

DEBIDO A LA COMPLEJIDAD DE SU APLICACIÓN, LOS MODELOS MATEMÁTICOS SON UNA HERRAMIENTA FUNDAMENTAL

# Lucha biológica y modelos matemáticos: cuándo y cómo hacer las sueltas de enemigos naturales

El grado de complejidad de los diferentes métodos y técnicas de control biológico, actualmente en uso en cultivos de invernaderos de España, es bastante importante. Ello requiere un gran bagaje y conocimiento práctico para su aplicación con éxito. Lo que viene motivado, en gran parte, por las ca-

racterísticas biológicas de los diferentes tipos de enemigos naturales y sus formas de utilización. Sin embargo, se están desarrollando herramientas matemáticas que pueden ser de gran ayuda en la toma de decisión en la aplicación real de estos sistemas de control biológico de plagas.

Tomás Cabello<sup>1</sup>, Manuel Gámez<sup>2</sup>,  
József Garay<sup>3</sup> y Zoltán Varga<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Dpto. Biología Aplicada. Escuela Superior de Ingeniería. Universidad de Almería.

<sup>2</sup> Dpto. Estadística y Matemática Aplicada. Facultad de Ciencias. Universidad de Almería.

<sup>3</sup> Department of Plant Taxonomy and Ecology. L. Eötvös University. Budapest. Hungría.

<sup>4</sup> Institute of Mathematics and Informatics. Faculty of Mechanical Engineering. Szent István University. Gödöllő. Hungría.

**E**l control de plagas en cultivos en invernaderos del norte de Europa ha experimentado una evolución importante en los últimos treinta años, con el cambio del control químico por el control bio-

lógico, motivado principalmente por las resistencias a insecticidas (Lenteren, 2007). Lo mismo ha sucedido, pero más recientemente, en cultivos en invernaderos de España (Blom, 2010). Las razones, en este caso, han sido las mismas: excesiva utilización del control químico (Cabello y Cañero, 1994) y nivel de resistencia a insecticidas (Blom, 2010). En este caso, dicho cambio ha sido muy rápido. La utilización de la lucha biológica se ha incrementado pasando de 1.400 hectáreas en la campaña 2006/07, a 23.500 ha en la 2009/10 (Blom, 2010). Además, hay que señalar un efecto, todavía más reciente, como ha sido la introducción de la plaga del minador del tomate, *Tuta*

*absoluta*, que ha duplicado la superficie con utilización de la lucha biológica en el sector del tomate en invernaderos.

La superficie indicada, probablemente mayor a las 24.000 ha en la presente campaña, implica la utilización de una gran cantidad de enemigos naturales y la aplicación de diferentes técnicas, por lo que es muy importante, a nivel de efectividad y de costes de utilización, responder a la pregunta que se plantea en el título de este artículo: ¿cómo, cuándo y a qué dosis realizar la aplicación de enemigos naturales? Ello no puede quedar sólo al empirismo de los técnicos y/o agricultores, a pesar de su gran experiencia; más aún, si tenemos en cuen-



Foto 1. Larvas del minador del tomate, *Tuta absoluta*, penetrando en la mina en hoja de tomate. Foto 2. El ácaro depredador, *Amblyseius swirskii*, depredando una ninfa de mosca blanca (*Bemisia tabaci*).

## CUADRO I.

Clasificación de las técnicas y métodos de utilización de la lucha biológica, en la actualidad, en cultivos en invernaderos de España.

