

SECCIÓN VIII. CONSERVACIÓN DE LOS AGENTES DE CONTROL BIOLÓGICO EN LOS CULTIVOS

CAPÍTULO 21: PROTEGER A LOS ENEMIGOS NATURALES DE LOS PLAGUICIDAS

PROBLEMAS CON LOS PLAGUICIDAS

Los plaguicidas son usados rutinariamente como la herramienta de primera opción para controlar plagas de cultivos en los Estados Unidos, Europa, Japón y gran parte del mundo desarrollado. Por tanto, los agentes de control biológico generalmente deben coexistir con los plaguicidas o perecer. Cómo pueden ser reforzados los enemigos naturales, sin importar el uso de plaguicidas, es el objetivo de este capítulo. La industria moderna de plaguicidas tiene sus raíces en la Segunda Guerra Mundial, cuando los químicos desarrollaron productos para matar insectos como los mosquitos y los piojos, para proteger a las tropas. El primero y el mejor fue el DDT, el cual salvó miles de vidas al suprimir las explosiones incipientes del tifo (una enfermedad transmitida por piojos) entre los soldados y en los grupos amontonados de civiles desplazados (Cushing, 1957). Inmediatamente después de la guerra, las corporaciones reconocieron que el control químico de plagas era posible y potencialmente era un negocio. La industria de plaguicidas emergente se enfocó en el descubrimiento, producción en masa y comercialización de compuestos químicos para matar insectos y malezas, y para la protección de los cultivos contra las enfermedades. Los nuevos productos fueron muy populares y el uso de los plaguicidas se incrementó rápidamente a finales de los 1940s y en los 1950s. Productos como el DDT, 2-4-D (un herbicida) y captan (un fungicida) revolucionaron la agricultura, al proporcionar a los productores herramientas altamente efectivas para proteger sus cultivos y generaron ganancias a nuevos negocios corporativos, organizados con el propósito explícito de crear plaguicidas para uso de los agricultores y en los hogares. Inicialmente, sólo fueron considerados los beneficios de los plaguicidas – supresión inmediata de las plagas a niveles sin precedente. Formas mejoradas de usar los plaguicidas – mejores formas de formularlos, mejores máquinas para aplicarlos – fueron desarrolladas rápidamente, conforme los nuevos productos llegaban al mercado. Una generación de agricultores creció y para ellos el uso de los plaguicidas sintéticos representó la norma en el control de plagas.

En pocos años, sin embargo, los problemas con estos plaguicidas sintéticos fueron reconocidos por algunos ecólogos previsores (Carson, 1962). Una de las primeras fallas de los plaguicidas fue el desarrollo de poblaciones que, a través de la selección y la evolución, pudieron tolerar dosis de veneno antes letales (*resistencia a los plaguicidas*). Este problema fue reconocido rápidamente pero fue minimizado por el desarrollo de plaguicidas efectivos de reemplazo.

Otro problema que pronto emergió fue el rápido retorno de las poblaciones de plagas asperjadas a niveles dañinos (*resurgencia de la plaga*). Además, nuevos grupos como los tetraníquidos que previamente no eran más que problemas menores, se convirtieron en plagas primarias que requerían tratamiento regularmente (*explosiones de población de plagas secundarias*). La base ecológica de estos dos problemas tomó largo tiempo para ser entendida. Sin embargo, en los 1960s y 1970s, se había demostrado con investigaciones que estos problemas existían debido a la destrucción de enemigos naturales en los campos de cultivo (DeBach, 1974). Por ejemplo, en Japón la aplicación de piretroides sintéticos en huertos de duraznos causó problemas peores con el eriófido *Aculus fockeui* (Napela & Trouessard) por la destrucción del ácaro depredador *Amblyseius eharai* Amitai & Swirski (Kondo y Hiramatsu, 1999).

Conforme el volumen de plaguicidas usados (especialmente insecticidas) se incrementó, también aumentó el contacto entre la vida silvestre, los plaguicidas y sus residuos. El daño a la vida silvestre y la contaminación por plaguicidas se desarrolló como una crisis ambiental importante en los 1960s. Los hidrocarburoclorinados como el DDT afectaron adversamente los sistemas reproductivos de aves rapaces y aves zancudas, causando que pusieran huevos con cascarones anormalmente delgados. Las poblaciones de águilas, halcones, halcones pescadores y de garzas declinaron y aún desaparecieron de grandes áreas, debido a los residuos de plaguicidas estables, solubles en grasas, que circulaban en el ambiente y que contaminaron sus cadenas alimenticias (Graham, 1970).

El problema de los residuos de plaguicidas en el ambiente fue resuelto prohibiendo la mayoría de los plaguicidas clorinados en los 1970s y remplazándolos con organofosforados y carbamatos. Estos nuevos compuestos, sin embargo, realmente eran más tóxicos para los vertebrados y frecuentemente causaron enfermedades en los trabajadores agrícolas. Hubo programas del gobierno en los Estados Unidos durante los 1970s y 1980s para hacer estos compuestos más seguros, entrenando a los agricultores y a sus trabajadores en su uso (programa de entrenamiento del aplicador de plaguicidas US-EPA). En los 1990s, muchos usos de plaguicidas organofosforados y carbamatos se cancelaron en los EU con el objetivo de mejorar la seguridad alimenticia. En respuesta, las compañías de plaguicidas desarrollaron un amplio conjunto de nuevos plaguicidas que eran más seguros para la gente y la vida silvestre. Muchos de estos compuestos también eran, al menos, parcialmente selectivos, permitiendo el aumento en la sobrevivencia de enemigos naturales en los cultivos. Estos eventos ocurrieron en los Estados Unidos pero muchos países siguieron más tarde los mismos pasos.

En este capítulo se discute primero cómo el uso de los plaguicidas puede ser contraproducente al promover explosiones de población de plagas, destrucción de enemigos naturales y desarrollo de resistencia a los plaguicidas. Se revisan las formas en que los plaguicidas pueden causar daño y cómo tales impactos podrían ser reducidos, encontrando y usando *plaguicidas fisiológicamente selectivos*. Se muestra cómo, en algunos casos, aún compuestos no selectivos pueden actuar como selectivos al modificar sus formulaciones o el tiempo, lugar o forma de aplicación (*selectividad ecológica*). Finalmente, se describe cómo el uso de cultivos modificados genéticamente que expresan toxinas de la bacteria *Bacillus thuringiensis* Berliner, han hecho que algunos cultivos sean considerablemente más favorables para los enemigos naturales.

SUPERPLAGAS Y AUSENCIA DE ENEMIGOS NATURALES

RESISTENCIA A PLAGUICIDAS

La resistencia a plaguicidas se desarrolla porque los individuos en la población que son más tolerantes a la exposición al producto son los que sobreviven y se reproducen, dejando sus genes mejor representados en la siguiente generación. Los mecanismos de resistencia a plaguicidas incluyen entre otros la detoxificación reforzada y la penetración cuticular reducida en los insectos. Las poblaciones de plagas pueden desarrollarse por varias generaciones hasta que ya no pueden ser fácilmente eliminadas por uno o más plaguicidas. Muchos insectos, malezas y patógenos de plantas se volvieron resistentes a los plaguicidas después de 1945, algunos a muchos plaguicidas (Brent, 1987; Georghiou y Lagunes-Tejeda, 1991) (Brent, 1987; Georghiou y Lagunes-Tejeda, 1991) (**Figura 21-1**).

