

# Informe especial sobre plaguicidas agrícolas

Los cuatro artículos que siguen, escritos por investigadores profesionales que trabajan sobre los respectivos temas, darán al lector un panorama general de una cuestión que en círculos políticos, los medios y la opinión pública suele muchas veces ser abordada con un ánimo más orientado al activismo que a la reflexión racional. El editorial de este número proporciona un encuadre global del asunto. Con estos materiales, CIENCIA HOY espera ofrecer al lector bases objetivas para dicha reflexión.



# ¿Qué son los plaguicidas?

Los plaguicidas, también llamados pesticidas, son sustancias destinadas a combatir plagas o pestes. Surgieron por la necesidad de manejar poblaciones de organismos nocivos para la sanidad humana, la de cultivos o frutos almacenados y la de animales domésticos. En realidad, el término *plaga* tiene una connotación antropocéntrica ya que, consideradas objetivamente, las plagas son simplemente poblaciones integrantes de un ecosistema.

Los plaguicidas son sustancias químicas –orgánicas, inorgánicas o microbiológicas– líquidas o sólidas que producen efectos tóxicos sobre ciertos organismos vivos. Se utilizan principalmente para controlar plagas de la agricultura. En los Estados Unidos el 75% de los plaguicidas se usaron para ese propósito en 1993.

Las principales plagas agrícolas incluyen: (1) plantas no cultivadas o malezas; (2) insectos, artrópodos y vertebrados que se alimentan de los cultivos, y (3) agentes patógenos, así llamados porque provocan enfermedades en los cultivos, entre ellos hongos, virus y bacterias. Los más perjudiciales son las malezas, los insectos y los hongos. La magnitud de pérdidas de producción que pueden ocasionar depende de la plaga, del cultivo y de la región geográfica. Las pérdidas pueden ser potenciales –aquellas que ocurrirían, sin prácticas de protección de los cultivos, con respecto al rendimiento esperado– o reales –aquellas que se producen aun cuando se recurra a prácticas de protección–. Si bien las malezas ocupan el primer lugar en cuanto a pérdidas potenciales, en ciertos casos, como la papa, las enfermedades tienen casi igual importancia, mientras en el algodón se destacan las plagas animales (figura 1).

La eficacia de las prácticas de control varía según el organismo de que se trate. Como se ve en la figura 2, es decreciente en función de que la plaga sea una maleza, un insecto, un hongo o un virus. Las pérdidas potenciales y reales dependen de factores geográficos como diferencias de la calidad del suelo, el clima y el desarrollo socioeconómico del contexto productivo. Las mayores pérdidas potenciales y reales suelen presentarse en África, donde las medidas de control resultan menos eficaces que en otros continentes.



Oruga del maracuyá (*Agraulis vanillae*). El área de dispersión del insecto, en la que es muy común, se extiende desde la Argentina hasta el sur de los Estados Unidos. Se alimenta de los maracuyás silvestres y cultivados (*Passiflora spp.*). Los adultos tienen olores que repelen a los pájaros, además de ser tóxicos, de modo que escapan de su predación. Del estadio que muestra la foto de la izquierda, de larva u oruga de unos 4cm, pasa al de la atractiva mariposa que muestra la imagen inferior. Foto izquierda: Carlos Ballaré; foto derecha: Calibas, Wikimedia Commons.

## Algo de historia

Desde el comienzo mismo de la agricultura, asociado con el inicio de la vida sedentaria de los humanos, los cultivos padecieron el ataque de plagas que los diezmaran

### ¿DE QUÉ SE TRATA?

Los plaguicidas han existido desde el comienzo de la agricultura, en el amanecer de la historia. Si antes eran productos naturales, hoy son el resultado de síntesis química. Esto los ha hecho mucho más eficaces para combatir plagas, pero mucho más susceptibles de contaminar el ambiente y deteriorar la salud humana.

y reducían drásticamente la producción y el acopio de alimentos. A partir del invento de la escritura y a lo largo de los siglos numerosos textos se han referido a ataques de insectos, hongos, roedores y otros agentes. Para evitar o reducir los daños, desde hace milenios se han empleado sustancias que podrían considerarse los precursores de los plaguicidas, como azufre, flores de piretro y arsenitos. Pertenecen a la era de los productos naturales.

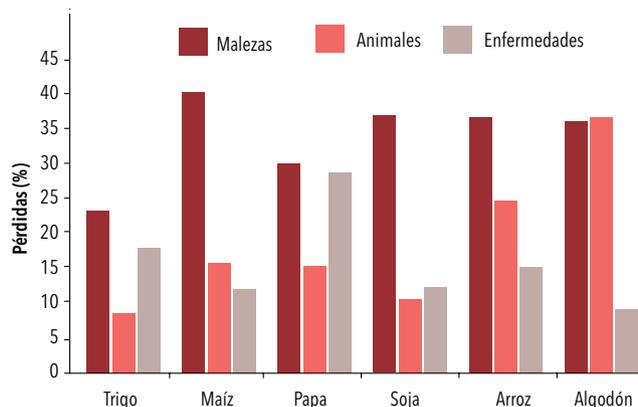
Con la Revolución Industrial comenzó la era de las fumigaciones, frecuentemente con derivados del petróleo. Se caracterizó por el uso de productos simples como el famoso caldo bordelés (una mezcla de sulfato de cobre con cal), el verde de París (acetoarsenito de cobre), los ácidos carbónico y fénico, el bromuro de metilo y el disulfuro de carbono, entre otros.

Desde mediados de la década de 1920 comenzó la era de los productos sintéticos con la preparación y el uso en los Estados Unidos de compuestos derivados de nitrógeno gaseoso o dinitroderivados. En este período se crearon todos los productos sintéticos hoy en uso. El crecimiento exponencial de ese uso se produjo durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se difundió un insecticida basado en cloro, el DDT. En 1945 se comenzaron a vender en dicho país insecticidas similares, llamados *aldrin*, *clordane* y *heptacloro*, así como el herbicida 2,4-D, cuya mezcla con el 2,4,5-T se denominó *agente naranja* y se empleó como defoliante durante la guerra de Vietnam. Desde entonces se creó por síntesis química un gran número de sustancias plaguicidas, pero también la experiencia de su uso, el conocimiento de cómo funcionan en los ecosistemas y el afloramiento en la sociedad de la conciencia ambiental llevaron a la prohibición de muchos de los más antiguos.

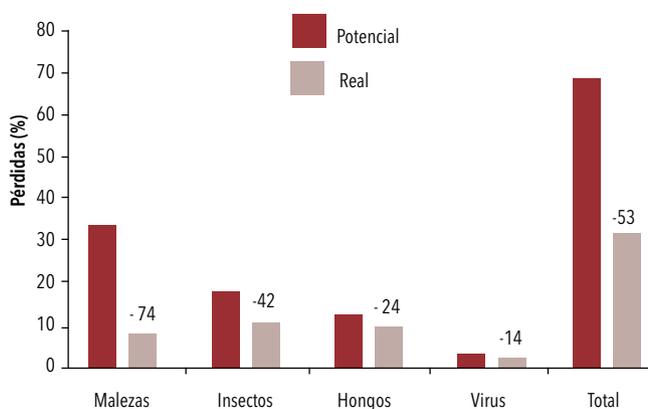
## ¿Cómo se clasifican los plaguicidas?

Entre los diferentes criterios posibles, los dos más utilizados son: (1) por tipo de plaga, o (2) por estructura química. En la actualidad prevalecen las sustancias utilizadas para controlar malezas, insectos, hongos y ácaros. Un caso particular son los llamados *curasemillas*, principalmente fungicidas o insecticidas, que solo se utilizan para tratar semillas en espera de la siembra.

La clasificación según la estructura química toma en cuenta una gran variedad de grupos o familias de compuestos. Los insecticidas organofosforados, que forman una de las familias más numerosas, suman 58 productos distintos, mientras que en el otro extremo, la familia de glicinas posee un único integrante, el glifosato. Una de las principales ventajas de clasificar a los plaguicidas según su estructura química es que permite identificar sustancias que suelen tener similares efectos en las plagas



**Figura 1.** Pérdidas de producción potencial ocasionadas por malezas, plagas animales (artrópodos, nematodos, roedores, pájaros y moluscos) y enfermedades (hongos, bacterias y virus) en seis de los principales cultivos mundiales (adaptado de EC Oerke, 2006).



**Figura 2.** Eficacia mundial promedio de los plaguicidas en la reducción de pérdidas potenciales causadas por malezas, animales y agentes patógenos en trigo, maíz, papa, soja, arroz y algodón (adaptado de EC Oerke, 2006). Las barras indican las pérdidas potencial total y real sumando las de los diferentes agentes causales. Los números negativos indican la relación entre la pérdida potencial y la real.

y el ambiente. Una de las clasificaciones más utilizadas combina el grupo químico con el modo o mecanismo de acción en las plagas (tabla 1).

## El mercado de plaguicidas

El mercado de los plaguicidas está dominado desde hace tiempo por los herbicidas, a los que siguen insecticidas y fungicidas. En 2005, sobre un mercado mundial de 31.190 millones de dólares, el 47% correspondió a los primeros, y respectivamente el 25% y el 24% a los otros dos.