Método	Técnica de lucha biológica	Forma de aplicación	Ejemplos		Plaga
			Enemigo natural		
			Especie	Tipo	
Preventivo	Bio-propagación	—	<i>N. tenuis</i>	Depredador omnívoro	Moscas blancas
	Plantas reservorio	—	<i>A. colemani</i>	Parasitoide específico	Áfidos
	Otros alimentos	+Alimento alternativo	<i>A. cucumeris</i>	Depredador omnívoro	Trips
			<i>A. swirskii</i>	Depredador omnívoro	Moscas blancas
			<i>O. insidiosus</i>	Depredador omnívoro	Trips
			<i>O. laevigatus</i>	Depredador omnívoro	Trips
			<i>N. californicus</i>	Depredador olífago	Ácaros
	+Presa de cría				
Curativo	Aumento	Sueeltas inoculativas	<i>A. cucumeris</i>	Depredador omnívoro	Trips
			<i>A. swirskii</i>	Depredador omnívoro	Moscas blancas
			<i>A. aphidimiza</i>	Depredador específico	Áfidos
			<i>A. colemani</i>	Parasitoide específico	Áfidos
			<i>C. carnea</i>	Depredador omnívoro	Áfidos
			<i>D. sibirica</i>	Parasitoide específico	Submarino
			<i>D. isaea</i>	Parasitoide específico	Submarino
			<i>E. formosa</i>	Parasitoide específico	Mosca blanca
			<i>E. mundus</i>	Parasitoide específico	Mosca blanca
			<i>F. acarisuga</i>	Depredador olífago	Araña roja
			<i>N. californicus</i>	Depredador olífago	Ácaros
			<i>O. insidiosus</i>	Depredador omnívoro	Trips
			<i>O. laevigatus</i>	Depredador omnívoro	Trips
		<i>P. persimilis</i>	Depredador omnívoro	Araña roja	
		Sueeltas inundativas	<i>A. cucumeris</i>	Depredador omnívoro	Trips
			<i>A. swirskii</i>	Depredador omnívoro	Moscas blancas
			<i>A. aphidimiza</i>	Depredador específico	Áfidos
			<i>A. colemani</i>	Parasitoide específico	Áfidos
			<i>C. carnea</i>	Depredador omnívoro	Áfidos
			<i>D. isaea</i>	Parasitoide específico	Submarino
			<i>E. formosa</i>	Parasitoide específico	Mosca blanca
			<i>E. mundus</i>	Parasitoide específico	Mosca blanca
			<i>F. acarisuga</i>	Depredador olífago	Araña roja
			<i>N. californicus</i>	Depredador olífago	Ácaros
			<i>O. insidiosus</i>	Depredador omnívoro	Trips
			<i>O. laevigatus</i>	Depredador omnívoro	Trips
	<i>P. persimilis</i>		Depredador omnívoro	Araña roja	
Conservación	Empleo de materias activas selectivas	Especies presentes	—	—	

ta, como se detalla a continuación, el grado de complejidad técnica de la utilización de la lucha biológica en cultivos en invernaderos.

## Técnicas actuales del control biológico

El incremento de superficie con aplicación del control biológico en invernaderos, además de rápido como antes se señaló, ha supuesto también un cambio en las técnicas y métodos debido, principalmente, a la aparición de

nuevas plagas (como *Tuta absoluta*) (**foto 1**) y/o a la puesta en el mercado comercial de nuevos agentes de control (como *Amblyseius swirskii*) (**foto 2**), así como nuevas técnicas y métodos.

Consecuencia de lo anterior, en la actualidad, podemos considerar que la lucha biológica que se emplea en cultivos protegidos puede clasificarse por la forma de utilización del enemigo natural, o por el tipo de enemigo natural empleado, como se recoge en el **cuadro I**.

Como se puede observar (**cuadro I**), la

aplicación de la lucha biológica en cultivos en invernaderos de España, presenta cierto grado de complejidad técnica. Ello viene motivado, en parte, por las características propias del régimen alimenticio del enemigo natural y, en parte, por las distintas técnicas de aplicación. Sin embargo, ambas están interrelacionadas. Además, como también se puede observar en el **cuadro I**, un mismo enemigo natural puede ser aplicado, según las circunstancias, mediante dos o más métodos o técnicas diferentes.