Las características clave que afectan el desarrollo de la resistencia a plaguicidas incluyen la proporción de la población que está expuesta al plaguicida y la intensidad de cualquier pérdida de habilidad (en ausencia de plaguicidas) que viene junto con la resistencia a los plaguicidas. La proporción de la población en desarrollo de una plaga que está expuesta a un plaguicida difiere por muchas razones, incluyendo su ocurrencia en hospederos fuera del cultivo y el nivel de tratamiento aplicado al cultivo. La mosca de la manzana *Rhagoletis pomonella* (Walsh), por ejemplo, no desarrolla resistencia a los productos comúnmente usados en los huertos como el azinfosmetil (después de 40 años de uso) porque la población en desarrollo de esta mosca ocurre en áreas no tratadas y sobre hospederos silvestres. En contraste, el escarabajo de la papa de Colorado *Leptinotarsa decemlineata* (Say), rápida y repetidamente desarrolló resistencia en el este de los Estados Unidos, en parte porque virtualmente no había ya hospederos silvestres y porque tiende a invernar cerca de los campos de papa (ver p. ej., French *et al.*, 1992). Muchos plaguicidas tienen una química similar, por lo que una plaga resistente a un miembro de una clase (como los carbamatos) es posible que sea resistente a otros (*resistencia cruzada*).

Cuando las plagas desarrollan resistencia, los agricultores pueden responder incrementando las dosis, cambiando o alternando plaguicidas o combinándolos. Ellos pueden abandonar el control químico completamente a favor de sistemas de manejo basados en

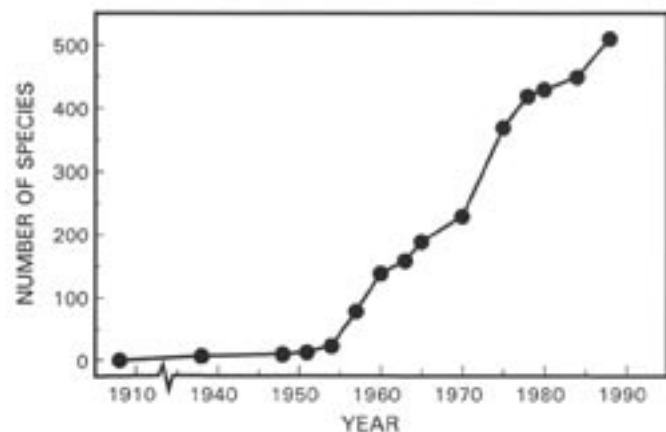


Figura 21-1. Número acumulado de casos de resistencia a plaguicidas en artrópodos (Según Georghiou y Lagunes-Tejeda, 1991; reimpreso de Van Driesche, R. G. y T. S. Bellows, *Biological Control*, 1996. Kluwer, con permiso.)

control biológico, incluyendo la conservación de enemigos naturales, si la resistencia evita el control de la plaga. Alternativamente, si son los enemigos naturales los que desarrollan resistencia a los plaguicidas, puede ser posible que los conserven en el cultivo aún con el uso continuo de plaguicidas.

HORMOLIGOSIS

Otra influencia posible de los compuestos químicos sobre las poblaciones de plagas es la *hormoligosis*. Este término se aplica cuando dosis subletales de plaguicidas o altos niveles de fertilización del cultivo inducen tasas reproductivas más altas de la plaga, tiempos de desarrollo más cortos o un cambio a una reproducción temprana. La fecundidad del trips

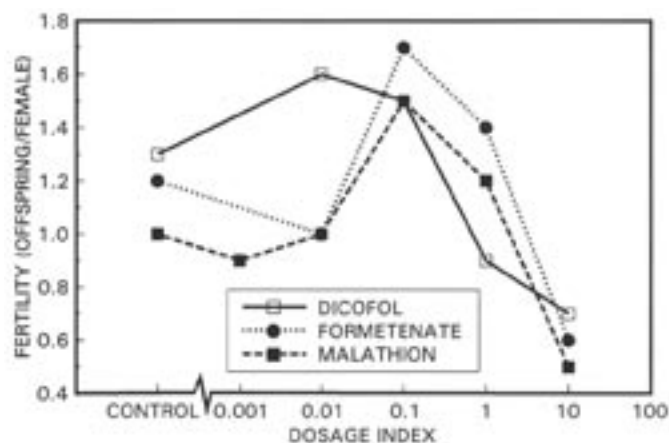


Figura 21-2. Fertilidad del trips de los cítricos *Scirtothrips citri* (Moulton), afectada por la dosis de tres plaguicidas. A dosis bajas, la fertilidad no fue diferente de la del testigo; a dosis altas, la fertilidad se redujo pero a dosis intermedias, la fertilidad fue significativamente mayor que en el testigo. (Según Morse y Zareh, 1991: *Journal of Economic Entomology* 84: 1169-1174; reimpresso Van Driesche, R. G. y T. S. Bellows, *Biological Control*, 1996. Kluwer, con permiso.)

de los cítricos *Scirtothrips citri* (Moulton) aumentó significativamente cuando los trips fueron criados en hojas con residuos de dicofol de 21 días y con residuos de malathion de 32, 41 y 64 días (Morse y Zareh, 1991) (Figura 21-2). Lowery y Sears (1986) encontraron que el tratamiento de adultos del áfido verde del durazno *Myzus persicae* (Sulzer) con dosis subletales de azinfosmetil, aumentaron su fecundidad de 20-30%. Para algunos artrópodos chupadores como los tetraníquidos, los niveles altos de nitrógeno de la fertilización pueden causar tasas de sobrevivencia más altas, crecimiento más rápido y aumento en la fecundidad (van de Vrie y Boersma, 1970; Hamai y Huffaker, 1978; Wermelinger *et al.*, 1985).

RESURGENCIA DE LA PLAGA

Un rápido retorno de las plagas a niveles dañinos a veces resulta por el uso rutinario de plaguicidas de amplio espectro. Este fenómeno se llama *resurgencia de la plaga* y ocurre porque los enemigos naturales a menudo son más sensibles a los plaguicidas que las plagas a las que atacan (Croft, 1990). Esto puede ser debido a menores niveles de enzimas detoxificadoras o a una mayor tasa de superficie corporal en relación con la masa (que conduce a una mayor absorción relativa de residuos por unidad de peso corporal). Si los parasitoides y depredadores que normalmente atacan una plaga son destruidos, las plagas que sobrevivan a la aplicación de plaguicidas como consecuencia vivirán más tiempo y tendrán más descendencia. Esto conduce a que las cantidades de plaga lleguen rápidamente a niveles altos. La resurgencia de las plagas ha sido observada en diversos cultivos y en muchos tipos de plagas (Gerson y Cohen, 1989; Buschman y DePew, 1990; Talhouk,

1991; Holt *et al.*, 1992). Uno de los ejemplos más diseminados y dramáticos ha sido el de *Nilaparvata lugens* (Stål), un saltahoja que se encuentra en arroz cultivado en Asia (Figura 21-3) (Heinrichs *et al.*, 1982).