En la Argentina el mercado alcanzó los 1308 millones de dólares en 2009, de los cuales el 63% correspondió a herbicidas, el 20% a insecticidas y el 9% a fungicidas (tabla 2). Considerando la cantidad de cada plaguicida, el 77% correspondió a herbicidas, el 12% a insecticidas,

Tipo de producto	Modo o sitio de acción	Grupo químico
Insecticidas	Interferencia del sistema nervioso	Organoclorados, organofosforados, carbamatos
		Piretroides, piretrinas, fiproles-fenilpirazoles
		Avermectinas, nicotinoides-nitrometilenos
		Nicotina
	Reguladores del crecimiento	Benzoil-fenilureas, benzamidas, benzoil-hidrazinas
	Toxinas alimentarias	<i>Bacillus thuringiensis</i>
	Sistema respiratorio	Fosfuros, bromuros, etcétera
Tóxicos físicos	Aceites minerales, tierra de diatomeas, geles de sílice	
Fungicidas	Inhibición de la síntesis de ácidos nucleicos	Fenilamidas, pirimidinas, derivados de hidrocarburos aromáticos, carboximidias
		Derivados del benzimidazol
	Mitosis y división celular	Ditiocarbamatos, benzimidazoles
		Fenilureas, benzamidas
	Respiración: inhibición de la producción de ATP en los procesos enzimáticos del metabolismo energético	Carboximidias, quinonas, cúpricos, arsenicales, derivados del estaño, disulfuros, ditiocarbamatos, estrobirulinas
	Síntesis de aminoácidos y proteínas	Anilopirimidinas
	Transducción de señales	Quinolinas, fenilpiroles, dicarboximidias
	Síntesis de lípidos y membrana	Dicarboximidias, hidrocarburos aromáticos
		Clorofenoles, nitroanilinas, ditiocarbamatos, amidias
	Biosíntesis de esterol en las membranas	Morfolinias, triazoles
	Alteración de la estructura celular	Dodecilguanidina
Acción múltiple	Cúpricos, sulfúricos, ditiocarbamatos, ftalamidas, cloronitrilos, sulfamidias, guanidinas, triazinas, quinonas	
Inhibición de la acetil coenzima A carboxilasa	Ariloxi-fenoxi, ciclohexanodionas	
Herbicidas	Inhibición de la aceto lactato sintetasa	Imidazolinonas, sulfonilureas, sulfonamidias
	Inhibición de la formación de microtúbulos	Dinitroanilinas
		Clorofenóxidos, derivados del ácido benzoico
	Auxinas sintéticas	Ácidos piridín carboxílicos, ácidos quinolín carboxílicos
	Inhibición de la fotosíntesis en el fotosistema II	Triazinas, triazinonas, uracilos, ureas sustituidas, benzotiadiazonas, carbamatos, amidias
	Inhibición de la fotosíntesis en el fotosistema II y respiración	Benzonitrilos
	Inhibición de la protoporfirinógeno oxidasa	Difeniléteres, N-fenilftalamidas, oxadiazoles
		Triazolinonas
	Inhibición de la síntesis de lípidos	Tiocarbamatos
	Desviación del flujo electrónico en el fotosistema I	Bipiridilos
	Inhibición de la síntesis de carotenoides	Isoxsoles, nicotinanilidas, otros
	Inhibición de la síntesis de proteínas, metabolismo de lípidos y división celular	Acetanilidas
	Interferencia en la actividad enzimática y precipitación de proteínas	Carboxílicos aromáticos
	Interferencia en el metabolismo del fósforo	Arsenicales
Inhibición de la enolpiruvil shikimato-fosfato sintetasa	Glicinas	

**Tabla 1.** Grupos químicos de insecticidas, fungicidas y herbicidas agrupados por su modo de acción (documento de la cátedra de terapéutica vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias, UNMDP).

el 4% a acaricidas y el 3% a fungicidas. En el conjunto se destaca el peso del herbicida glifosato, que representó el 42,3% del mercado global de plaguicidas, por razones que consideraremos más adelante.

## Plaguicidas por tipo de cultivo

Los plaguicidas se utilizan en una gran variedad de cultivos y otras actividades agropecuarias. En general, las cantidades aplicadas dependen del cultivo, lo que está

vinculado con el predominio y la importancia del tipo de plaga en cada cultivo o actividad. Por ejemplo, para proteger granos almacenados, cuya plaga predominante son los insectos, prevalecen los insecticidas (tabla 3).

En la Argentina, los cultivos de soja, maíz, trigo y girasol, más los controles de malezas entre cultivos sucesivos, conocidos por barbechos químicos, concentraron en 2009 el 81% de la facturación de plaguicidas, mientras que el 19% restante se utilizó para maní, frutales de pepita y carozo, cítricos, pasturas, hortalizas, papa, algodón, tabaco, caña de azúcar, arroz, vid, poroto, granos alma-

cenados y otros. El cultivo de soja reunió casi el 38% de esa facturación, seguido por los barbechos químicos con 23% y el maíz con 10%. Los herbicidas se aplicaron sobre todo en los cultivos de arroz, pasturas, girasol, maíz, soja, maní, poroto y trigo, mientras que los insecticidas predominaron en el manejo de granos almacenados y en cultivos de frutales de pepita y carozo, de algodón, tabaco y hortalizas. Finalmente, los fungicidas fueron dominantes en los cultivos de vid, papa, caña de azúcar y cítricos.

## Toxicidad

Todos los plaguicidas son o pueden ser tóxicos para el ser humano y los animales, pero lo son en distintos grados y la toxicidad aparece por encima de ciertos umbrales. La toxicidad es la capacidad intrínseca de una sustancia química de producir daño o incluso la muerte. Depende de los compuestos químicos incluidos en el plaguicida y del organismo expuesto a este. Sus factores cruciales son la dosis y el tiempo de exposición. El otro artículo de este número ('Plaguicidas y salud humana') discute la toxicidad para las personas.

Se habla de *toxicidad aguda* cuando los daños ocurren en horas o minutos de una única exposición a dosis relativamente elevadas. Esos daños, sin embargo, pueden ser reversibles. Por convención internacional, se llama *dosis letal media*, simbolizada por DL50, a la cantidad de sustancia que causa la muerte del 50% de un grupo de animales, generalmente ratas o conejos, expuestos a ella en condiciones controladas. En los casos de ingreso del plaguicida en el organismo por las vías oral o dermal, la DL50 se expresa en miligramos de la sustancia activa por kilogramo de peso del animal. Cuando el ingreso es por inhalación, la equivalente medida de la toxicidad se conoce como *concentración letal media* (CL50) y se expresa en miligramos de la sustancia por litro de aire o agua, o como partes por millón (ppm) en esos medios. La segunda forma de expresar la toxicidad prevalece en estudios de organismos acuáticos o en ambientes cerrados.

Sobre la base de la DL50 aguda oral o dermal, la Organización Mundial de la Salud estableció en 1975 una clasificación de la toxicidad de los plaguicidas que fue adoptada en la Argentina (tabla 4). Ella los agrupa en cinco categorías toxicológicas, que determinan las cuatro bandas de color que deben figurar en la etiqueta o marbete de los envases para advertir al usuario sobre el riesgo del producto.

El riesgo toxicológico se define como la probabilidad de que una sustancia produzca daño o incluso la muerte. Es muy importante hacer notar que la clasificación toxicológica de un plaguicida depende de la forma en que esté incluido el agente activo en el producto comercial. Por ello, todo fabricante debe proveer información sobre la DL50 de dicho agente y su concentración en el producto que fabrica.

Los plaguicidas cuya acción afecta procesos biológicos comunes a plagas y humanos son los más riesgosos para estos. El caso típico son los insecticidas neurotóxicos que actúan sobre la transmisión del impulso nervioso, común a insectos y personas. De esa categoría son los insecticidas organoclorados, organofosforados, carbamatos, piretroides y nicotinoides, entre otros. Otros plaguicidas sumamente tóxicos para animales de sangre caliente son los rodenticidas, en su gran mayoría anticoagulantes, que resultan clasificados en las categorías Ia y Ib. Los insecticidas suelen caer principalmente en las clases Ib y II, mientras que los fungicidas, herbicidas y acaricidas ocupan en su gran mayoría las clases II, III y IV de la tabla 4. Se puede advertir que un 15% de los plaguicidas caen en las categorías más riesgosas (Ia y Ib); el 38% de ellos lo hace en la moderadamente peligrosa (II), casi un 18% resulta poco peligroso (III) y casi un 30% no ofrece peligro (IV).

Además de la toxicidad en el corto plazo, existe otra que se manifiesta al cabo de períodos medianos o largos, conocida como *toxicidad no aguda*. Sus síntomas se presentan luego de una exposición a pequeñas dosis a lo largo de mucho tiempo. Sus daños pueden ser irreversibles. Se habla de intoxicaciones *subagudas*, provocadas por repetidas dosis recibidas a lo largo de un mes; *subcrónicas*, producto de dosis recibidas durante uno a tres meses, y *crónicas*, por exposiciones durante doce meses o más. Los efectos de las intoxicaciones crónicas pueden ser neurológicos, reproductivos, cutáneos, oftalmológicos, hepáticos, cancerígenos, mutagénicos, teratogénicos, endocrinos y otros.

A diferencia de las intoxicaciones agudas, para las crónicas no se cuantifica el peligro de un único contacto, ya que resultan de exposiciones continuas a pequeñas dosis, principalmente por alimentos, agua potable o aire contaminados. Se calcula, en cambio, la cantidad de un plaguicida que puede ser ingerida a lo largo de la vida sin crear riesgos apreciables para la salud. Ese valor se conoce como la *ingesta diaria admisible* y se expresa en miligramos diarios del pesticida por kilogramo de peso corporal. Para calcular ese valor se parte de la dosis máxima que no produce efectos adversos, conocida como *nivel sin efecto*

Plaguicida	Cantidad comercializada (millones de kg)	Valor facturado (millones de dólares)
Herbicidas	200,80	824,11
Insecticidas	30,32	259,29
Fungicidas	6,80	120,59
Acaricidas	9,24	8,95
Curasemillas	3,49	73,06
Otros	9,89	22,18
Total	260,54	1.308,18

**Tabla 2.** Mercado argentino de plaguicidas en 2009, según la Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes ([http://www.casafe.org/web\\_css/mediciodemercado.htm](http://www.casafe.org/web_css/mediciodemercado.htm)).

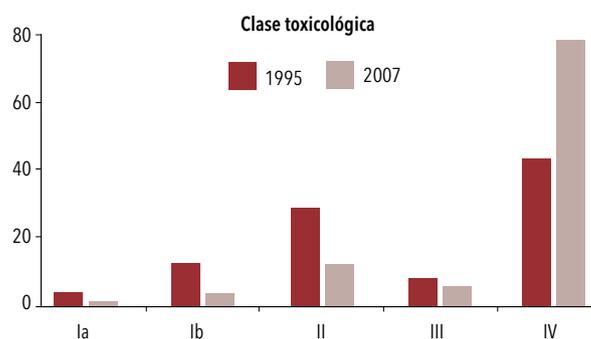
Cultivo	% en dinero							Total de cada cultivo
	Total	Herbicidas	Insecticidas	Fungicidas	Acaricidas	Curasemillas	Otros	
Soja	37,50	58,00	26,20	10,10	0,00	1,40	1,40	100,00
Barbecho	23,40	98,90	0,30	0,20	0,00	0,00	0,00	100,00
Maíz	10,30	60,50	19,10	1,30	0,10	1,90	1,90	100,00
Trigo	4,30	44,60	12,20	28,00	0,00	0,60	0,60	100,00
Girasol	5,70	61,70	20,70	0,40	0,00	0,90	0,90	100,00
Maní	2,50	54,70	2,20	37,90	0,00	0,10	0,10	100,00
Frutales pepita	1,70	6,20	70,20	10,10	8,90	0,00	0,00	100,00
Cítricos	1,50	28,00	15,30	39,80	16,70	0,00	0,00	100,00
Pasturas	1,90	84,20	13,90	0,00	0,00	0,03	0,03	100,00
Hortalizas	2,30	18,30	52,00	19,20	5,30	0,00	0,00	100,00
Papa	1,30	21,10	16,90	52,90	0,60	0,10	0,10	100,00
Algodón	1,60	21,00	63,20	1,20	0,00	0,10	0,10	100,00
Tabaco	0,70	3,70	63,00	5,20	0,50	0,03	0,03	100,00
Frutales carozo	1,10	12,30	60,10	13,50	13,40	0,00	0,00	100,00
Caña	0,80	47,60	3,60	48,60	0,00	0,00	0,00	100,00
Arroz	0,60	94,60	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	100,00
Vid	0,60	7,20	12,70	73,10	0,00	0,00	0,00	100,00
Poroto	0,60	45,90	23,40	27,10	0,00	0,02	0,02	100,00
Granos almacenados para consumo	0,30	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Otros	1,40	1,40	31,70	33,90	3,00	0,00	30,50	100,00
Total	100,00							

