	CE
SC _{PCC}	Susceptibilidad del cultivo durante PCC	1	CE
SC _{PCC-MF}	Susceptibilidad del cultivo desde PCC hasta madurez fisiológica	0,2	CE

4 Resultados

A continuación, se presentan los resultados de diferentes simulaciones del sistema AVEFA – Cebada a fin de ilustrar las prestaciones del modelo propuesto. Sobre el caso de base descrito en la sección anterior se modificaron factores demográficos de la maleza y de manejo con el objetivo de poner a prueba la estrategia de modelamiento adoptada.

4.1 Caso I

En la Fig. 1 se presentan los resultados correspondientes a la simulación del sistema AVEFA – Cebada considerando un nivel bajo de semillas en el banco (ver Tablas 1-2) sin la aplicación de medidas de control de la maleza.

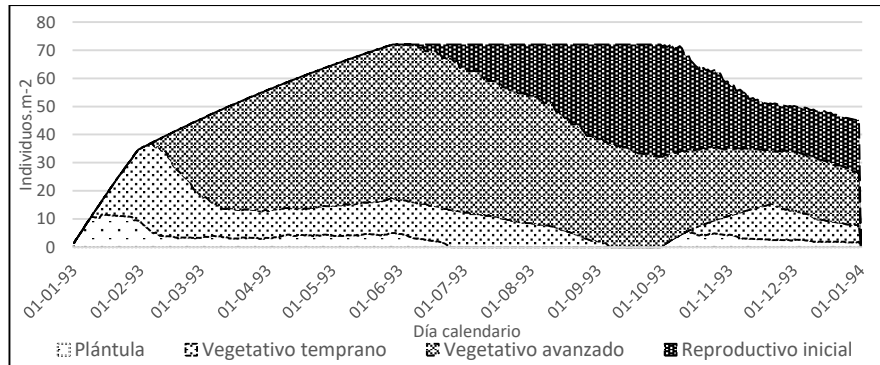


Fig. 1. Dinámica demográfica anual de AVEFA mostrando la composición relativa de cada estado fenológico considerando una baja infestación inicial del banco de semillas (479 individuos.m⁻²) sin aplicación de medidas de control.

En la Fig. 1 se observa la dinámica demográfica de la maleza representada por el número de individuos en los distintos estados fenológicos en función del tiempo. La ausencia de medidas de control repercute negativamente en el sistema incrementando el nivel de infestación del lote. El balance del banco de semillas resulta positivo con un valor final de 531 semillas.m⁻². A pesar de la ausencia de medidas de control, la máxima densidad resulta inferior a la capacidad de porte del sistema. El rendimiento esperado de la cebada resultaría significativamente afectado con una pérdida estimada del 16 %.

4.2 Caso II

Se simula una situación sin medidas de control, partiendo de un nivel de infestación alto, representado por un banco inicial de 2874 semillas.m⁻² (Fig. 2). El objetivo perseguido fue el de evaluar el efecto de la competencia intraespecífica y la capacidad de porte del agroecosistema (K) (e.i. tamaño máximo de la población de la maleza que el ambiente puede soportar con limitada disponibilidad de recursos).

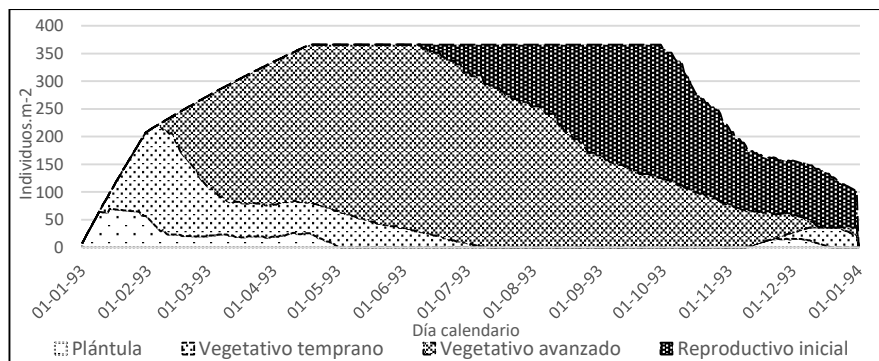


Fig. 2. Dinámica demográfica anual de AVEFA mostrando la composición relativa de cada estado fenológico considerando un alto nivel de infestación inicial ($Di_{BS} = 2874$ semillas.m⁻²) sin aplicación de medidas de control.

Se observa el efecto de auto-raleo generado por la competencia intraespecífica, reduciendo significativamente la supervivencia y el establecimiento de las plántulas de AVEFA a partir de principios de mayo, respecto del caso anterior donde se extiende hasta principios de julio.