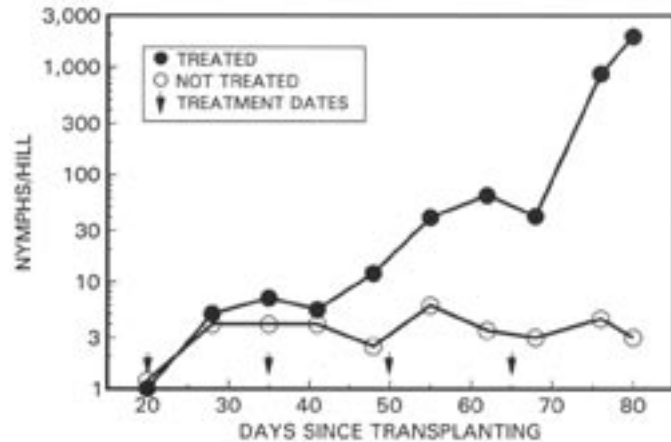


Figura 21-3. Resurgencia del saltahoja café del arroz, *Nilaparvata lugens* (Stål), en campos de arroz tratados con insecticidas, en comparación con campos sin tratamiento. (Según Heinrichs *et al.*, 1982: *Environmental Entomology* 11: 78-84; reimpresso de Van Driesche, R. G. y T. S. Bellows, *Biological Control*, 1996. Kluwer, con permiso.)

EXPLOSIÓN DE POBLACIONES DE PLAGAS SECUNDARIAS

Otro fenómeno asociado con el uso de insecticidas y acaricidas de amplio espectro es el rápido aumento de poblaciones de insectos y ácaros que normalmente no son plagas. Estas situaciones ocurren porque los plaguicidas destruyen a los enemigos naturales que suprimen a estas especies a bajas densidades (Figura 21-4). Este fenómeno es llamado *explosión de la población de plagas secundarias*. Los tetraníquidos, escamas y minadores de hojas son ejemplos de dichas plagas secundarias o creadas por los plaguicidas (Luck y Dahlsten, 1975; Van Driesche y Taub, 1983; DeBach y Rosen, 1991). Las explosiones de población de las plagas secundarias difieren de la resurgencia, en que las aplicaciones de plaguicidas causantes no son dirigidas a la plaga secundaria sino a una plaga primaria del cultivo. Desde la perspectiva del agricultor, aparecen en el cultivo nuevas especies de plagas que antes no eran importantes. El sistema de cultivo denominado Manejo Integrado de Plagas (MIP), tiene que ser aumentado entonces para incluir controles para las nuevas plagas. El tratamiento de plantas ornamentales para reducir larvas de lepidópteros o áfidos, por ejemplo, a menudo es seguido por el aumento de tetraníquidos.

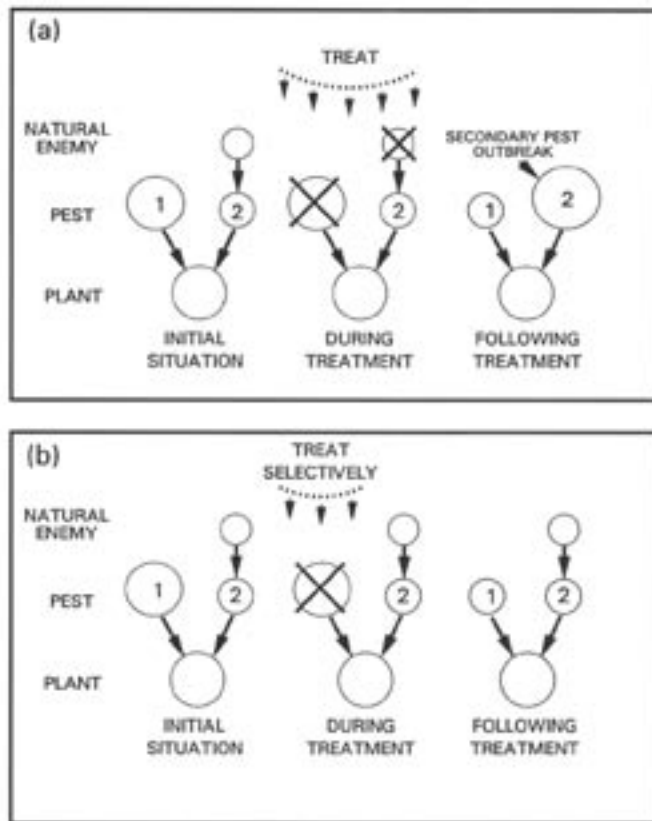


Figura 21-4. Diagrama conceptual de la explosión de población de una plaga secundaria. En (a) un plaguicida general afecta a la plaga (especie 1) y también al enemigo natural que limita a la especie 2. Después del tratamiento, el crecimiento de la población de la especie 2 llega a nivel de plaga, en ausencia de sus enemigos naturales. En (b) un plaguicida selectivo afecta solamente a la plaga a controlar, resultando una situación donde el control natural de la especie 2 no es perturbado y no hay explosión de población de la plaga secundaria. (Reimpreso de Van Driesche, R. G. y T. S. Bellows, *Biological Control*, 1996. Kluwer, con permiso.)

VIDA SILVESTRE MUERTA Y RESIDUOS DE PLAGUICIDAS EN ALIMENTOS

Aunque los problemas causados por los plaguicidas no son el propósito de este libro, es importante recalcar su severidad porque históricamente han sido y todavía siguen siendo, una de las principales razones por las que la sociedad cambió a controles alternativos de plagas como el control biológico.

ENVENENAMIENTO DE LA VIDA SILVESTRE

Desde 1945 hasta cerca de 1980, el envenenamiento de la vida silvestre por plaguicidas en los Estados Unidos y muchos otros países fue comentado frecuentemente como para convertirse

en un problema ambiental que resultó en cambios en las leyes de los plaguicidas (ver p. ej., Hardy *et al.*, 1986). Algunos envenenamientos ocurrieron cerca del sitio de aplicación e incluyeron (1) muertes de aves por la ingestión de semillas tratadas con mercurio o con dieldrín (Hardy *et al.*, 1986), (2) muertes de peces por la deriva y la corriente de ríos o estanques adyacentes a las áreas tratadas (Trotter *et al.*, 1991) y (3) muerte secundaria debido al uso de materiales como el fluoroacetato de sodio, usado para matar vertebrados plaga. Otras muertes de vida silvestre ocurrieron en una forma más difusa, tal como la disminución de los niveles de la enzima acetilcolinesterasa (necesaria para las funciones normales de los nervios) en aves canoras, en bosques tratados con plaguicidas carbámicos u organofosforados (Mineau, 1991). Las aves con niveles enzimáticos disminuidos no murieron en masa, sino que perecieron, diseminadas en el paisaje, por causa de su inhabilidad para alimentarse apropiadamente debida a la pérdida de funciones nerviosas.