**Tabla 3.** Utilización de los plaguicidas en la Argentina por cultivo o actividad, adaptado de información proporcionada por la Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes ([http://www.casafe.org/web\\_css/mediciondemercado.htm](http://www.casafe.org/web_css/mediciondemercado.htm)). Cada porcentaje fue calculado con los valores en dólares facturados para cada cultivo y tipo plaguicida. De ahí se obtuvieron los valores totales por cultivo. El valor total del mercado, que indica la tabla 2, es de 1308,18 millones de dólares.

adverso observado o NOEL (por non observed adverse effect level), que se expresa en miligramos del pesticida por kilogramo de peso corporal. La dosis diaria admisible es igual a NOEL dividido por un factor de seguridad. Permite establecer la cantidad de plaguicida que los seres humanos pueden ingerir durante toda la vida en los alimentos o en el agua sin que se anticipen daños. Ese valor se conoce como tolerancia o límite máximo de residuos, y está definido para una gran variedad de alimentos y plaguicidas.

## Plaguicidas con bajo efecto ambiental

Desde la aparición de los primeros plaguicidas sintéticos hace unas nueve décadas se ha ido evolucionando hacia la síntesis de productos menos riesgosos. Los avances más notorios en ese sentido se produjeron para los insecticidas. En los últimos años se han desarrollado insecticidas organofosforados y piretroides que que-



**Figura 3.** Plaguicidas comercializados en la Argentina en 1995 y 2007 según clase toxicológica (adaptado de Casafe, 2009)

daron enmarcados en las clases toxicológicas III y IV. Incluso se ha avanzado en la síntesis de insecticidas de otros grupos químicos con mecanismos de acción no neurotóxicos, como las benzoilfenilureas y las benzamidas, que actúan como inhibidores de la síntesis de quitina, o las benzoilhidrazinas, que aceleran la muda de los insectos. Todos estos presentan muy bajo riesgo toxicológico para el ser humano.

Clasificación de los riesgos de los plaguicidas	Dosis letal media del ingrediente activo (mg/kg vivo) que causa la muerte del 50% de los animales experimentales (DL 50)			
	Forma líquida		Forma sólida	
	Oral	Dermal	Oral	Dermal
Clase I a. Producto sumamente peligroso	20 o menos	40 o menos	5 o menos	10 o menos
Clase I b. Producto muy peligroso	20 a 200	40 a 400	5 a 50	10 a 100
Clase II. Producto moderadamente peligroso	200 a 2000	400 a 4000	50 a 500	100 a 1000
Clase III. Producto poco peligroso	2000 a 3000	mayor de 4000	500 a 2000	mayor de 1000
Clase IV. Producto que normalmente no ofrece peligro	mayor de 3000		mayor de 2000	

**Tabla 4.** Clasificación del riesgo toxicológico de los plaguicidas según la Organización Mundial de la Salud.

El proceso de síntesis de productos más seguros fue acompañado por una reducción de su espectro de acción, con el correspondiente incremento de su especificidad. Un ejemplo notorio es la bacteria *Bacillus thuringiensis*, usada como plaguicida microbiológico. Produce cristales tóxicos que dañan a cierto grupo de insectos que se alimentan de los cultivos. Hoy se ha logrado incorporar al genoma de ciertos cultivos, como maíz, algodón y soja, un gen propio de dicha bacteria que produce en ellos el mismo efecto sobre los insectos y elimina la necesidad del insecticida. El lanzamiento comercial de soja con esa característica todavía no tuvo lugar en la Argentina.

Debido a que los herbicidas y fungicidas, excepto algunos, son menos tóxicos que los insecticidas, para ellos la reducción del riesgo toxicológico no ha sido tan notoria. De todas maneras, con los herbicidas también se evolucionó hacia la síntesis de productos menos ofensivos, por ejemplo, los que tienen como base sulfonilureas, imidazolinonas o glicinas, que poseen muy poco riesgo toxicológico medido por la DL50 oral aguda. El representante más notorio de las últimas es el glifosato. Algo similar ocurrió con los fungicidas, entre los que puede



Plantas de soja que padecen de oidio o mal blanco y de roya, producidos por distintas especies de hongos. La primera infección se advierte en las manchas blancas; la segunda en los puntos amarillos o negruzcos. Foto Ana María Romero

citarse una nueva generación de productos con bajo riesgo, como las estrobirulinas.

En consonancia con esta reducción mundial de los valores de DL50 de las sustancias más recientes, en el mercado argentino de plaguicidas hubo una evolución similar. En 1995 se comercializaron en el país 73 millones de kilogramos; ese año el 17% de los plaguicidas pertenecía a las clases más riesgosas (Ia y Ib). En 2007, cuando se transaron 254 millones de kilos, ese valor había descendido al 4%, mientras que el 78% de los plaguicidas estaba encuadrado en la clase IV.

Un aspecto importante es la permanencia del plaguicida en el ambiente. Los primeros insecticidas se caracterizaban por su elevada persistencia ambiental. Ese era el caso de los insecticidas organoclorados, la primera familia química de insecticidas sintéticos. Entre los principales compuestos activos de esa familia están el DDT y sus análogos (metoxicloro, clorobencilato y dicofol) y los derivados ciclodienos (aldrin, dieldrin, endrin, lindane, clordano, heptacloro y endosulfan). De todos, el único que continúa en uso en la Argentina, aunque fuertemente cuestionado, es endosulfan. Los demás fueron prohibidos en distintos momentos, puesto que son plaguicidas de baja volatilidad, elevada estabilidad química y solubilidad en lípidos, así como baja tasa de biotransformación y degradación, todo lo cual se traduce en su alta persistencia en el ambiente. Sin embargo, el DDT, que tiene bajo costo y gran eficacia, fue nuevamente autorizado en varios países para controlar insectos transmisores de malaria.

Hoy todos los plaguicidas se encuentran en continua revisión en cuanto a su comportamiento toxicológico y ecotoxicológico. Ello es especialmente importante para los más antiguos, dado que en su época no estuvieron sujetos a las mismas exigencias de autorización que los modernos.

## El caso de glifosato

El glifosato se destaca entre los plaguicidas modernos, ya que posee casi el 50% del mercado de esos productos. Fue descubierto en los Estados Unidos en 1970;



En el lote de la izquierda se advierte el efecto de la aplicación de glifosato, el que está ausente en el de la derecha, que no fue tratado con el herbicida. Foto Southeast Purdue Agricultural Center.

lo puso en el mercado en 1974 la empresa Monsanto con el nombre de Roundup. Tiene efecto sobre un amplio espectro de malezas anuales, perennes y leñosas, y circula muy bien por el sistema vascular de las plantas una vez que penetra en ellas. Si alcanza el suelo, es retenido en sus partículas, por lo que tiene escasa movilidad. Por ese motivo, se aplica solo al follaje.

Sin embargo, en ciertas condiciones que combinan siembra directa, suelos húmedos y lluvias inmediatas a su aplicación, puede llegar al agua subterránea. Por su excelente efectividad en diversas situaciones, su bajo precio al haber expirado la patente de la firma mencionada que lo creó, la difusión de la siembra directa y la aprobación de cultivares transgénicos de soja, maíz y algodón tolerantes

a sus efectos, el glifosato se ha convertido en el plaguicida más utilizado en la Argentina y en varios países del mundo, entre ellos los Estados Unidos y el Brasil.

Dado que la DL50 oral aguda del glifosato es de 5600mg/kg, cae en la categoría IV, es decir, entre los productos que normalmente no ofrecen peligro. Su uso masivo en la Argentina y otras regiones y algunas dudas sobre sus escasos efectos perjudiciales para el ser humano y el ambiente han dado origen a una multiplicidad de estudios toxicológicos, ecotoxicológicos y de otra índole (como adsorción y degradación en el suelo, lixiviación al agua subterránea, escurrimiento hacia aguas superficiales y otros). Quedan pues abiertos interrogantes sobre el uso futuro del producto. 

## LECTURAS SUGERIDAS

ARREGUI MC y PURICELLI E, 2008, *Mecanismo de acción de plaguicidas*, Dow AgroSciences Argentina, Buenos Aires.

BARBERÁ C, 1976, *Pesticidas agrícolas*, Omega, Barcelona.

CÁMARA DE SANIDAD AGROPECUARIA Y FERTILIZANTES, 2009, *Guía de productos fitosanitarios para la República Argentina*, Buenos Aires.

KLAASSEN CD, 2008, *Casarett and Doull's toxicology: the basic science of poisons*, McGraw-Hill, Nueva York.

OERKE EC, 2006, 'Crop losses to pests', *The Journal of Agricultural Science*, 144: 31-43.

SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD Y CALIDAD AGROALIMENTARIA (SENASA), 1998, *Límites máximos de residuos de plaguicidas*, Editor, Buenos Aires.

STENERSEN J, 2004, *Chemical pesticides: Mode of action and toxicology*, CRC Publisher, Nueva York.

WAXMAN MF, 1998, *Agrochemical and pesticide safety handbook*, CRC Press, Boca Raton, Florida, EEUU.

### Internet

[http://www.casafe.org/web\\_css/pdf/glifosatoinfoconicet09.pdf](http://www.casafe.org/web_css/pdf/glifosatoinfoconicet09.pdf)

<http://www.senasa.gov.ar>

[www.who.int/ipcs/publications/pesticides\\_hazard\\_2009.pdf](http://www.who.int/ipcs/publications/pesticides_hazard_2009.pdf)



### Francisco Bedmar

Doctor en ciencias agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata.

Profesor asociado, Facultad de Ciencias Agrarias, UNMDP.

[fbedmar@balcarce.inta.gov.ar](mailto:fbedmar@balcarce.inta.gov.ar)

Diego O Ferraro y Florencia Rositano

Facultad de Agronomía, UBA

# Conocimiento e insumos en la agricultura moderna

Cuando los seres humanos obtienen comida, fibras o combustible de la naturaleza, como lo vienen haciendo desde la aparición de la especie en la Tierra, se están valiendo de la función productiva de los ecosistemas. A los fines de nuestro análisis, y sobre la base de la equivalencia de materia y energía, los mencionados productos de la

naturaleza pueden concebirse como porciones de energía. En estos términos, un ecosistema es una red de flujos de energía, con una estructura formada por plantas, animales y microorganismos.