La competencia intraespecífica impacta sobre la incorporación de nuevas plántulas al sistema, en función de la densidad alcanzada por los individuos en los estados, vegetativo (avanzado) y reproductivo (inicial). A medida que la densidad de individuos adultos aumenta y tiende al valor prestablecido de K (200 individuos.m⁻²) se incrementa el efecto de la competencia. Como se ha comentado anteriormente a los fines prácticos se han asignado distintos pesos competitivos (CCia) según el estado fenológico de la maleza (ver Tabla 1).

Sobre el final de la campaña se reanuda el ciclo de la maleza, con la aparición de nuevas cohortes de plántulas a mediados de noviembre por efecto de una reducción en la competencia intraespecífica, asociada a una baja en la densidad de plantas adultas.

El balance del banco de semillas resulta positivo con un valor final de 3043 semillas.m⁻². El rendimiento esperado resultaría con una pérdida estimada del 33 %.

4.3 Caso III

Se simula una condición de baja infestación del lote (Caso I) efectuando acciones de control químico sobre la maleza. Específicamente se simularon tres aplicaciones de herbicidas (en barbecho y en postemergencia del cultivo) a lo largo de la temporada. En la Tabla 3 se detallan las eficiencias de control utilizadas según el estado fenológico de AVEFA. En la Fig. 3 se observa el impacto de los controles en la dinámica demográfica de la maleza.

Tabla 3. Caso III: Eficiencias del control químico según el estado fenológico de AVEFA para un herbicida de control total aplicado en barbecho (glifosato) y un graminicida selectivo para cebada aplicado en post-emergencia del cultivo (pinoxaden).

Herbicida	Fecha de aplicación	Plántula	Vegetativo temprano	Vegetativo avanzado	Reproductivo inicial
Glifosato	01-04-93	0,9	0,9	0,9	0,4
Glifosato	25-07-93	0,9	0,9	0,9	0,4
Pinoxaden	20-10-93	0,9	0,8	0,6	0,2

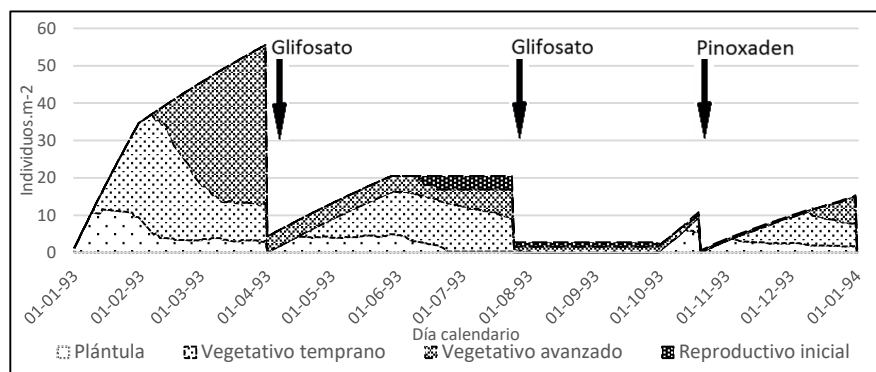


Fig. 3. Dinámica demográfica anual de AVEFA mostrando la composición relativa de cada estado fenológico y el efecto del control químico con glifosato (no selectivo) y pinoxaden (graminicida post-emergente selectivo para cereales de invierno). Las flechas indican momento de control.

En la Fig. 3 se observa el efecto de las medidas de control químico adoptadas en el presente caso de estudio. Se puede apreciar el efecto de una aplicación temprana de glifosato durante el barbecho (principios de abril) y una segunda aplicación previo a la siembra de cebada. Luego de la primera aplicación se lograría un control eficiente de los individuos que se encuentran en estado vegetativo (temprano y avanzado), mientras que en la segunda aplicación, se reduciría la eficiencia de control por la presencia de malezas en estado reproductivo (Tabla 3). La aplicación de un graminicida selectivo (pinoxaden) antes de la elongación del tallo de cebada permite un control eficiente de las nuevas cohortes durante el período crítico de control (31/10 al 20/11, [8]) minimizando la competencia con el cultivo. A diferencia de los casos anteriores, las acciones de control químico permitieron obtener un balance negativo del banco de semillas de AVEFA y un rendimiento esperado del 99 % (Tabla 4).