Otras poblaciones de vida silvestre declinaron por los residuos de plaguicidas ampliamente diseminados que interfirieron en la fisiología reproductiva o porque produjeron anomalías sexuales o en el desarrollo. El adelgazamiento de los cascarones de huevos en aves rapaces y en otros grupos de aves, por ejemplo, causaron que algunas especies desaparecieran de grandes áreas (Burger *et al.*, 1995). El Tributyltin usado en las pinturas para las embarcaciones causó la feminización en moluscos marinos (Horiguchi *et al.*, 2004). En los 1990s ocurrieron deformidades de extremidades y disminución de poblaciones de muchos anfibios en muchas áreas por razones inciertas aunque se cree que estas razones incluyen efectos de los residuos de plaguicidas (Ankley *et al.*, 1998).

RESIDUOS EN ALIMENTOS Y EN EL MEDIO AMBIENTE

Pequeñas cantidades de algunos plaguicidas rutinariamente se trasladaron desde las áreas tratadas hacia el suelo, agua, aves y animales silvestres. Estos residuos pueden acumularse si persisten. La presencia ampliamente diseminada del DDT en la grasa humana, peces silvestres y en otras fuentes (Reimold y Shealy, 1976; Jaga y Dharmani, 2003) y la ocurrencia de los herbicidas triazinas (como la atrazina) en los ríos y el agua del subsuelo en las áreas productoras de maíz (Pfeuffer y Rand, 2004), son buenos ejemplos. Las consecuencias de los residuos de plaguicidas en el medio ambiente varían desde ninguna hasta consecuencias serias.

Los residuos de plaguicidas en alimentos y agua para beber no están prohibidos por las leyes que gobiernan el uso de plaguicidas pero la contaminación no debe exceder los límites legales. El debate social sobre si cualquier nivel de plaguicidas es aceptable en los alimentos ha sido un factor que contribuye al aumento de popularidad de los alimentos orgánicos, los cuales son producidos sin usar la mayoría de los plaguicidas.

Un debate actual en relación a los residuos de plaguicidas es si los niveles de partes por billón (ahora posibles de detectar y rastrear, debido a las mejoras en la química analítica) de algunos compuestos son inocuos, como tradicionalmente se había creído. Algunos plaguicidas se asemejan a las hormonas de los vertebrados, por lo que el temor es que estos residuos puedan interferir con la función hormonal, conduciendo a anomalías sexuales y del desarrollo (Bustos-Obregon, 2001; Palanza y vom Saal, 2002).

ENFERMEDADES DE LOS APLICADORES

En los 1970s, para limpiar residuos ambientales de hidrocarburoclorinados, otros grupos de insecticidas (organofosforados y carbamatos) sustituyeron a materiales como el DDT. Sin embargo, muchas de estas nuevas toxinas nerviosas realmente eran mucho más tóxicas para la gente que los clorinados a los que remplazaron. El uso de estos materiales, especialmente por aplicadores poco entrenados, resultó en el envenenamiento de muchas personas (Graham, 1970; Metcalf, 1980; Dempster, 1987; Newton, 1988). El envenenamiento accidental y la contaminación fueron especialmente posibles cuando los agricultores no entendían la toxicidad de los materiales que estaban usando, cuando no podían leer las instrucciones del producto o porque no tenían o no usaban el equipo protector necesario. La legislación promulgada en los Estados Unidos durante los 1970s que requería el entrenamiento de seguridad de los aplicadores de plaguicidas, redujo significativamente la frecuencia de accidentes y del mal uso de los plaguicidas. Sin embargo, el entrenamiento del aplicador y el equipo protector no están disponibles consistentemente en todos los países. Un agricultor que no puede leer no puede beneficiarse de la información de seguridad que está en la etiqueta del producto. Un agricultor pobre no puede comprar dispositivos protectores como las mascarillas o ropa especial para la aplicación de plaguicidas. Aunque las historias personales son sólo eso, el autor principal recuerda a los agricultores de papa andinos descalzos, con los brazos descubiertos, aplicando Temik concentrado manualmente en los hoyos preparados para plantar papas, lo cual permanece como un vívido recuerdo personal de que los plaguicidas tienen riesgos reales para la gente en muchas partes del mundo. Los problemas de plaguicidas han disminuido claramente en Estados Unidos en los últimos 40 años pero no en el mismo a nivel mundial. Más bien, los plaguicidas ahora son de uso común en muchos países donde eran desconocidos hace 40 años.

CASOS EN LOS QUE LOS PLAGUICIDAS SON LA MEJOR HERRAMIENTA

A pesar de las deficiencias de los plaguicidas indicadas anteriormente, hay circunstancias en las que son claramente superiores a otras formas de control de plagas, como por ejemplo, para controlar vectores de enfermedades humanas o animales como la malaria, la enfermedad de Lyme, la peste bubónica y el tifo. El control biológico puede jugar un papel en el manejo de algunos de estos problemas (como en el control de larvas de mosquitos) pero a menudo el manejo de estos programas se basa en el uso de plaguicidas. Otros usos críticos de los plaguicidas incluyen la erradicación de plagas invasoras, cuando son detectadas pronto. Se han usado plaguicidas, por ejemplo, para erradicar la mosca de la fruta del Mediterráneo *Ceratitis capitata* (Wiedemann) y el alga marina *Coleurpa taxifolia* (Vahl) C. Agardh en California, EU, y juegan un papel en la contención/erradicación del barrenador asiático *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky) en Nueva York y Chicago (EU), matando a los escarabajos antes de que escapen a los bosques naturales. El alto impacto y el rápido efecto de los plaguicidas, junto con la posibilidad de ser aplicados con precisión, los hace la herramienta adecuada en los esfuerzos de erradicación.

En los cultivos, algunas clases de plagas establecidas también son mejor manejadas con plaguicidas. Entre ellas están las plagas con niveles de daño permitido extremadamente bajo

(p. ej., plagas de las frutas), plagas que son vectoras de enfermedades de los cultivos y las plagas para las que las opciones del control biológico no son efectivas. Finalmente, los plaguicidas comúnmente proporcionan respaldo a los controles biológico y cultural, los que a veces pueden fallar o ser insuficientes.

¿CÓMO AFECTAN LOS PLAGUICIDAS A LOS ENEMIGOS NATURALES?

Los insecticidas pueden reducir la efectividad de los enemigos naturales de los artrópodos, causando mortalidad o influyendo en su movimiento, búsqueda o en la tasa reproductiva (Jepson, 1989; Waage, 1989; Croft, 1990).