Los ecosistemas están compuestos por organismos que absorben, transforman y transfieren energía y compuestos químicos. La fuente energética inicial para

## ¿DE QUÉ SE TRATA?

La agricultura consiste en la creación de ecosistemas culturales, que se superponen o combinan con los naturales. En esos *agroecosistemas* sigue operando la dinámica de la naturaleza, alterada por los *insumos* que introduce el agricultor, principalmente especies vegetales mejoradas —por el camino tradicional o por ingeniería genética—, fertilizantes y plaguicidas. El factor crucial para lograr un producto económicamente ventajoso con esos ingredientes es el *conocimiento*.

Campo sembrado con soja. Las plantas están en un estado temprano de crecimiento, antes de la formación de las chauchas que contienen los porotos. Foto Agência Brasil.



todos los ecosistemas es el Sol. La energía solar incidente es captada parcialmente por las plantas verdes, lo que les permite incorporar carbono del CO<sub>2</sub> atmosférico para generar sus tejidos, que son consumidos como forraje por los herbívoros. El itinerario de la energía del Sol a las plantas y de estas a los herbívoros, pasa luego a los carnívoros para los que los últimos son presas, y por último como materia muerta de cualquiera de los nombrados a los descomponedores. La complejidad del ecosistema está asociada tanto con el nivel de energía como con el número de especies que lo conforman, que a su vez dependen de las restricciones físicas que les imponen factores ambientales como suelo y clima.

La composición de especies de un ecosistema determina las interacciones que tienen lugar entre ellas, las que, con el tiempo, tienden a estabilizar la red de flujos de energía. Cuando esa red resulta modificada por acción humana, la cantidad de especies tiende a

disminuir, es decir, acontece una simplificación de la estructura del ecosistema, lo cual lo vuelve más inestable porque se pierden controles internos que lo preservan. En esas circunstancias, la única forma de recuperar su funcionalidad es proveerle energía externa que reemplace las funciones internas afectadas por la pérdida de especies.

La agricultura es la causa humana de alteración de los ecosistemas naturales más extendida en el espacio y en el tiempo. Es, esencialmente, un proceso de conversión de energía, por el que los ecosistemas reciben energía fósil y química externas a ellos para que puedan proporcionar las fibras y los alimentos que sostienen la población humana. Este es el proceso que llamamos *uso productivo de los ecosistemas*. Fue evolucionando con el tiempo en la dirección de un aumento de su dependencia del ingreso externo de energía.

## NIVELES DE RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS

Se habla de niveles de producción de un cultivo de granos para referirse a su rendimiento, o cantidad de producción por unidad de superficie. Se distinguen tres niveles de producción, a saber, el rendimiento posible o potencial, el rendimiento alcanzable y el rendimiento logrado. Ellos dependen respectivamente, a su vez, de tres factores de crecimiento: factores definitorios, factores limitantes y factores reductores, como lo indica el esquema.

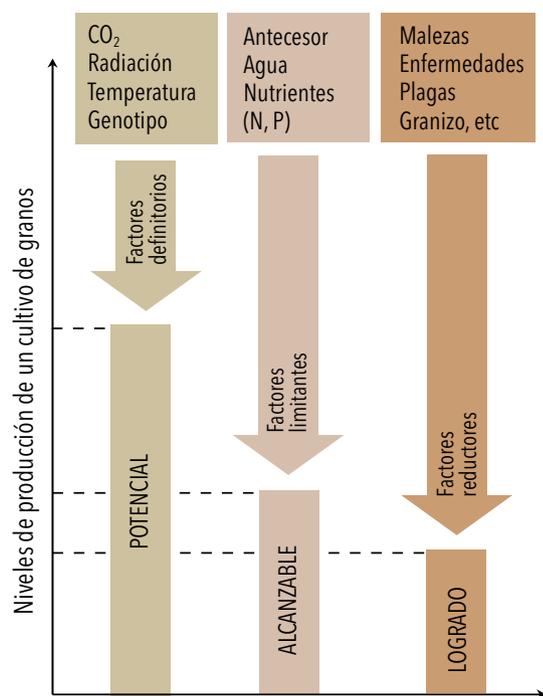
El *rendimiento potencial* es aquel que se obtiene en condiciones óptimas y en ausencia de adversidades o *estreses* de índole biótica y abiótica. Los *factores definitorios* de ese nivel de rendimiento son las características fisiológicas y los ciclos anuales (o características fenológicas) de la planta, relacionados con la temperatura y la radiación solar, que a su vez dependen de la latitud y la estación del año.

El *rendimiento alcanzable* es aquel cuyos *factores limitantes* son los recursos abióticos esenciales, como el agua y los nutrientes. Una provisión insuficiente de esos recursos es la causa principal de rendimientos inferiores al potencial.

El *rendimiento logrado* depende no solo de los suministros de agua y nutrientes sino, también, de que el cultivo esté protegido de los factores reductores o, en todo caso, de que escape de sus efectos. Dichos factores reductores entorpecen el crecimiento de las plantas y pueden ser de índole biótica, como malezas, enfermedades y plagas, o de índole abiótica, como contaminantes o inclemencias climáticas (por ejemplo, viento o granizo).

Quienes toman decisiones acerca de sistemas agrícolas pueden influir mediante diversas prácticas de manejo sobre los factores de crecimiento y, en consecuencia, sobre los niveles de rendimiento o producción. El nivel de rendimiento logrado puede convertirse en el rendimiento alcanzable con medidas de protección como el control de malezas, plagas y enfermedades, mientras que el rendimiento alcanzable puede convertirse en el potencial con medidas que eliminen estreses bióticos y abióticos, y mejoren los factores definitorios.

Si bien las últimas medidas apuntan a prestaciones difícilmente sustituibles, como el agua o los nutrientes, pueden ser provistas artificialmente, es decir, por medio de insumos externos. Entre estos se cuentan el riego y la fertilización. Además, para una localidad y cultivar dados, el rendimiento potencial puede ser mejorado de manera indirecta por el mejoramiento genético, o por prácticas de manejo como la fecha y la densidad de siembra.



## Agricultura e insumos

El manejo de los sistemas modernos de producción agrícola contempla no solo obtener el máximo rendimiento de los cultivos sino, también, hacer mínimos sus costos económicos, ambientales y sociales. Las prácticas agrícolas procuran canalizar la mayor cantidad de recursos a la especie de interés económico, que es la especie cultivada o *cultivar*. El objetivo central es que el órgano que se cosecha (por ejemplo, las espigas de trigo) sea el principal beneficiario de las prácticas agrícolas. En ese contexto, se puede entender por qué la agricultura reduce la diversidad vegetal del sistema natural para obtener una comunidad dominada por un solo componente, el cultivar.

Además, se mejora el estado nutricional de ese componente dominante mediante fertilizantes y se lo protege de la acción de agentes patógenos, depredadores y de la competencia de otras plantas. La manera moderna de ejercer dicha protección es usar compuestos químicos diversos, como herbicidas, insecticidas o fungicidas, para reducir al mínimo los componentes no rentables del agroecosistema, entre ellos, las malezas, las plagas y las enfermedades. Si bien su utilización es cada vez más necesaria en los sistemas agrarios actuales, su mero uso no es suficiente para lograr los rendimientos máximos de las cosechas.

## Agronomía moderna: conocimiento e insumos

En la agricultura actual, el uso de fertilizantes y plaguicidas solo puede traer los beneficios que se esperan si se basa en un adecuado conocimiento de la interacción entre el cultivo y el ambiente. Para ser más específicos, cada uno de los cultivos, con las variaciones que les impone su estructura genética o *genotipo*, responde al ambiente de manera diferente. Esa diferente respuesta es la causa de que varíen la cantidad y la calidad de los productos obtenidos, es decir, el rendimiento y la composición química de la cosecha. Así, comprender la interacción entre el genotipo del cultivar y el ambiente en que se realiza el cultivo es la base de la agronomía, entendida esta como el conjunto de técnicas por las que se controla y procura hacer máxima la productividad de un agroecosistema. Si bien esas técnicas muchas veces resultaron de la prueba y el error, es decir, son de carácter empírico, el avance de la agronomía está basado mayormente en la comprensión de las bases y los mecanismos que explican el diferente comportamiento de las variedades cultivadas en distintos ambientes.

Gran parte de la comprensión de dichas interacciones de los genotipos con el ambiente está asociada con

la de los factores que controlan el desarrollo de los cultivos. La secuencia de los estados vegetativo y reproductivo de un cultivar resulta afectada por la duración del día, la temperatura, la presencia de agua y de nutrientes, y la radiación solar, entre otros, factores que tienen su efecto más marcado en la etapa en que se acumula materia seca.

Para alcanzar procesos agronómicos óptimos, se procura adecuar la oferta ambiental de cada lugar particular a la diferente sensibilidad de cada especie o genotipo sembrado. En este sentido, es importante concebir el uso de plaguicidas o de cualquier otro insumo externo como un complemento del sistema, ya que tiene como objetivo final ayudar a que este proceso de interacción cultivo-ambiente sea más eficaz.

El reconocimiento de la importancia de los insumos externos como herramientas de manejo agrícola, así como su carácter de complemento de los procesos naturales, explica el papel central que desempeñan el conocimiento y las decisiones agronómicas asociadas a él.

## Las decisiones de manejo de los sistemas agrícolas

La producción agrícola se puede describir como un conjunto de decisiones orientadas a obtener las mejores cosechas posibles de plantas con determinado genotipo, cultivadas en un determinado ambiente. El ensamblaje de esas decisiones es un proceso dinámico a lo largo del tiempo, que entre otras cosas incluye establecer la cantidad y el momento de aplicación de plaguicidas y fertilizantes.

Dichas decisiones pueden ordenarse jerárquicamente a partir de los conceptos de rendimiento potencial,



Porotos de soja verdes. Los cultivos de soja son los principales destinatarios del herbicida glifosato.

La viabilidad de la agricultura se basa en que las decisiones de manejo hagan buen uso de los flujos de energía internos de los ecosistemas. Se llama *insumos internos* a las respuestas a los requerimientos de los cultivos obtenidas por su armonización en el espacio y en el tiempo con los procesos del ecosistema.

Por ejemplo, la decisión de la fecha de siembra de un cultivo determina la cantidad de agua y nutrientes que podrá recibir en función de los ciclos naturales de precipitación y de descomposición de materia orgánica. El momento de siembra también coloca al cultivo en situación más o menos favorable para competir con las malezas por los recursos del ambiente.