## La aplicación de la lucha biológica en cultivos en invernaderos de España, presenta cierto grado de complejidad técnica, por las características propias del régimen alimenticio del enemigo natural y, por las distintas técnicas de aplicación. Además, un mismo enemigo natural puede ser aplicado, según las circunstancias, mediante dos o más métodos o técnicas diferentes

### Régimen alimenticio del enemigo natural

El régimen alimenticio del enemigo natural tiene mucha importancia en las técnicas y métodos de aplicación. Así, por una parte, hay que considerar la amplitud de especies huéspedes o presas de los enemigos naturales. Estos pueden ser polífagos (p.e.: *Nabis pseudoferus*) que atacan un gran número de especies fitófagas, plagas o no; olífagos, que matan a espe-

cies plaga relativamente próximas (p.e.: *Aphidius colemani*) y específicos, solo depredan o parasitan la especie plaga (p.e.: *Rodolia cardinalis*) (foto 3). Por otra parte, dichos enemigos naturales pueden presentar un régimen más o menos omnívoro, pudiéndose alimentar, además de insectos y/o ácaros vivos, de otras fuentes orgánicas, con una amplia gradación. Hay especies que son omnívoras en menor extensión (p.e.: *Orius laevigatus* que además de ali-

mentarse de las presas, plaga o no, puede hacerlo sobre otros alimentos, polen en este caso) o en mayor extensión (p.e.: *Nesidiocoris tenuis*, que se puede alimentar también sobre la planta como fitófago y puede llegar a constituirse como plaga del cultivo por sus daños).

### Métodos de control preventivo

En relación con las técnicas de aplicación de la lucha biológica hay que señalar, en primer lugar, los métodos preventivos. Los mismos, hasta la fecha, han tenido pocos ejemplos dentro de los métodos generales de control de plagas. En este caso, el control biológico consiste en introducir el enemigo natural en la parcela de cultivo, antes de que se produzca la infestación por la especie plaga. Ello es posible en determinadas especies, cuyo régimen alimenticio lo permite; o bien, viene determinado por la polifagia en relación a sus huéspedes o presas; o también por la competencia intergremial (p.e.: *Orius* - *A. swirskii*, el primero puede



Foto 3. *Rodolia cardinalis*, depredador específico de la cochinilla acanalada (*Icerya purchasi*). Foto 4. *Orius laevigatus*, depredador omnívoro, que controla trips (*Frankliniella occidentalis*), pero que se puede alimentar sobre polen o, mediante competencia intergremial, sobre *Amblyseius swirskii*.



Foto 5. Sistema de aplicación de la lucha biológica en invernaderos, mediante el empleo de plantas reservorio. Foto 6. *Aphidius colemani*, parasitando un pulgón. Enemigo natural empleado en el sistema de plantas reservorio y huésped alternativo.



Foto 7. Dispensador empleado en la lucha biológica para aumentar el número de enemigos naturales.

establecerse, en parte, alimentándose sobre el segundo depredador) (foto 4).

También son técnicas preventivas la bio-propagación, así llamada, que consiste no sólo en la introducción del enemigo natural antes que la plaga, sino que la misma se realiza a nivel de semillero; de esta forma, cuando se lleva a cabo el trasplante, se pone en la parcela la plántula en la que van los huevos del enemigo natural (p.e.: *N. tenuis* en cultivo de tomate), consiguiéndose una más rápida y pronta colonización por el enemigo natural. Ello es sólo factible en enemigos naturales totalmente omnívoros, así como aquéllos que usan el sustrato vegetal para insertar sus huevos dentro de él.

Finalmente, dentro de este apartado, mencionar la técnica de planta reservorio (foto 5), que lleva más tiempo en aplicación. La misma

se fundamenta, por ejemplo en el control de áfidos o pulgones, en la utilización de plantas de gramíneas infestadas con especies plaga que no afectan a cultivos de hoja ancha, pero que son aceptados como huéspedes de parasitoides (p.e.: *Aphidius colemani*) (foto 6); de esta manera, el enemigo natural está presente en el invernadero antes de la infestación por el pulgón plaga del cultivo y puede controlar los primeros focos del mismo.