MORTALIDAD DIRECTA

Muchos plaguicidas son tóxicos directamente para los enemigos naturales importantes de los artrópodos plaga (Bartlett 1963, 1964b, 1966; Bellows y Morse, 1993; Bellows *et al.*, 1985, 1992a; Morse y Bellows, 1986; Morse *et al.*, 1987). Algunos plaguicidas pueden ser tóxicos para especies no sugeridas por la categoría del producto. Un repelente de aves puede ser insecticida. Un fungicida puede matar artrópodos (p. ej., el azufre daña a los ácaros fitoseidos) o afectar su reproducción o su movimiento (los fungicidas ditiocarbámicos que reducen la tasa de reproducción de los fitoseidos). Los herbicidas pueden matar a los nemátodos benéficos aplicados para el control de insectos (ver Forschler *et al.*, 1990). Por tanto, es importante asumir que, hasta que estén disponibles los datos que demuestren lo contrario, cualquier plaguicida de cualquier tipo podría afectar a un enemigo natural (Hassan, 1989). Aún materiales que a menudo se piensa que no son tóxicos, como los jabones o los aceites, que pueden ser seguros para los humanos, pueden ser dañinos para los enemigos naturales o causar daño ambiental. Los aceites, por ejemplo, cuando son aplicados contra escamas, es posible que reduzcan la emergencia de los parasitoides de las escamas así como causar mortalidad a las escamas (Meyer y Nalepa, 1991).

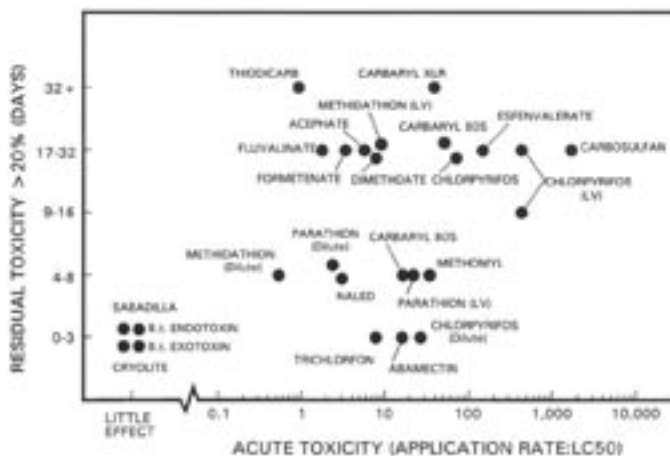


Figura 21-5. Toxicidad para *Aphytis melinus* (DeBach) de los plaguicidas usados en la citricultura. El eje horizontal es la toxicidad inmediata (aguda) en las hojas de los residuos recientemente depositados y el eje vertical es la longitud de la toxicidad residual. Notar el amplio rango de la toxicidad aguda y de la longitud de la acción residual. (Según Bellows y Morse, 1993: *The Canadian Entomologist* 125: 987-994; reimpresso de Van Driesche, R. G. y T. S. Bellows, *Biological Control*, 1996. Kluwer, con permiso.)

El grado de mortalidad causada por un plaguicida a la población de un enemigo natural dependerá de factores fisiológicos y ecológicos. La selectividad fisiológica implica una toxicidad intrínseca diferencial del compuesto en la plaga y en el enemigo natural. Los compuestos químicos varían significativamente en su toxicidad inherente a una especie dada (**Figura 21-5**) (Jones *et al.*, 1983; Smith y Papacek, 1991). Algunos materiales que son efectivos

contra plagas pero relativamente inocuos para los enemigos naturales artrópodos han sido descubiertos (ver www.koppert.com y consultar la “Side Effects List” para los ejemplos).

La selectividad ecológica resulta de cómo es formulado y aplicado un plaguicida. Cualquier factor que reduzca el contacto del enemigo natural con el plaguicida puede conferir selectividad ecológica. Los materiales que, por ejemplo, tienen residualidad corta después de la aplicación o que actúan solamente como venenos estomacales, pueden ser ecológicamente selectivos. Los materiales no selectivos pueden ser usados selectivamente si son aplicados en patrones espaciales o en épocas que limitan el contacto con los enemigos naturales.

DAÑO NO LETAL

Además de sufrir el aumento en la mortalidad, los enemigos naturales pueden llegar a ser menos efectivos, después del uso de plaguicidas, si las dosis subletales acortan su longevidad, disminuyen sus tasas de desarrollo, reducen la eficiencia de su búsqueda, son repelentes o disminuyen la reproducción. Algunos tipos de efectos indirectos pueden ser detectados en los ensayos de laboratorio (Croft 1990; Van Driesche *et al.*, 2006).

FECUNDIDAD REDUCIDA

Algunos plaguicidas no matan plagas pero disminuyen su reproducción (ver p. ej., Van Driesche *et al.*, 2006). Hislop y Prokopy (1981) encontraron que el fungicida benomyl causó esterilidad completa a las hembras del ácaro depredador *Neoseiulus fallacis* (Garman) y predijeron que el uso del benomyl en huertos de manzanas causaría explosiones de población de los ácaros, lo cual sucedió. Los fungicidas metiltiofanato y carbendazim inhibieron la oviposición de *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot (Dong y Niu, 1988). Varios reguladores del crecimiento de insectos redujeron la fecundidad de coccinélidos o esterilizaron sus huevos (Hattingh y Tate, 1995, 1996).

REPELENCIA

Algunos materiales que no son tóxicos directamente para ciertos enemigos naturales pueden hacer repelentes las superficies tratadas o los hospederos, causando que los enemigos naturales se alejen. Los herbicidas diquat y paraquat, por ejemplo, hicieron que los suelos tratados en viñedos fueran repelentes al ácaro depredador *Typhlodromus pyri* (Scheuten) (Boller *et al.*, 1984). Hoddle *et al.* (2001b) encontraron que, entre varios reguladores del crecimiento de insectos, sus residuos secos formulados con destilados de petróleo fueron repelentes al parasitoide de moscas blancas *Eretmocerus eremicus* Rose & Zolnerowich, mientras que los materiales formulados como polvos mojables no lo fueron.

ACUMULACIÓN DE DOSIS SUBLETALES

Además de lo anterior, los enemigos naturales también pueden sufrir daño por la acumulación de pequeñas cantidades de plaguicidas, hasta que se alcanza el umbral letal. Para encontrar a los sobrevivientes de una aplicación de plaguicidas, los enemigos

naturales pueden tener que buscar en más follaje, incrementando su exposición a los residuos de plaguicidas. La acumulación también puede ocurrir si los depredadores se alimentan de presas que han ingerido cantidades subletales de plaguicidas. Por ejemplo, *Rodolia cardinalis* (Mulsant) en cítricos, puede ser afectada si se alimenta de muchos individuos de la escama *Icerya purchasi* Maskell, cada uno de las cuales puede contener una pequeña cantidad de plaguicida (Grafton-Cardwell y Gu, 2003).