Pero los esfuerzos que se realizan a favor de los cultivos representan costos para el resto del ecosistema en cuanto a la disponibilidad de energía y a la diversidad biológica. Ello, a menudo, afecta negativamente a servicios del ecosistema que serían abundantes en ausencia de esos esfuerzos.

Los *servicios de los ecosistemas* se definen como los procesos mediante los cuales los ecosistemas naturales sostienen la vida humana y satisfacen sus necesidades. Los ciclos de materia y energía, la provisión y purificación del agua, la polinización de plantas naturales y cultivadas, la regulación climática y la mitigación de adversidades bióticas son ejemplos de servicios de los ecosistemas. Simplificando, el nombre se aplica tanto a los alimentos, las fibras o las maderas como a los procesos nombrados.

Particularmente relevantes para la agricultura son el mantenimiento de la diversidad genética, el ciclo de los nutrientes, el control biológico de plagas y enfermedades, el control de la erosión del suelo, la retención de sedimentos y la regulación del agua. Así, una buena manera de conseguir sistemas agrícolas sustentables es la utilización de los servicios de los ecosistemas no solo para aumentar la productividad sino, también, para sustituir importantes insumos externos, como plaguicidas y fertilizantes. Las acciones de los productores agrícolas pueden aumentar o disminuir la provisión de esos servicios; por ello, es importante comprender cómo toman sus decisiones de producción y llevan a cabo la gestión de la tierra.

---



alcanzable y logrado de un cultivo, que se explican en el recuadro ‘Niveles de rendimiento de los cultivos’. Así, los plaguicidas –término usado aquí en sentido amplio– condicionan el rendimiento final, el cual, a su vez, depende de decisiones previas que determinan los rendimientos potenciales. En otras palabras, existe fuerte relación entre el uso de insumos externos y la obtención de elevados rendimientos. Y esos rendimientos están íntimamente relacionados con los ajustes entre los requerimientos del genotipo y las características del ambiente.

El desafío que se plantea a quien toma decisiones de manejo de sistemas agrícolas es lograr los máximos rendimientos con la mínima dependencia de insumos externos, debido a los posibles perjuicios ambientales y sociales de su utilización. Existen evidencias de que, en los últimos años, el mayor uso de plaguicidas y fertilizantes ayudó a elevar los rendimientos promedio de los cultivos en la Argentina a una tasa marcadamente mayor que en otros períodos. Sin embargo, no perdieron importancia las decisiones sobre fecha de siembra, densidad de esta (número de plantas sembradas por hectárea) o mejoras genéticas de los cultivares. En este contexto cabe preguntarse si es posible tener éxito en el mencionado desafío.

Porotos de soja maduros fuera de sus vainas.

## Un ejemplo de dependencia de un insumo clave: el glifosato

En los últimos tiempos se ha discutido acerca de los riesgos del uso extensivo del glifosato para la salud humana y los restantes componentes del ecosistema. Esa clase de inquietudes sobre los riesgos ambientales asociados con productos agroquímicos no es nueva. La constatación de efectos negativos de algún compuesto sobre determinados componentes del medio ha llevado a serios debates sobre la sustentabilidad ambiental de la agricultura moderna y, en particular, sobre el uso de plaguicidas, al punto de haberse transformado en un tema relevante en la agenda de la investigación agronómica. Más aún, el posible riesgo de los plaguicidas ha llevado a los entes oficiales de control a incrementar los requisitos necesarios para la aprobación de su uso.

Pero más allá de los riesgos específicos del uso de algún plaguicida, el debate sobre la sustentabilidad ambiental de los sistemas agrícolas no puede reducirse a la utilización de algún producto particular, sino que debe ampliar su escala

y abarcar el conjunto de las decisiones de producción o lo que es lo mismo, el uso general de la tierra.

El caso del glifosato, que se convirtió en un insumo importante para el cultivo de soja (pero no solo de esta) proporciona un buen ejemplo de las posibilidades que proporciona el manejo agronómico para reducir la dependencia de insumos externos. El glifosato es un herbicida utilizado para controlar el crecimiento de un amplio espectro de malezas. El incremento explosivo de su utilización, tanto por unidad de superficie como en valores absolutos, no solo tiene una explicación económica; también tiene sentido agronómico.

La explicación económica es simple: a partir del momento en que el precio de los granos alcanzó niveles que justificaron su uso, el glifosato permitió generar un mayor margen de utilidad que los métodos anteriores, ventaja que se incrementó con la reducción de su costo provocada por la extensión de su empleo.

La explicación agronómica de la difusión del glifosato es un poco más compleja. Se basa en la aparición en el mercado de variedades de soja resistentes a sus efectos. Esas variedades o genotipos fueron el resultado



**Arriba.** Siembra directa. El tractor remolca una sembradora que va depositando las semillas (contenidas en los cajones blancos) en unos pequeños surcos que abre la misma máquina en el terreno sin arar. La competencia de las malezas se combate con herbicidas. La tierra sin remover es menos susceptible de ser arrastrada por el viento o el agua, lo que favorece la conservación de los suelos.

**Izquierda.** Laboreo tradicional. El tractor arrastra un arado que da vuelta la capa superficial del suelo. Con eso se elimina la vegetación que podría competir con el cultivo por la humedad y los nutrientes del terreno. Una pasada de rastra termina de alisar la tierra antes de sembrar.

de la aplicación de técnicas de ingeniería genética orientadas a obtener dicha propiedad. Hoy esa modificación genética se ha logrado no solo para cultivos de soja sino, también, de maíz y algodón, entre otros cultivos.

La combinación de un herbicida de amplio espectro y de cultivos resistentes a su acción permitió simplificar notablemente el manejo del sistema agrícola. Entre otras cosas, hizo posible la eliminación del laboreo del suelo, una operación compleja que consiste en dar vuelta la capa superficial con un arado y nivelar la tierra con rastras, y reemplazarlo por la siembra directa, que consiste en depositar la semilla en el suelo sin realizar todo lo anterior.

Esto significa que el control de las malezas basado en el aprovechamiento de interacciones entre el cultivo y el ambiente, indicado al comienzo del artículo como elemento necesario para un manejo racional de un sistema agronómico, resulta reemplazado por el uso de un insumo externo.

Sin embargo, ese uso está también relacionado con otras decisiones, como la fecha y densidad de siembra, las cuales, tomadas correctamente, reducen significativamente la dependencia del insumo externo. Tal disminución se logra usando correctamente los insumos internos, como se explica en el recuadro 'Insumos internos de los sistemas agrícolas'.

Existen evidencias claras de que los cultivos pueden tolerar determinada densidad de malezas en algunos períodos de su ciclo de crecimiento, y que el rendimiento en granos no se ve afectado por ellas. Así, el conocimiento de la biología del cultivo y de las malezas es un camino que conduce a reducir el uso de herbicidas, au-

mentar los márgenes de beneficio económico y reducir tanto la presión sobre el ambiente como la dependencia del sistema de un insumo externo

## Conclusiones

Un análisis minucioso del funcionamiento de los sistemas agrícolas permite determinar y jerarquizar los factores que impiden la obtención de altos rendimientos. Muchas veces se trata de la escasez de un recurso de los llamados limitantes, cuyo aumento de disponibilidad incrementa la producción del sistema. Pero para obtener una buena respuesta al agregado de un recurso, el resto de los factores deben presentarse en sus valores óptimos. En términos prácticos, el control de plagas, el aumento de agua o el incremento de nutrientes serán efectivos para elevar la productividad si hay un buen ajuste entre oferta y demanda de servicios ambientales.

Lograr ese ajuste depende del conocimiento de los procesos internos del ecosistema y de tomar las decisiones agronómicas que resultan de él, de suerte que sea mínimo el uso de insumos externos. Por ese camino la agricultura actual podrá reducir su dependencia de los insumos externos y hacer un óptimo uso de ellos. La transferencia de conocimiento a los agricultores por parte de universidades, reparticiones oficiales u otras entidades es fundamental para la difusión de técnicas y prácticas adecuadas de manejo, basadas en la comprensión de la ecología más que en la aplicación de insumos externos, para elevar los rendimientos de los cultivos. 

### LECTURAS SUGERIDAS

DAILY GC *et al.*, 1997, 'Servicios de los ecosistemas: beneficios que la sociedad recibe de los ecosistemas naturales', *Tópicos en Ecología*, 2: 1-16.  
LOOMIS RS & CONNOR DJ, 2002, *Ecología de cultivos: productividad y manejo de sistemas agrarios*, Mundi Prensa Libros S.A.  
PIMENTEL D & PIMENTEL M, 2008, *Food, energy, and society*, CRC Press.  
VAN ITTERSUM MK & RABBINGE R, 1997, 'Concepts in ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations', *Field Crops Research*, 52: 197-208.



#### Diego O Ferraro

Doctor en ciencias agropecuarias, UBA.  
Jefe de trabajos prácticos de cerealicultura, Facultad de Agronomía, UBA.  
Investigador adjunto del Conicet.  
[ferraro@agro.uba.ar](mailto:ferraro@agro.uba.ar)



#### Florencia Rositano

Ingeniera agrónoma, Facultad de Agronomía, UBA.  
Ayudante de primera de cerealicultura, Facultad de Agronomía, UBA.  
Becaria doctoral del Conicet.  
[rositano@agro.uba.ar](mailto:rositano@agro.uba.ar)

Marcelo Javier Wolansky

Departamento de Química Biológica,  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA

# Plaguicidas y salud humana

## Cultivos, plagas y plaguicidas

Este artículo discute las características y los riesgos del uso agrícola de los plaguicidas que fueron descriptos en una nota anterior de este mismo número (‘¿Qué son los plaguicidas?’). Ese uso tiene aspectos comunes con su utilización residencial, y otros específicos de las tareas de producción, acopio y transporte de la materia prima de los alimentos. El presente texto no considera otras aplicaciones de esas sustancias, como el control de plagas transmisoras de enfermedades (por ejemplo, las vinchucas transmisoras del *Trypanosoma cruzi*, microorganismo responsable del mal de Chagas), o el desmalezado de caminos, parques y jardines.

Los cultivos y los centros de almacenamiento y distribución de alimentos están amenazados por plagas variadas, desde insectos voladores o caminadores, hasta malezas, roedores y hongos. En las distintas fases de su ciclo de vida, los cultivos presentan distinta susceptibilidad a las plagas. Un mismo cultivo, por ejemplo la manzana, puede requerir el uso de diferentes plaguicidas a lo largo del proceso de siembra, crecimiento de la planta, cosecha, acopio, transporte e industrialización.

Pero los evidentes beneficios del uso de plaguicidas químicos no están exentos de amenazas. En la actualidad se debate cuáles son los riesgos reales y dónde está el límite de lo que se puede considerar aceptable. La discusión se debe a: (i) la mayor conciencia pública de los riesgos de la contaminación ambiental; (ii) la globalización de los cambios ambientales, y (iii) las nuevas actitudes culturales y la nueva legislación sobre plaguicidas. A este respecto son ilustrativos los fundamentos de la Ley de Protección de la

Calidad de los Alimentos de los Estados Unidos (Food Quality Protection Act).