### Técnicas de control curativo

Dentro de las técnicas curativas, que se emplean cuando ya se ha producido la infestación por la plaga, que hasta la fecha son las más empleadas, consisten fundamentalmente en el aumento (foto 7), es decir, en suplir o complementar los enemigos naturales que pudieran estar presentes de forma espontánea en la parcela de cultivo, mediante la realización de liberaciones o sueltas. Las mismas pueden ser inundativas, es decir, se libera un número suficientemente alto de enemigos naturales para que ellos produzcan la mortalidad de la plaga en un corto periodo de tiempo (pocos días). También pueden ser inoculativas, en las que se libera un número muy bajo de enemigos naturales, y serán sus descendientes, en las siguientes generaciones, los que ejercerán el control sobre las poblaciones de la plaga. Evidente-

mente, estos últimos métodos son de mucho menor coste, especialmente si el enemigo natural puede colonizar el cultivo y permanecer durante todo el ciclo del mismo. Por el contrario, presenta más complejidad técnica para saber el momento oportuno y la cantidad a liberar; ya que sus resultados se expresan a largo plazo (varias semanas); aunque una vez establecido el enemigo natural, el sistema debe funcionar *per se*, sin más intervenciones, salvo interferencias por productos fitosanitarios o de otro tipo.

### Técnicas de conservación

Finalmente, respecto a las técnicas de conservación de enemigos naturales, que consisten en realizar las prácticas agronómicas que no perturben, o incluso que aumenten, los enemigos naturales que de forma espontánea aparecen en la parcela de cultivo. Una de las prácticas de mayor incidencia en estos enemigos naturales son los tratamientos fitosanitarios. Sin embargo, hoy día, las materias activas que van apareciendo en el mercado suelen ser cada vez más espe-

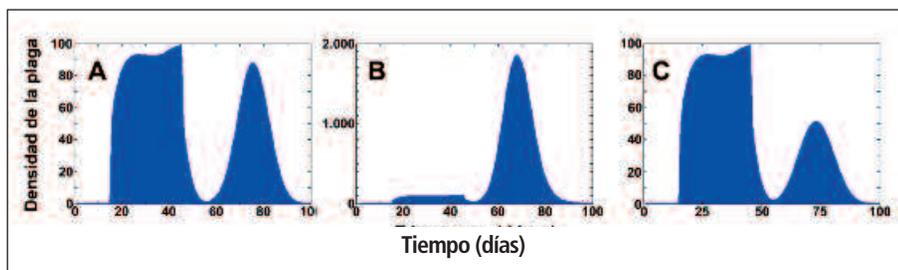
publicidad

1/4 vertical

**Estos modelos nos han permitido por ejemplo conocer que cuando se hacen dos sueltas del tipo inoculativo, se puede observar que manteniendo las mismas dosis del enemigo natural, pero en momentos distintos de liberación, los resultados son bastante diferentes. La mejor situación se da cuando se realizan dos sueltas espaciadas en el tiempo una semana**

FIGURA 1.

Simulación de la evolución de la población de la plaga cuando se realiza las liberaciones del enemigo natural: pronto (dos sueltas en la primera semana y al inicio de la infestación por la plaga) (A), tarde (dos sueltas espaciadas en la segunda semana de infestación) (B) o adecuadamente espaciadas (una suelta en la primera y otra en la segunda semana de infestación) (C).



cíficas sobre la especie plaga y con menos efectos perjudiciales sobre los enemigos naturales.

## Modelos matemáticos y control biológico

Dada la complejidad actual de la lucha biológica en invernaderos, como se ha descrito anteriormente, una herramienta que se considera puede ser de gran utilidad en su aplicación práctica son los modelos matemáticos. En este sentido, hay que indicar que los modelos matemáticos aplicados a enemigos naturales, han tenido un dilatado desarrollo en el tiempo (más de 90 años), desde los primeros trabajos, fundamentalmente teóricos, hasta los más recientes mucho más aplicados. Por lo tanto, son muchos los modelos existentes con diferentes expresiones en ecuaciones matemáticas. Dentro de ellos, hay dos grandes grupos, consecuencia de las diferentes características biológicas y/o ecológicas: aquéllos que se aplican a especies depredadoras o aquéllos que lo hacen a especies de parasitoides. A modo de ejemplo, pero dentro de los más clásicos y también más sencillos, podemos citar el modelo de Lotka-Volterra para el sistema presa - depredador (Hawkins y Cornell, 2004), cuyas fórmulas de aplicación se muestran en la **expresión 1**.