BÚSQUEDA DE SOLUCIONES: SELECTIVIDAD FISIOLÓGICA

Un enfoque para limitar el daño de los plaguicidas a los enemigos naturales, es usar solamente materiales que maten a la plaga y que sean relativamente inocuos para los enemigos naturales en cuestión. Si es factible, la sustitución de un plaguicida químico (ver Capítulo 24) por uno microbial, puede favorecer a los cultivos u otras sitios que sirven de habitat para depredadores o parasitoides. Por ejemplo, cuando las aplicaciones del hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana* (Saccardo) Petch reemplazaron los tratamientos con piretrinas para el control de moscas en gallineros, el número de moscas caseras adultas (*Musca domestica* L.) disminuyó y el de larvas se redujo a la mitad. Esta reducción al parecer resultó de mayores poblaciones de los escarabajos histéridos depredadores, que se incrementaron en 43-66% (dependiendo de su estado de vida) después que *B. bassiana* reemplazó a las piretrinas (Kaufman *et al.*, 2005).

Alternativamente, debe hacerse una búsqueda de los plaguicidas químicos convencionales más compatibles, empezando con un enfoque en materiales como los venenos estomacales (en lugar que los de contacto) o de reguladores del crecimiento de insectos. Más allá de dichos grupos, los plaguicidas más convencionales varían en su toxicidad para los enemigos naturales. Sin embargo, probar el efecto de los plaguicidas disponibles para un cultivo en particular en los enemigos naturales locales, aunque es valioso, comúnmente no se hace porque (1) el pequeño número de plaguicidas registrados para un cultivo específico puede evitar el éxito, (2) los datos generados carecen de amplia aplicación ya que el grupo de plaguicidas registrados varía por cultivo y país, y (3) los enemigos naturales de interés variarán por cultivo y país, y porque la toxicidad de un plaguicida hacia un enemigo natural no predice su toxicidad hacia otro (Bellows y Morse, 1993). Aún poblaciones del mismo enemigo natural, colectado en diferentes localidades, puede diferir en su susceptibilidad a un plaguicida (Rosenheim y Hoy, 1986; Rathman *et al.*, 1990; Havron *et al.*, 1991). Sólo la evaluación local de las principales combinaciones de enemigo natural-plaguicida en un cultivo, definirán los materiales que podrían ser usados con seguridad. Dicha evaluación fue efectuada, por ejemplo, para encontrar materiales que eliminaran al saltahoja café pero que no afectara a las arañas, en arroz de las Filipinas (Thang *et al.*, 1987). Los datos sobre los efectos de los plaguicidas en los enemigos naturales no son requeridos como parte del registro de plaguicidas, excepto en la Unión Europea.

La medida más común utilizada para expresar la susceptibilidad a un plaguicida es la *CL*₅₀, que es la concentración de la solución aplicada a una superficie tratada que mata la mitad de los organismos probados durante un período de tiempo (usualmente 24 o 48 h). La proporción de los valores de la *CL*₅₀ del enemigo natural y de la plaga, o la del enemigo natural y la tasa de aplicación recomendada para un plaguicida, es una medida comparativa útil

de la selectividad de un plaguicida (Morse y Bellows, 1986; Bellows y Morse, 1993). Algunos plaguicidas son altamente tóxicos a los enemigos naturales solamente poco después de la aplicación mientras que otros de toxicidad variable pueden ser extremadamente persistentes. Las pruebas con residuos a diferentes tiempos después de la aplicación, son necesarias para definir por cuanto tiempo un enemigo natural determinado estará en peligro por la aplicación de un plaguicida (Bellows *et al.* 1985; Morse *et al.*, 1987). La evaluación del desempeño del enemigo natural (su habilidad para encontrar y vencer a su presa con éxito o para localizar y ovipositar en sus hospederos) es un mejor indicador del efecto total de los residuos de plaguicidas que la mortalidad porque también incorpora los efectos subletales de los plaguicidas en los enemigos naturales.

Los métodos para evaluar la compatibilidad de los plaguicidas con los enemigos naturales van desde pruebas de laboratorio y de semi-campo hasta estudios de campo (ver Vogt, 1994). Los métodos de laboratorio incluyen el tratamiento de los enemigos naturales a través de la ingestión de plaguicidas o de materiales tratados con plaguicidas, la aplicación tópica y la colocación de enemigos naturales en superficies con residuos de plaguicidas. Los resultados de la prueba son útiles en las condiciones precisas seleccionadas para el ensayo (edad del insecto, sexo, tipo de cría, temperatura, humedad relativa y ventilación del ambiente donde se hizo la prueba, además de la formulación, pureza y dosis del material probado) (Croft, 1990). Las metodologías estándar han sido desarrolladas (Hassan, 1977, 1980, 1985, 1989; Hassan *et al.*, 1987; Morse y Bellows, 1986; Vogt, 1994). Algo esencial para todas las pruebas, es la comparación de la plaga y el enemigo natural bajo las mismas condiciones, para determinar si existen diferencias en la susceptibilidad.

Los métodos incluyen la técnica del portaobjetos mojado, en la cual pequeños organismos como los ácaros son fijados en una cinta adhesiva sobre un portaobjetos de vidrio y después se mojan en una solución de plaguicida. Para otras especies, los residuos de plaguicidas pueden ser presentados en frasquitos, o en cajas de Petri de vidrio, arena u hojas. Si son presentados en follaje, los materiales vegetales pueden ser rociados en el laboratorio o en campo, y después expuestos a insectos en jaulas de tamaño variable, ya sea una vez que la solución rociada se seque o después de un tiempo bajo condiciones de campo o condiciones de laboratorio estandarizadas. Las pruebas de campo involucran la evaluación del impacto en las poblaciones de enemigos naturales, cuando cultivos o parcelas completas son tratados con plaguicida. A menudo son necesarias parcelas grandes (con repeticiones al paso del tiempo) en las pruebas de campo porque los enemigos naturales se pueden movilizar entre las parcelas pequeñas, resultando en una pobre separación de los efectos del tratamiento (Brown, 1989; Smart *et al.*, 1989).

En general, los enemigos naturales son sensibles a los plaguicidas pero algunos grupos como las crisopas del género *Chrysoperla* (Neuroptera: Chrysopidae) son muy tolerantes a los plaguicidas (ver p. ej., Grafton-Cardwell y Hoy, 1985). Además, los ácaros y otros enemigos naturales pueden desarrollar resistencia a los plaguicidas a través de la selección en cultivos de campo que tengan una larga historia de aplicación de plaguicidas.