## Las plagas adquieren resistencia a los plaguicidas

En un plaguicida, el compuesto que actúa contra la plaga se llama *ingrediente activo*. Los plaguicidas comerciales pueden contener uno o más de esos ingredientes, acompañados de un número variable de sustancias inactivas. Los ingredientes activos actúan de diversas maneras. Por ejemplo, muchos insecticidas afectan el sistema nervioso de los insectos plaga, lo que les impide obtener suficiente alimento o reproducirse. A veces el individuo-plaga no muere de inmediato por efecto del producto, sino por inanición. La tabla 1 muestra diversos modos de acción de plaguicidas con relación a una gran diversidad de plagas.

Si bien los plaguicidas son razonablemente eficaces, tarde o temprano aparece resistencia a ellos en las plagas. Esto se debe a que por lo común unos pocos individuos portan características genéticas que los hacen menos vulnerables al producto, sobreviven a los tratamientos y lo gran reproducirse. Transmiten así ese rasgo a su descendencia, mientras los individuos más susceptibles mueren sin dejar descendientes. Las nuevas poblaciones adquieren de esta manera una resistencia al plaguicida que impide controlarlas con eficacia y, luego de algunos años de uso continuo del producto, se precisan hasta mil veces la cantidad de este que se recomendaba aplicar cuando se lo usó por primera vez. Es decir, los ingredientes activos dejan de

### ¿DE QUÉ SE TRATA?

Las plagas no se pueden controlar en forma eficaz y predecible sin plaguicidas. No hay plaguicida exento de riesgos para la salud humana y el ambiente. No hay agricultura moderna sin plaguicidas. No hay posibilidad de alimentar a la población mundial sin agricultura moderna. ¿Cómo se sale de este aparente dilema?

Nombre genérico	Clase	Plaga	Modo de acción	Ejemplos
Insecticidas	Organofosforados	Insectos voladores, saltadores y caminadores	Alteración de la excitabilidad del sistema nervioso	Clorpirifos Metilazinfos, Diazinon
	Carbamatos			Carbaril, Propoxfur
	Piretroides			Deltametrina β-ciflutrina
	Organoclorados			DDT* Lindano*, Endosulfan*, Dieldrin*
Herbicidas	Inhibidores de la síntesis de biomoléculas	Malezas	Inhiben la síntesis de aminoácidos esenciales para la vida vegetal  Interfieren otros procesos críticos para el desarrollo completo de la planta-maleza	Glifosato Glufosinato Atrazina, Linuron 2,4-D, Dicamba Paraquat
	Otras clases			
Rodenticidas	Cumarínicos Indanedionas	Ratas, ratones y otros roedores silvestres	Inhiben la síntesis hepática de factores de coagulación sanguínea	Brodifacum, Cumatetralilo Warfarina Clorfacinona
Fungicidas	Imidazoles Dicarboximidias Pirimidinas Piperazinas Triazoles Carbamatos Amidas de arilo	Hongos, mohos	Desorganización de estructuras o funciones celulares esenciales para la supervivencia	Metalaxil, Vinclozolina Triadimefón

**Tabla 1.** Principales plaguicidas, plagas que combaten y su modo de acción. Un asterisco identifica productos actualmente prohibidos o de uso restringido por ser peligrosos para las personas aun en dosis bajas.

ser efectivos en dosis aceptables. Usar cada vez más cantidad de plaguicida en cada tratamiento no solo aumenta los costos sino también acelera la acumulación del ingrediente activo en el agua, el suelo, el aire y los alimentos, con el consecuente aumento del riesgo de exposición tóxica para la salud humana.

Hay situaciones en que las áreas tratadas son muy extensas, por ejemplo, cuando se recurre a herbicidas que eliminan toda la cobertura vegetal. Tal es el caso de la soja en la Argentina, donde la variedad cultivada tiene resistencia a ese tipo de herbicidas, adquirida por ingeniería genética. Esos cultivos pueden recibir hasta cuatro aplicaciones del desmalezante por ciclo productivo sin que sufran daño significativo. Así se extiende un doble efecto indeseado: la aparición y difusión de resistencia en la plaga, y la diseminación de cantidades crecientes del plaguicida en el ambiente. Una forma de retrasar o reducir este problema es la rotación de cultivos y de plaguicidas con distintos ingredientes activos.

## La cuestión toxicológica

La mayoría de los plaguicidas no afectan exclusivamente a los organismos contra los que están dirigidos. También tienen repercusión sobre los mamíferos, incluyendo la especie humana. Es fácil entender intuitivamente que si un mosquito pesa 50mg y una persona 50kg, las dosis de

plaguicida que dañarían a uno y otro son bien distintas. Pero hay aspectos del uso de plaguicidas que impiden sacar conclusiones tan sencillas como la que sugiere esta comparación.

En primer lugar, cuando hablamos de plagas no nos referimos a unos pocos mosquitos en una habitación. Por lo común tratamos de repeler o eliminar a miles de gusanos, langostas y otros insectos que amenazan la siembra o la cosecha en áreas cultivables de cientos y aun miles de hectáreas. Pero las plagas nunca se eliminan: se las controla, es decir, se reduce su número o se las repele en forma temporaria. Además, las extensiones tratadas con plaguicidas suelen estar en contacto directo o indirecto con áreas residenciales de cientos o miles de personas. Por estas razones, no hay forma de escapar para siempre de las plagas, ni de la exposición a pequeñas cantidades de plaguicidas.

En segundo lugar, los plaguicidas pueden producir efectos adversos de variada gravedad en nuestro organismo. A partir de ciertas dosis, son tóxicos tanto para las plagas como para las personas. Decir que una dosis es segura implica mucho más que afirmar que no provocaría una intoxicación aguda letal. Los efectos de los plaguicidas en los seres humanos varían según sus modos de acción, las dosis y las características de cada individuo. Pueden tener efectos reconocibles de inmediato o manifestarse con retardos de meses o años. Pueden ocurrir efectos reversibles, persistentes o permanentes.

Luego de una exposición aguda o acumulativa a plaguicidas pueden ocurrir efectos leves y pasajeros, como sar-

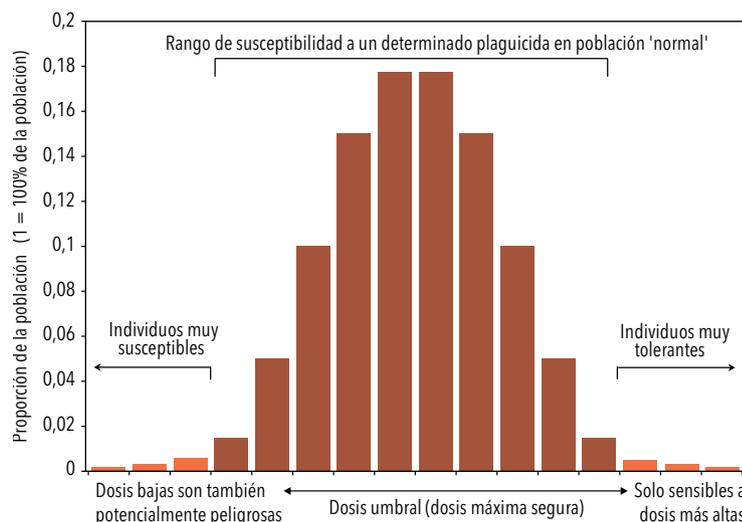
pullido o adormecimiento de los dedos; moderados, como crisis más frecuentes en los asmáticos; o graves, como convulsiones. Entre las consecuencias irreversibles más serias se cuentan malformaciones congénitas luego de exposición repetida durante períodos sensibles de la gestación, trastornos glandulares y cáncer. El rango de dosis capaz de producir efectos adversos de variada severidad es muy extenso, pero como regla general se cumple que a mayor dosis, mayor daño. Por ejemplo, en ratas, dosis de insecticidas piretroides hasta veinte veces menores que las que producen toxicidad severa bastan para causar alteraciones del movimiento.

En función de lo que se observa en estudios de animales de laboratorio, es razonable suponer que si las personas se exponen repetidamente a pequeñas cantidades de plaguicidas a lo largo de sus vidas, dejan de tener riesgo nulo de sufrir efectos adversos. Idealmente, se debería evitar todo daño previsible a la salud por el uso de plaguicidas. Cuidarnos de sufrir consecuencias leves y reversibles es la mejor manera de evitar daños graves e irreversibles. Pero en el mundo real las cosas son algo más complejas, porque los plaguicidas traen beneficios (por ejemplo, aseguran que haya suficiente cantidad de alimentos), de modo que la regla debería ser solo aceptar riesgos que sean claramente y en forma verificable menores que esos beneficios.

En tercer lugar, los compuestos plaguicidas sufren transformaciones dentro y fuera de los organismos vivos, por las que, luego de cada aplicación, quedan *residuos* (con distintas estructuras químicas) que también pueden ser tóxicos. Además, los plaguicidas pueden contener uno o más ingredientes mal llamados *inactivos*, que modulan la actividad del ingrediente activo. Por ejemplo, la mayoría de los herbicidas actúan sobre sitios o procesos de las células vegetales que no existen en los animales, pero los productos de transformación y los componentes inactivos pueden resultar tóxicos para estos, en especial los mamíferos. Esto podría suceder con herbicidas como el glifosato, aunque aún no hay evidencia científica y epidemiológica conclu-



Hoja de tilo (*Tilia cordata*) atacada por el hongo *Cercospora microsora*. Foto Beentree, Wikimedia Commons.



Representación de la variabilidad biológica teórica de una población: distribución de sus miembros según las dosis umbral de plaguicida que afecta su salud.

yente al respecto. Algunos insecticidas incluyen inhibidores de enzimas que degradan los ingredientes activos, para potenciar el efecto del plaguicida. Esas enzimas son mecanismos de defensa eficaces en los humanos, por lo que esos ingredientes adicionales también pueden potenciar la toxicidad para las personas.

Nuestra percepción de los riesgos y beneficios de los plaguicidas a menudo está deformada por falta de buena información, con el resultado de que tomamos actitudes negligentes. Los agricultores a veces aplican más plaguicida que el recomendado 'por si acaso'. La conducta de la gente con los plaguicidas se basa en su educación, hábitos, emociones, experiencia, influencia de los medios de información y de la publicidad, y factores socioculturales.

Pero si toda la población mundial, tarde o temprano, queda expuesta en forma activa o pasiva y de manera reincidente a plaguicidas, y si todos somos vulnerables a ellos, ¿por qué los casos graves de intoxicaciones son la excepción más que la regla? Por tres razones que examinaremos sucesivamente: la variabilidad biológica del organismo, las medidas de prevención y las actitudes precautorias.