4.4 Caso IV

En este caso se simuló las mismas prácticas de control químico que en el caso anterior pero con la combinación de una medida de control cultural. Específicamente, se incrementó un 75% la densidad de siembra del cultivo, empleando en esta ocasión 280 plantas.m⁻². En la Fig. 4 se destaca una menor densidad de individuos sobre el final

del ciclo en comparación con el caso III. Esto se atribuye a un aumento de la capacidad competitiva interespecífica del cultivo sobre AVEFA, incrementando la tasa de mortalidad de las nuevas plántulas de la maleza. Los resultados de rendimiento del cultivo y balance de semillas son óptimos (Tabla 4).

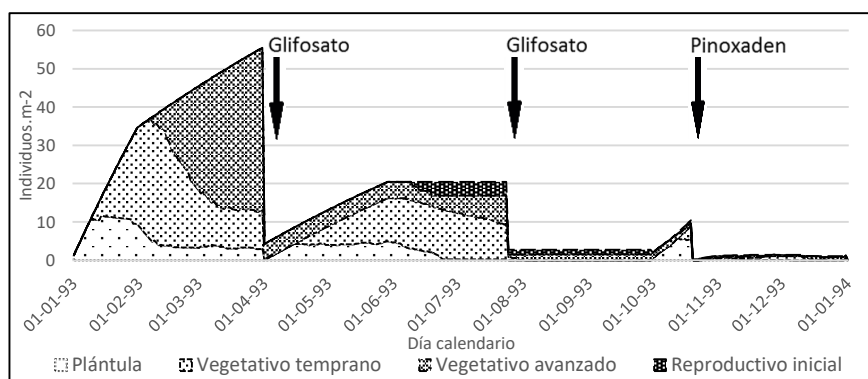


Fig. 4. Dinámica demográfica anual de AVEFA mostrando la composición relativa de cada estado fenológico y el efecto de la combinación del control químico (glifosato y pinoxaden) + manejo cultural (75% de aumento en la densidad de siembra del cultivo). Las flechas indican los momentos de control.

4.5 Caso V

En este caso se combinaron prácticas de control mecánico y cultural. Específicamente, realizaron dos labores de arada y se aumentó un 75% la densidad de siembra del cultivo, frente al caso I (280 plantas.m⁻²). Las labores de arada se realizaron previo a la siembra del cultivo, la primera durante el barbecho (01-04-93) y la segunda en presiembr (24-07-93) de cebada. Se estableció una eficiencia de control del 100% para esta estrategia, indistintamente del estado fenológico de la maleza (Fig. 5).

En la Fig. 5 se aprecia la efectividad de las labores mecánicas en el control de AVEFA. La primera labor permite controlar los crecientes niveles poblacionales a principios del periodo de barbecho, y la segunda (dos días antes de la siembra) permite controlar las cohortes emergentes de AVEFA inmediatamente antes de la siembra de cebada. Como se observa en la Fig. 5, la reanudación de las cohortes de la maleza ocurre dos meses después de la última labranza [7], encontrándose con el efecto de competencia interespecífica ejercida por el cultivo sobre la maleza, asegurando el máximo rendimiento del cultivo y la debilitación del banco de semillas (Tabla 4).

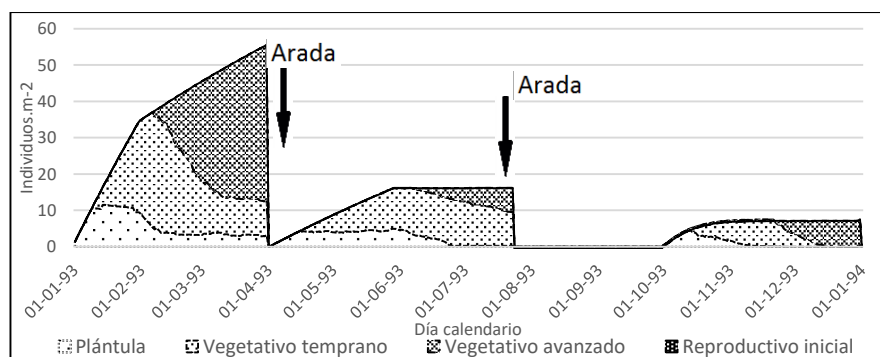


Fig. 5. Dinámica demográfica anual de AVEFA mostrando la composición relativa de cada estado fenológico y el efecto de la combinación del control mecánico (labor de arada) + manejo cultural (75% aumento de la densidad de siembra del cultivo). Las flechas indican los momentos de control.