ENEMIGOS NATURALES RESISTENTES A PLAGUICIDAS

Las poblaciones de enemigos naturales resistentes a plaguicidas a veces han desarrollado dicha resistencia a través de selección natural, en cultivos regularmente asperjados como los manzanos. Poblaciones resistentes también pueden ser creadas artificialmente en laboratorio. Se han encontrado (o seleccionado) poblaciones resistentes a plaguicidas en varios ácaros depredadores: *Metaseiulus occidentalis* (Nesbitt) (Croft, 1976; Hoy *et al.*, 1983), *P. persimilis* (Fournier *et al.*, 1988), *T. pyri* y *Amblyseius andersoni* (Chant) (Penman *et al.*, 1979, Genini y Baillod, 1987) y *Neoseiulus fallacis* (Garman) (Whalon *et al.*, 1982). Los parasitoides resistentes a plaguicidas incluyen al parasitoide de áfidos *Trioxys pallidus* Haliday (Hoy y Cave, 1989), al parasitoide de minadores de hojas *Diglyphus begini* (Ashmead) [Rathman *et al.*, 1990] y a algunos que atacan escamas, como *Aphytis holoxanthus* DeBach (Havron *et al.*, 1991) y *Aphytis melinus* DeBach (Rosenheim y Hoy, 1986).

Algunos enemigos naturales resistentes a plaguicidas han sido llevados a nuevas localidades para establecerlos donde se requieren aplicaciones regulares de plaguicidas. El establecimiento inicial de razas resistentes puede ser fomentado por la previa destrucción con plaguicidas de las poblaciones susceptibles de la misma especie (Hoy *et al.*, 1990). Generalmente, la persistencia por varios años de la raza resistente es necesaria para el uso efectivo en cultivos de exteriores. Esto ha sido logrado en algunos campos o en huertos comerciales donde se han hecho aplicaciones de plaguicidas (Hoy, 1982; Hoy *et al.*, 1983; Caccia *et al.*, 1985). La aplicación regular de plaguicidas es necesaria para evitar el entrecruzamiento de la raza resistente con los tipos silvestres susceptibles y para prevenir el desplazamiento de la población resistente (Downing y Moilliet, 1972). Las pruebas en el Reino Unido con una raza de *T. pyri* resistente a organofosforados, demostraron la sobrevivencia del depredador en las huertas tratadas con insecticidas organofosforados, a niveles suficientes para controlar a *Panonychus ulmi* (Koch) y a *Aculus schlechtendali* (Nalepa). En una huerta tratada con piretroides (un plaguicida al que esta raza no era resistente), la raza de *T. pyri* resistente fue escasa y no controló a los ácaros plaga (Solomon *et al.*, 1993).

Hay menos presión evolutiva contra las razas resistentes usadas en programas de control aumentativo en invernaderos porque típicamente no hay poblaciones susceptibles presentes con las que los agentes liberados pudiesen cruzarse, y los agentes resistentes pueden ser liberados de nuevo conforme se necesiten. Se ha encontrado que las razas resistentes de *P. persimilis* en cultivos de invernadero persisten durante la vida del cultivo (Fournier *et al.*, 1988). El nemátodo *Heterorhabditis bacteriophora* Poinar ha sido seleccionado para resistir a los nematocidas comunes como la avermectina, permitiendo que sean usados cuando los cultivos deben ser tratados para el control de nemátodos fitoparásitos (Glazer *et al.*, 1997).

Los enemigos naturales usados en programas de control aumentativo también pueden ser modificados para otros atributos en los que se desee mejorar su desempeño (ver Capítulo 25). Por ejemplo, algunas razas de nemátodos han sido seleccionadas para aumentar su tolerancia al calor o a la desecación (Shapiro-Ilan *et al.*, 2005).

SELECTIVIDAD ECOLÓGICA: USO DE PLAGUICIDAS NO SELECTIVOS CON ASTUCIA

Si ningún plaguicida que sea compatible con enemigos naturales clave está disponible en un cierto cultivo, puede aun ser posible encontrar formas de hacer que los plaguicidas disponibles sean algo selectivos, cambiando la forma en que son formulados o aplicados. La selectividad ecológica se logra reduciendo el contacto entre el plaguicida y los enemigos naturales clave (Hull y Beers, 1985).

DOSIS REDUCIDAS

Disminuir las dosis puede hacer que un plaguicida sea menos dañino para los enemigos naturales (Poehling, 1989). Sin embargo, esto podría lograr menor control de la plaga ya que los enemigos naturales a menudo son más susceptibles a los plaguicidas que los herbívoros.

MATERIALES Y FORMULACIONES SELECTIVOS

La formulación afecta la exposición. Por ejemplo, las formulaciones granuladas aplicadas al suelo generalmente no están en contacto con los enemigos naturales que buscan alimento en el follaje (a menos que los materiales aplicados tengan actividad fumigante, ver más adelante) y por tanto, muchos enemigos naturales no son afectados por dichas formulaciones (Heimbach y Abel, 1991). Sin embargo, los materiales granulados están diseñados con el propósito de producir residuos del plaguicida en la parte superior del suelo y entonces el contacto del plaguicida puede ser extenso con los enemigos naturales que viven en el suelo, como los carábidos. Algunos materiales como el chlorpirifos, cuando son aplicados en gránulos en las huertas de cítricos para control de hormigas, tienen actividad fumigante y matan enemigos naturales en el follaje del árbol por su volatilización.

Los plaguicidas sistémicos se mueven internamente en las plantas tratadas y no dejan residuos externos. Tales materiales no dañan a los enemigos naturales porque éstos no consumen savia de las plantas (Bellows *et al.*, 1988). Los venenos estomacales matan solamente si son ingeridos y es menos posible que afecten enemigos naturales que los plaguicidas que matan por contacto (Bartlett, 1966). Los venenos estomacales incluyen a las toxinas de *B. thuringiensis*, algunos alcaloides vegetales (Bellows *et al.*, 1985; Bellows y Morse, 1993) y compuestos minerales como la criolita (Bellows y Morse, 1993).

LIMITACIÓN DE LAS ÁREAS TRATADAS

La cobertura reducida o la colocación selectiva de plaguicidas puede proteger a los enemigos naturales. El tratamiento en surcos alternos en huertos de manzanas, en lugar de bloques enteros, controla a las plagas que se mueven en la huerta, y aun así permite mayor sobrevivencia de coccinélidos, como el depredador de ácaros *Stethorus punctum* (LeConte) (Hull *et al.*, 1983). DeBach (1958) controló con éxito a la escama púrpura *Lepidosaphes beckii* (Newman) en cítricos, aplicando aceite cada tercer surco en un ciclo de

seis meses. Este enfoque logró un control satisfactorio de esta especie sin destruir a los enemigos naturales de otras plagas de cítricos. Velu y Kumaraswami (1990) encontraron que el tratamiento de surcos alternos en algodón logró el control efectivo de plagas y que con algunos de los productos probados aumentaron los niveles de parasitismo de plagas clave. En contraste, Carter (1987) encontró que la aspersión en franjas en cultivos de cereales del Reino Unido no logró un control satisfactorio de áfidos, cuando las franjas fueron de 12 m de ancho ya que los enemigos naturales no colonizaron las franjas asperjadas lo suficientemente rápido como para suprimir la resurgencia de los áfidos.