Expresión 1:

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N - a \cdot P \cdot N$$

$$\frac{dP}{dt} = f \cdot a \cdot P \cdot N - m \cdot P$$

donde  $N$  y  $P$  representan las densidades, dentro de una determinada área, de la presa (fitófago plaga) y del depredador respectivamente; a su vez, sus derivadas respecto al tiempo, denotan las velocidades de cambio en las poblaciones de cada uno de ellos;  $r$  la tasa intrínseca de crecimiento de la presa o número de hijas descendientes por madre y unidad de tiempo;  $a$  es la eficacia del depredador (tasa de depredación);  $f$ , la tasa de reproducción del depredador por cada presa consumida (equivalente a la transformación de la biomasa de presa en biomasa del enemigo natural) y  $m$  la tasa de mortalidad natural del depredador.

Para el caso de huésped-parasitoide uno

de los modelos más clásicos y utilizados es el de Nicholson y Bailey (Hawkins y Cornell, 2004), mostrada en la **expresión 2**.

Expresión 2:

$$\frac{dH}{dt} = R_0 \cdot H \cdot e^{-\alpha \cdot P}$$

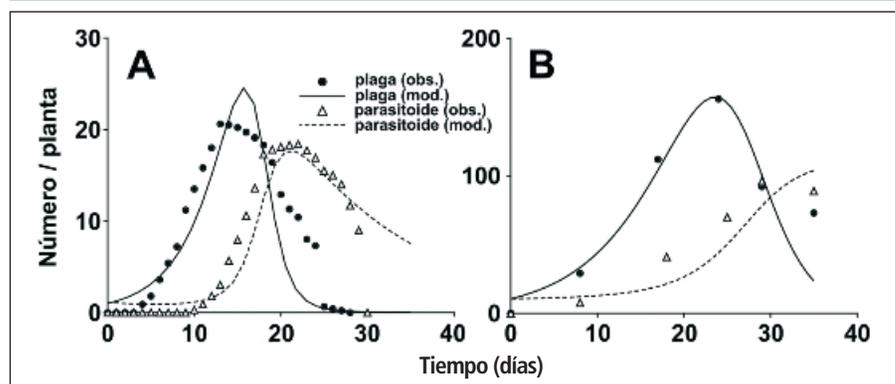
$$\frac{dP}{dt} = H \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot P})$$

donde  $H$  y  $P$  son la densidad del huésped (plaga) y del enemigo natural (parasitoide),  $R_0$  es la tasa de crecimiento de la población de la plaga, sin el efecto del parasito (es decir, un número de veces que las hembras adultas se incrementa en cada generación) y  $\alpha$  es el área de búsqueda del parasitoide (relacionado con su eficacia).

Los modelos anteriores, por una parte, recogen las características biológicas (tiempos de desarrollo, longevidades y fecundidades de adultos), tanto de la especie plaga como del enemigo natural. Por otra parte, a partir de ellos, se pueden implementar los mismos, y por lo tanto hacerlos más completos y complejos, añadiendo las características antes señaladas en los distintos métodos de lucha biológica que se aplican en cultivos en invernaderos: tiempo fisiológico, estructura de edad de la plaga y enemigo natural, estados atacados por éste, régimen omnívoro del mismo, competencia inter-gremial, etc., para simular y representar de forma más precisa la realidad. En estos temas estamos trabajando en la actualidad, conjuntamente con universidades europeas (p.e.: Gámez et al.,

FIGURA 2.