## Variabilidad biológica y vulnerabilidad a plaguicidas

Así como existe variabilidad genética, también existe una amplia variabilidad de respuesta a sustancias tóxicas entre los individuos de una misma especie, como el ser humano. Las diferencias en los órganos y tejidos de los seres humanos, lo mismo que en los de las plagas, hacen que una misma cantidad de plaguicida ocasione distintos niveles de daño en cada individuo. Por ello, la dosis por encima de la cual un individuo manifiesta signos de intoxicación —o *dosis umbral*— es variable de uno a otro. Si pudiéramos

agrupar a los individuos de una población suficientemente numerosa de acuerdo con la dosis umbral que presenta cada uno para un determinado plaguicida, posiblemente podríamos trazar un gráfico como el que muestra la figura. Pero dado que no hay forma práctica de realizar estudios de laboratorio o epidemiológicos que comprueben lo anterior, y que para cada plaguicida la mayoría de la población tiene dosis umbral dentro de un rango conocido, se dice que esa mayoría responde en forma 'normal' o 'según lo esperado'. Sin embargo, existen dos grupos minoritarios, aunque significativos desde un punto de vista epidemiológico: los individuos *tolerantes*, para quienes solo dosis altas resultan tóxicas, y los *susceptibles*, que manifiestan alteraciones aun cuando son expuestos a dosis bajas.

Además, la variación biológica se expande aun más si consideramos que la población normal, en realidad, es una entidad definida estadísticamente. En la Argentina, hasta un 35% de la población padece de alguna de las siguientes condiciones: diabetes, obesidad, síndrome metabólico, insuficiencia hepática, cardiopatía, insuficiencia renal, desnutrición o consumo de drogas terapéuticas o recreativas. Esas alteraciones del bienestar ideal pueden afectar, en mayor o menor grado, la dosis umbral de un plaguicida. ¿En qué parte de la figura quedarían ubicados esos casos? No sabemos con exactitud, aunque teóricamente ocupan los extremos de la distribución.

La variabilidad biológica explica tanto la existencia de individuos tolerantes como la incidencia relativamente baja de intoxicaciones graves por plaguicidas. Pero la misma heterogeneidad biológica entre individuos y el amplio rango de dosis que puede producir algún efecto sugiere que debería haber más casos de toxicidad leve a moderada que los registrados. Posiblemente haya muchos casos de intoxicación invisible que se confunden con síntomas clínicos frecuentes, como dolor de cabeza, mareos o debilidad muscular, aunque no lo sabemos a ciencia cierta.

## Medidas de prevención

Para asegurar que las aplicaciones de plaguicidas no tengan efectos tóxicos en la gente, se han sancionado normas y establecido procedimientos que los fabricantes de esos productos deben respetar para poner en el mercado nuevos ingredientes activos o promover nuevas aplicaciones de productos autorizados. Las entidades legalmente competentes deben evaluar si es aceptable el riesgo que resulta del almacenamiento de un plaguicida en centros de distribución, de la manipulación del envase por el usuario final, de los procedimientos recomendados para cada aplicación, y de la distancia entre el área a tratar y las zonas residenciales, entre otras cuestiones. En la Argentina, varios organismos nacionales controlan el uso de plaguicidas desde su fabricación hasta el descarte de sus sobrantes (tabla 2).



Una mariposa de isoca de la alfalfa (*Colias lesbia*) posada sobre una maleza común en Sudamérica (*Eupatorium inulifolium*). El insecto es inofensivo en su estado de mariposa, que muestra la foto, pero sumamente dañino en su estado anterior de larva, cuando se alimenta del follaje y puede aparecer en grandes números en cultivos. Una invasión de isoca puede destruir por completo un alfalfar o un campo de soja y dejar solo los tallos sin hojas. Foto Silvia Sokolowsky.

Esa multiplicidad de organismos sugiere lo complejo que es realizar un control efectivo de los efectos adversos de los plaguicidas, desde su elaboración a su uso, incluyendo situaciones tan diversas como la manufactura de ingredientes activos, el transporte y la aplicación en ambientes muy diversos, como la desinsectización de gallineros y tambos o el tratamiento de campos cultivados con aviones fumigadores.

Las empresas deben presentar documentación con los resultados de estudios toxicológicos, y solo cuando sus resultados permiten estimar una dosis segura, y además cuando esa dosis es claramente mayor que la resultante de la aplicación del plaguicida realizada en la forma autorizada, se aprueba el uso de un nuevo ingrediente activo y la venta de los productos comerciales que lo contienen.

Adviértase que no solo se autoriza un producto químico sino también su aplicación, la que, en última instancia, acarreará las consecuencias ambientales que pueden afectar la salud humana. Así, si un fungicida se autoriza para frutillares, no puede usarse en otro cultivo hasta que la nueva propuesta de uso haya sido evaluada y autorizada. Cada aplicación tiene procedimientos específicos, porque la plaga y la frecuencia de tratamiento pueden diferir, lo mismo que la concentración requerida del ingrediente activo, y ello modifica la formación, acumulación y distribución de residuos ambientales, lo mismo que el riesgo para la salud humana.

Las autoridades pueden permitir o negar el uso de un nuevo producto, solicitar información técnica adicional o autorizar solo determinadas formas de aplicarlo. No todo lo

Organismo	Área de competencia	Sitio de consulta
Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica	Inocuidad de los residuos de plaguicidas en los alimentos	<a href="http://www.anmat.gov.ar">www.anmat.gov.ar</a>
Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria	Calidad de la materia prima de los alimentos	<a href="http://www.senasa.gov.ar">www.senasa.gov.ar</a>
Instituto Nacional del Agua	Calidad de las fuentes de agua	<a href="http://www.ina.gov.ar">http://www.ina.gov.ar</a>
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria	Uso racional del suelo, los ganados y los productos agroquímicos	<a href="http://www.inta.gov.ar">http://www.inta.gov.ar</a>
Ministerio de Salud de la Nación	Acciones preventivas, paliativas o terapéuticas contra las intoxicaciones humanas con plaguicidas	<a href="http://www.msal.gov.ar">http://www.msal.gov.ar</a>
Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable y Agencia de Protección Ambiental de la Ciudad de Buenos Aires	Protección de la salud ambiental y los ecosistemas	<a href="http://www.ambiente.gov.ar">http://www.ambiente.gov.ar</a> y <a href="http://www.buenosaires.gov.ar/areas/med_ambiente/apra/">http://www.buenosaires.gov.ar/areas/med_ambiente/apra/</a>
Administración Nacional de Aduanas	Ingreso de productos peligrosos o prohibidos por las fronteras	<a href="http://www.afip.gov.ar">http://www.afip.gov.ar</a>

**Tabla 2.** Instituciones argentinas que controlan la seguridad de los plaguicidas.

aprobado en determinados países es autorizado en otros. El fabricante debe demostrar que en todos los casos, en la dosis indicada, el producto será efectivo para el uso previsto, y que sus residuos no pondrán en riesgo la salud humana ni el equilibrio de los ecosistemas. Para poder hacerlo, debe haber estudiado los efectos inmediatos (dentro de 24 horas) de una exposición única y los efectos de exposiciones repetidas a lo largo de meses o años. Eso se hace experimentando con animales que tengan cierta similitud anatómica y fisiológica con los humanos, principalmente ratas, ratones y perros.

El riesgo de sufrir daños por contacto con plaguicidas depende tanto de la toxicidad de la sustancia como del nivel de exposición a ella. La peligrosidad del ingrediente activo se puede expresar de diversas formas, que dependen de exactamente qué se procura estimar, como lo explica la sección *Toxicidad* del artículo ‘¿Qué son los plaguicidas?’ publicado en este mismo número.

También se debe estimar cómo se degrada un plaguicida y cuánto llega a acumularse en diversos sitios del ambiente. Para que se autorice una sustancia, se debe obtener información confiable sobre ambas cuestiones. Esos estudios ecotoxicológicos permiten determinar si el producto es peligroso para especies animales y vegetales no consideradas plagas (por ejemplo, las abejas productoras de miel).

De lo dicho se sigue que la expresión *dosis segura* no se define como un límite preciso y fijo, aplicable a cualquier situación e individuo, sino como un nivel de exposición de referencia que siempre incluye un margen de incertidumbre que debemos tener en cuenta. Una dosis máxima segura no protege con la misma seguridad a todos. Para estimar una dosis segura y la incertidumbre asociada se hacen pruebas con animales, en las cuales se estima la diferente respuesta biológica de, por ejemplo, roedores y humanos, y las variación de sensibilidad esperable entre individuos de la misma especie. Estas dos

fuentes de variabilidad explican la mayor parte de la incertidumbre.

Cuando no se pudo identificar en estudios de animales la dosis máxima segura se utiliza la menor dosis con efecto detectable y se le agrega factores de seguridad adicionales. Si bien el procedimiento regulatorio es bastante más complejo, puede ilustrar al lector indicar que si para un determinado plaguicida se fijó un factor de seguridad de 100 y si la dosis máxima que no produce intoxicación perceptible en una la rata es 1mg por cada kilo de su peso, se autorizarán solo aquellas aplicaciones del plaguicida que, como máximo, expongan a las personas a dosis 100 veces menores (0,01mg/kg).



Un cultivo atacado por tucura (*Dichropolus sp.*), insectos de unos 3cm con alas en forma de abanico y fuertes patas con las que dan saltos. Nacen en la primavera y pueden formar mangas que atacan los cultivos de verano. Mueren con los fríos del otoño, después de desovar y así permitir la repetición del ciclo en la primavera siguiente. Foto Picasa.



Fumigación terrestre de un cultivo. Foto Mississippi State University Extension Service.

## Actitud precautoria

Nuestra actitud afecta la probabilidad de ser víctima de intoxicación por plaguicidas. Podemos optar por plaguicidas de menor toxicidad, o aplicar varios en forma simultánea, para reducir la exposición a cada uno. No es lo mismo fumigar desde aviones que desde vehículos terrestres, pues la proporción de residuos en el área sembrada, a la que se apunta, y en sus alrededores, variará. Temperatura, humedad, vientos y lluvias modificarán la velocidad de dispersión y degradación del plaguicida luego de cada tratamiento. Hay instrucciones rigurosas que indican cómo, cuándo, dónde y con qué intensidad se debe aplicar cada plaguicida en cada cultivo y geografía. Como el riesgo está en relación directa con la exposición, cuanto más se eviten exposiciones innecesarias, menos probable será sufrir trastornos.