LIMITACIÓN DE APLICACIONES EN EL TIEMPO

En principio, las aplicaciones cuidadosas de duración limitada de plaguicidas no persistentes podrían no afectar a los enemigos naturales. Aunque algunos adultos pudiesen morir, estos serían reemplazados por la emergencia de otros de las pupas, momias u otros estados protegidos, una vez se hayan disipado los residuos tóxicos. La persistencia de los plaguicidas varía mucho. Materiales como diazinón o azinphosmethyl dejan residuos tóxicos en el follaje por varias semanas. Otros materiales como los piretroides se degradan en horas o en días. El momento de aplicación puede manipularse (1) reduciendo la frecuencia de aplicación para que el follaje del cultivo no siempre sea tóxico para los enemigos naturales o (2) programando las aplicaciones específicamente para evitar períodos cuando los enemigos naturales estén en estados vulnerables. Gage y Haynes (1975), por ejemplo, usaron modelos basados en la temperatura de desarrollo de los insectos para programar las aplicaciones de plaguicidas, contra el escarabajo de la hoja de los cereales *Oulema melanopus* (L.), asperjando después de la emergencia de los escarabajos y antes de la del parasitoide *Tetrastichus julis* (Walker). El sistema conservó a este importante parasitoide; el enfoque previo de dirigir las aplicaciones de plaguicidas a la primera generación de larvas (el estado atacado por el parasitoide) de la plaga, no conservaba al parasitoide.

REDISEÑO DEL SISTEMA

La forma más completa de reducir el daño por plaguicidas, es eliminar el uso de materiales de amplio espectro, sustituyéndolos por métodos alternativos de control de plagas como las trampas, la disrupción del apareamiento con feromonas o los controles culturales. El reemplazo de las aspersiones de amplio espectro para el control de la polilla de la manzana *Cydia pomonella* en huertos de peras (*Pyrus communis* L.) en Oregon (EU), con la disrupción del apareamiento a través del uso de feromonas, elevó la densidad de los hemípteros depredadores *Deraeocoris brevis piceatus* Knight y de las crisopas *Chrysoperla carnea* (Stephens), y disminuyó la densidad de plagas secundarias clave como el psílido de la pera *Psylla pyricola* Förster en 84%. La proporción de fruta contaminada con mielecilla del psílido cayó del 9.7% al 1.5% (Westigard y Moffitt, 1984).

CULTIVOS TRANSGÉNICOS Bt: LO MÁXIMO EN PLAGUICIDAS ECOLÓGICAMENTE SELECTIVOS

Los cultivos transgénicos que expresan toxinas Bt, son lo máximo en plaguicidas selectivos. Su uso ha incrementado dramáticamente la conservación de los enemigos naturales en cultivos clave (algodón, maíz, soya). El uso práctico de cultivos Bt fue posible al basarse en la transferencia de ADN y en su expresión tecnológica desarrollada en los 1990s. El descubrimiento de genes promotores adecuados que estimulan altos niveles de expresión de los genes transferidos fue un desarrollo clave. Esto permitió la creación de cultivos que produjeron niveles suficientemente altos de toxinas Bt en tejidos seleccionados para controlar plagas clave (Shelton *et al.*, 2002).

Existen muchas toxinas Bt, las cuales varían en relación a la especie exacta de plaga para la que son letales. Por ejemplo, el algodón que contiene la proteína Cry1Ac (Bollgard®), el cual ha sido cultivado en los Estados Unidos desde 1996, logra el control de los lepidópteros plaga *Heliothis virescens* (F.), *Pectinophora gossypiella* (Saunders) y *Helicoverpa zea* (Boddie) (Moar *et al.*, 2003). La erradicación previa (por tratamientos con plaguicidas en áreas amplias y por trampas que atraen y matan) del picudo del algodón *Anthonomus grandis grandis* Boheman, significó que el algodón Bt no tenía plagas de la bellota sin controlar. El algodón Bt puede producirse con significativamente menos aplicaciones de plaguicidas que el convencional. En los Estados Unidos, Williams (1999) estimó que (en seis estados, comparando 1995 como el año pre-Bt con 1998) el número de aplicaciones de plaguicidas se redujo de un promedio de 4.8 a 1.9, una disminución del 60%. Similarmente, en China se estimó que el algodón Bt ha reducido el uso de plaguicidas en el cultivo en 60-80% (Xia *et al.*, 1999). En maíz dulce Bt, las reducciones de plaguicidas del 75-100% son posibles (Dively y Rose, 2003). Esta reducción en insecticidas mejoró dramáticamente el habitat del cultivo para los enemigos naturales.

La adopción de los cultivos Bt por los agricultores varía con la región, con mayor adopción en los Estados Unidos, Canadá, China y Argentina. En el algodón de los EU, las variedades Bt abarcan hasta el 80% de la producción de la región. El área global de cultivos Bt aumentó más de 25 veces entre 1996 y 2000, alcanzando 44.2 millones de hectáreas, lo que representó una tasa muy rápida de crecimiento en superficie (James, 2002).

Los cultivos Bt están reduciendo el uso de plaguicidas a una escala que sobrepasa todos los otros esfuerzos del MIP para alejar la producción de cultivos de los plaguicidas. Aunque los estudios que rastrean residuos de Bt en los insectos han demostrado que las toxinas Bt pueden ser adquiridas por enemigos naturales, como en los depredadores que a veces se alimentan en plantas, tales residuos son pequeños y poco frecuentes (Torres *et al.*, 2006). Los estudios de campo que comparan el mismo cultivo manejado con plaguicidas convencionales muestran que los enemigos naturales de todos los grupos aumentan o permanecen igual en cultivos Bt (Dively y Rose, 2003; Moar *et al.*, 2003; Naranjo y Ellsworth, 2003; Naranjo, 2005; Naranjo *et al.*, 2005; Head *et al.*, 2005). Los únicos grupos de enemigos naturales que disminuyeron son los especializados en atacar a la plaga clave (Venditti y Steffey, 2003), lo cual es solamente un efecto colateral del control de la plaga. Además, los estudios han demostrado que las toxinas Bt no persisten ni se acumulan en el suelo donde son plantados los cultivos Bt, durante los años siguientes (Dubelman *et al.*, 2005).

Los cultivos Bt son un desarrollo extremadamente positivo que promueve la conservación de los enemigos naturales en los cultivos. Si se desarrolla resistencia, genes Bt alternativos o combinaciones de genes parecen ofrecer métodos para reimponer el control. La prevención del desarrollo de la resistencia se está intentando mediante el mantenimiento de bloques de cultivo sin Bt cerca al cultivo Bt, de tal manera que estos sirvan como fuentes de plagas susceptibles que inundan y se aparean con individuos que comienzan a mostrar resistencia en los bloques Bt. Un subproducto de la reducción del uso de plaguicidas convencionales en cultivos Bt ha sido que algunas plagas secundarias, como el escarabajo pulga del algodón *Pseudatomoscelis seriatus* (Reuter), ha incrementado su importancia. Sin embargo, estas especies son de menor importancia comparadas con las plagas clave del cultivo.