Modelo matemático aplicado a la evolución de la población de la plaga: minador del tomate (*Tuta absoluta*), cuando se realiza el control biológico mediante el parasitoide oófago (*Trichogramma achaeae*) y el depredador omnívoro (*Nesidiocoris tenuis*) en cultivo de tomate en invernadero: (A) primera y (B) segunda generación de la plaga.



2011 a,b) y, como resultado de dichos trabajos, podemos exponer parte de los resultados mediante los siguientes ejemplos.

### Cómo soltar y en qué momento el enemigo natural

En este primer ejemplo (**figura 1**), se ha construido un modelo con datos reales de la biología del enemigo natural y de la plaga, que simula lo que sucede cuando se hacen dos sueltas del tipo inoculativo (caso bastante real en invernaderos) y en diferentes momentos del tiempo, en relación con el momento de infestación de la plaga dentro del invernadero.

Como se puede observar, manteniendo las mismas dosis del enemigo natural, pero en momentos distintos de liberación, los resultados son bastante diferentes. La mejor situación se da cuando se realizan dos sueltas espaciales en el tiempo una semana (**figura 1c**).

### Evaluación de las actividades de diferentes enemigos naturales

Otro ejemplo, es el caso de *Tuta-Tricho-*

*gramma-Nesidiocoris*, en cultivo de tomate en invernadero. En el mismo se aplican al mismo tiempo los dos modelos antes reseñados: depredador-presa (*N. tenuis-T. absoluta*) y huésped-parasitoide (*T. absoluta-T. achaeae*), en la misma escala de tiempo fisiológico. Existe, por tanto, una competencia por la especie plaga, en estado de huevo, entre el parasitoide y el depredador.

Los resultados obtenidos indican un buen ajuste del modelo a la primera (**figura 2a**) y a la segunda generación (**figura 2b**) de las poblaciones de la plaga (minador del tomate). De los mismos, se puede concluir, por una parte, que la población de la plaga es regulada por la presencia del parasitoide, con una rápida reducción de las densidades de la misma. A su vez, la presencia del depredador no explica, o no tiene influencia, en la dinámica de la plaga, en la segunda generación de la misma. Consecuentemente, en el sistema plaga-parasitoide-depredador, el principal agente de control de *T. absoluta* es *T. achaeae*; *N. tenuis* juega solo un papel complementario. ●

### Agradecimientos

El presente trabajo está siendo realizado dentro del Programa de Proyectos de Excelencia de la Junta de Andalucía, Consejería de Economía, Innovación y Ciencia, con cofinanciación de Fondos FEDER (referencia: P09-AGR-5000) y el Proyecto de investigación de Hungría OTKA (No. 81279).

### Bibliografía ▼

Blom, J. van der 2010. Applied Entomology in Spanish greenhouse horticulture. Proc. Neth. Entomol. Soc. Meet. 21: 9-17.

Cabello, T.; Cañero R., 1994. Technical efficiency of plant-protection in Spanish greenhouses. Crop Protection, 13: 153-159.

Gómez, M.; Garay, J.; Sebestyén, Z.; López, M.I.; Cabello, 2011 a. Timing of biological pest control by entomo-ecological simulation model. VII Congreso Nacional de Entomología Aplicada. 24-28 Octubre 2011. Baeza. Spain.

Gómez, M.; Sebestyén, Z.; Varga, Z.; Carreño, R.; Cabello, T., 2011 b. Dynamic model for a host-parasitoid interaction of insects. VII Congreso Nacional de Entomología Aplicada. 24-28 Octubre 2011. Baeza. Spain.

Hawkins, B.A.; Cornell, H.V., 2004. Theoretical approaches to biological control. Cambridge Univ. Press. Cambridge: 412 pp.

Lenteren, J.C. van. 2007. Biological control for insect pests in greenhouses: an unexpected success. En: Vicent C., Goettel M.S., Lazarovits G. (Eds.). Biological control: A global perspective. CAB Int. Wallingford: 105-117.

publicidad

1/2 horizontal