4.6 Rendimiento del cultivo y balance del banco de semillas

El modelo permite cuantificar otras variables de interés agronómico, tales como: rendimiento final, porcentaje del rendimiento esperado, semillas que ingresan al banco, balance anual del banco y densidad de AVEFA ponderada por competencia. En la Tabla 4 se observa que en los casos sin control de la maleza (casos I y II), los rendimientos fueron inferiores al potencial (2000 kg. ha^{-1}). Se obtuvo un balance positivo en el banco de semillas, aumentando los niveles de infestación futura de AVEFA. En los casos con control (III - V), el rendimiento esperado coincidió con el potencial. La cantidad de semillas incorporadas al sistema fue baja a nula, generando balances negativos en el banco de semillas, disminuyendo los niveles de infestación en el ciclo siguiente.

Tabla 4. Rendimiento de cebada, densidad y producción de semillas de la maleza y balance del banco de semillas para los distintos casos evaluados.

Variable	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV	Caso V
Rendimiento (kg. ha^{-1})	1681	1342	1986	2000	2000
Rendimiento esperado (%)	84	67	99	100	100
Densidad de AVEFA ponderada por competencia (plantas m^{-2})	27	134	1	1	1
Semillas que ingresan al banco (semillas m^{-2})	846	4933	26	26	0
Balance del banco de semillas (semillas m^{-2})	531	3043	-289	-289	-315

5 Conclusión y trabajo futuro

Se generó un modelo de simulación que permite monitorear variables importantes del sistema cultivo-maleza a lo largo de un ciclo agronómico, y evaluar posibles acciones de control químicas, mecánicas y culturales.

La discriminación de la población de la maleza en sus distintos estados fenológicos permite programar controles en momentos estratégicos que minimicen o eviten la incorporación de semillas al banco, y efectuarlos en momentos de mayor predominancia de individuos en estados juveniles para obtener una mayor eficiencia de control, minimizando la competencia con el cultivo.

Además de permitir el monitoreo de las principales variables de interés biológico-agronómico, se pretende en el futuro ampliar las prestaciones del modelo propuesto para emplearlo en un Sistema de Soporte a la Toma de Decisiones que involucre componentes económicos y medioambientales de la actividad agronómica.

La estimación del rendimiento del cultivo permite calcular directamente el beneficio económico de la unidad productiva. Por otra parte, la explicitación de los tipos y eficiencias de las diferentes prácticas de control posibilitan por un lado el cálculo de los costos asociados y por otro la cuantificación del impacto ambiental, especialmente el relacionado con el uso de herbicidas.

Se espera que una herramienta de estas características, operada con un algoritmo de optimización que permita explorar sistemáticamente el enorme espacio de estrategias de manejo integrado de malezas, pueda emplearse para planificar a largo plazo los sistemas de producción agrícola de manera económica y ambientalmente sustentable.

6 Referencias

1. Lodovichi, M.V., Blanco, A.M., Chantre, G.R., Bandoni, J.A., Sabbatini, M.R., López, R., Vigna, M., Gigón, R., (2013). Operational planning of herbicide-based weed management. *Agricultural Systems* 121, 117–129.
2. Pannell, D., Stewart, V., Bennett, A., Monjardino, M., Schmidt, C., Powles, S. (2004). RIM: a bioeconomic model for integrated weed management of *Lolium rigidum* in Western Australia. *Agricultural Systems* 79, 305-325.
3. Begon, M., Townsend, C.R., Harper, J.L. (2006) *Ecology: From Individuals to Ecosystems*, 4th Edition. Wiley-Blackwell, Oxford. 752 p.
4. González-Andújar, J.L., Fernández-Quintanilla, C. (1991). Modelling the population dynamics of *Avena sterilis* under dry-land cereal cropping systems. *J. Appl. Ecol.* 28, 16–27.
5. Milroy, S.P., Goyne, P.J. (1995). Leaf Area Development in Barley-Model Construction and Response to Soil Moisture Status. *Aust. J. Agric. Res.* 46, 845-860
6. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. <http://inta.gob.ar/documentos/informacion-agrometeorologica>. Accedido (28/03/2017).
7. Scursioni, J. L. (2001). Demografía de *Avena fatua* L. en sistemas de producción de cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) bajo diferentes prácticas de manejo agronómico. Tesis de Magister UBA. 129 p.
8. Alzueta, I., Arisnabarreta, S., Abeledo, L.G., Miralles, D.J. (2014). A simple model to predict phenology in malting barley based on cultivar thermo-photoperiodic response. *Computers and Electronics in Agriculture* 107, 8–19.
9. Shirtliffe, S.J., Entz, M.H., Van Acker, R.C. (2000). *Avena fatua* development and seed shatter as related to thermal time. *Weed Science* 48(5), 555-560. 2000.