Los productos plaguicidas deben ser seleccionados, transportados, almacenados, utilizados y descartados en forma racional, siguiendo las condiciones de manejo seguro autorizadas por los entes regulatorios municipales, provinciales y nacionales. Son frecuentes, sin embargo, las actitudes negligentes, como falta de vestimenta de protección. Algunos plaguicidas pueden contaminar y tener efectos acumulativos de diversa gravedad con exposiciones muy bajas. En consecuencia todos, autoridades y particulares, deben estar alerta para ir comprobando que los beneficios y los riesgos se mantengan en los órdenes estimados en el momento de la aprobación.

Si se postula que los plaguicidas modernos son compatibles con un crecimiento agroindustrial sostenible y con el equilibrio ecológico, ¿qué impide prevenir las intoxicacio-

nes no accidentales? La falta de datos toxicológicos relevantes parece constituir el principal obstáculo a sortear en las próximas décadas para alcanzar el ideal del uso seguro de plaguicidas. Sin datos toxicológicos completos obtenidos por experimentos rigurosos con animales y estudios epidemiológicos válidos es imposible predecir daños potenciales en humanos. Si bien en la segunda mitad del siglo XX hubo un desarrollo explosivo y un refinamiento constante de productos plaguicidas sintéticos, una parte importante de estos aun tiene baja capacidad de restringir su efecto a la plaga para la cual fue creada, y afecta a mecanismos moleculares y celulares que carecen de diferencias relevantes en las plagas y los humanos.

Existe una cantidad de preguntas importantes que todavía no tienen respuestas, o tienen algunas muy preliminares. Por ejemplo, ¿cambia el riesgo si nos exponemos primero al insecticida A y luego al B en vez de hacerlo en orden inverso? ¿A igual exposición, corren el mismo riesgo los diabéticos que los no diabéticos? ¿Es más grave acumular exposiciones bajas durante años o sufrir una intoxicación aguda por un único episodio de contaminación? Lo que ignoramos hace imposible establecer con seguridad que no estemos ante a un problema de salud pública mayor a lo sospechado hasta el presente.

## Aprovechamiento racional y sostenible de los plaguicidas

Siglos atrás, morir o sobrevivir eran opciones más frecuentes para la mayoría de la población mundial. Eran

tiempos en que se usaban plaguicidas naturales de baja eficacia o compuestos de alta peligrosidad, como sales arsenicales y mercuriales, más tarde prohibidas por su alta peligrosidad. Esa situación fue cambiando, de suerte que, promediando el siglo XX, los gobiernos crearon marcos regulatorios y empezaron a proteger en forma sistemática a la población de trastornos no letales, como malformaciones congénitas o tumores originados por exposición a compuestos químicos tóxicos.

Solo en las últimas tres o cuatro décadas se hicieron más estrictas las normas sobre autorización de productos tóxicos, y más recientemente se empezó a requerir que las agencias gubernamentales y la industria presenten evidencias sobre las consecuencias de exponerse simultáneamente a más de una sustancia. Hoy se intenta prevenir la toxicidad acumulativa aplicando nuevos procedimientos de evaluación experimental con animales. La pregunta más relevante a responder es si los episodios individuales de exposición cotidiana, que separadamente no producen síntomas inmediatos de intoxicación, pueden llegar a producir daños a nuestra salud cuando ocurren en forma simultánea.

Muchos productos fueron autorizados antes de que llegara el actual uso masivo de plaguicidas. Hoy existe cultivo de soja hasta en zonas históricamente desfavorables, como el noroeste argentino. La mayoría de los experimentos pasados con animales han estudiado dosis altas de plaguicidas individuales en condiciones controladas de laboratorio. ¿Es esa la situación de la mayoría de la población humana, que se expone diariamente a mezclas variables de dosis bajas de plaguicidas y muchos otros productos químicos (por ejemplo, medicamentos y cosméticos)? ¿Existe en los servicios de salud suficiente capacidad de detección de intoxicaciones leves con plaguicidas?

Lo afirmado hasta aquí se basa en lo que sabemos. Si bien existe acuerdo sobre la inocuidad de las aplicaciones de plaguicidas evaluadas individualmente —si se respetan estrictamente los procedimientos aprobados en el momento de su autorización oficial—, evidencias recientes sugieren que la acumulación de aplicaciones inocuas puede producir trastornos funcionales que aún no sabemos cómo reconocer. Y no se puede reducir el riesgo de sufrir un peligro que no sabemos cómo detectar.

Por eso, los organismos de control deben poner el mismo esfuerzo que pusieron en asegurarse de la seguridad de las aplicaciones antes de autorizarlas, en verificar que sucede después de esa autorización. Es decir, es necesario que controlen en forma sistemática tanto el cumplimiento de las normas de uso y la contaminación ambiental, como los efectos agudos y crónicos que se puedan registrar en ámbitos hospitalarios.

En la mayoría de los países, incluida la Argentina, las entidades públicas y privadas han hecho un seguimiento insuficiente del uso de pesticidas. En medios científicos no hay consenso sobre qué tipo y cantidad de información habría que generar antes y después de la aprobación de plaguicidas para prevenir las intoxicaciones leves, que son las más difíciles de detectar, lo mismo que para realizar un diagnóstico temprano de trastornos agudos y crónicos. Sin esfuerzos que evalúen la eficacia de los sistemas de prevención de toxicidad por plaguicidas, las políticas regulatorias de protección de la comunidad seguirán padeciendo la carencia de información toxicológica y epidemiológica relevante. Hasta que existan más certezas sobre las consecuencias de la exposición cotidiana a múltiples plaguicidas, una actitud precautoria parece ser la mejor herramienta para protegernos adecuadamente de los riesgos químicos del mundo actual. **CH**

## LECTURAS SUGERIDAS

ALTAMIRANO JA *et al.*, 2004, 'Modelo epidemiológico para el diagnóstico de intoxicaciones agudas por plaguicidas', *Revista de Toxicología*, 21, 2-3: 98-102.

MINISTERIO DE SALUD DE LA NACIÓN, 2010, 'Programa nacional de prevención y control de intoxicaciones por plaguicidas', *Boletín Oficial*, 16/02, Buenos Aires.

NEBEL BJ y WRIGHT RT, 1999, 'El control de plagas. Promesas y problemas de los métodos químicos', en *Ciencias ambientales: ecología y desarrollo sostenible*, Prentice Hall, México.

### INTERNET

<http://www.mspes.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/docs/plaguicidas.pdf>.

<http://www.fao.org/agriculture/crops/core-themes/theme/pests/ipm/more-ipm/en/>

<http://www.fao.org/Noticias/1998/ipm-s.htm>

<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/new.consultaPublicacion.php>.

[http://www.who.int/occupational\\_health/publications/en/pwh1sp.pdf](http://www.who.int/occupational_health/publications/en/pwh1sp.pdf).



**Marcelo Javier Wolansky**

Doctor en ciencias biológicas, UBA.  
Profesor adjunto de toxicología, FCEN,  
UBA.  
Investigador adjunto del Conicet.  
[marcelow@biolo.bg.fcen.uba.ar](mailto:marcelow@biolo.bg.fcen.uba.ar)

# Consecuencias ambientales del uso de pesticidas

El uso agrícola de la tierra genera cambios ambientales y alteraciones en los ecosistemas. Si bien es posible identificar algunos de los factores y procesos que impulsan esos cambios, la complejidad de los sistemas agrícolas hace difícil su jerarquización.

Los riesgos de que los insumos agrícolas (insecticidas, herbicidas, fertilizantes, enmiendas, agua de riego, organismos-cultivo, etcétera), o las formas de labranza de la tierra originen alteraciones ambientales pueden predecirse mediante investigación científica. Pero realizar una estimación certera de ellos no es tarea sencilla, ya que se fundamenta en inferencias construidas a partir de resultados experimentales que, frecuentemente, son de difícil verificación.

La primera dificultad enfrentada por los investigadores que procuran estudiar esas alteraciones —usualmente denominadas *impacto ambiental*— es identificar qué factores determinan su nivel y qué parámetros se deben medir para evaluarlas. A pesar de que en la literatura científica abundan los intentos de contestar esas preguntas, la información disponible no parece suficiente para resolver el debate sobre los beneficios y riesgos ambientales del uso de pesticidas.

La aparición del glifosato y la necesidad de determinar las consecuencias de su aplicación prolongada proporcionan una buena ilustración de la complejidad que mencionamos. Para entender el caso y analizar las consecuencias de la aplicación de ese herbicida sobre sistemas biológicos particulares, como los de la región pampeana, no podemos abstraernos de considerar las repercusiones generales de cualquier tipo de agricultura.

Durante la primera mitad del siglo XX, cuando los pastizales naturales de la región pampeana quedaron definitiva-



Un tordo músico (*Agelaioides badius*), ave autóctona de la llanura pampeana, posada sobre una planta de sorgo de Alepo (*Sorghum halepense*), especie originaria del Mediterráneo que ha invadido todos los continentes. Foto Federico Weyland.

## ¿DE QUÉ SE TRATA?

El hamletiano *ser o no ser* podría encontrar su equivalente agrícola en aplicar o no aplicar pesticidas a los cultivos. Pero no hay, en realidad, una alternativa absoluta, sino la búsqueda del mejor camino para poder alimentar a la humanidad y evitar males nacidos de la contaminación ambiental.

mente convertidos en un paisaje agrícola, los cambios ambientales ya eran evidentes. El nuevo escenario fue el resultado de reordenamientos de la flora y la fauna locales, con lo que la distribución geográfica y la abundancia de muchas poblaciones animales y vegetales se redujeron, mientras que los de otras se expandieron. El botánico Lorenzo Parodi escribió, en 1960, que los campos y las parcelas cultivadas se distinguían por la presencia de asociaciones de plantas no autóctonas, llamadas para los ecólogos *exóticas*, que estructuraban comunidades de malezas distintas de las de los pastizales nativos.

Con el aumento del área cultivada, las comunidades de malezas presentes en tierras aradas para sembrar se enriquecieron, primero por la colonización de esas tierras por algunas especies del pastizal original, y luego porque las mismas malezas tenían gran capacidad de sobrevivir en esas tierras en labranza. Aprovechando el nuevo hábitat creado por extensas prácticas de monocultivo, muchas de las poblaciones introducidas se establecieron y expandieron en forma epidémica, lo que creó problemas serios para la producción agrícola y, por ende, para su rendimiento económico. Este fenómeno se repitió con comunidades de artrópodos, vertebrados y hongos.

## Los pesticidas y las prácticas agrícolas

Como lo indica la referencia histórica del artículo '¿Qué son los plaguicidas?' de este mismo número, desde alrededor de 1950 se generalizó en la agricultura pampeana el uso de herbicidas (fundamentalmente el 2,4D) y de insecticidas (principalmente clorados, como el DDT), los segundos sobre todo para controlar las orugas o isocas y las pequeñas langostas llamadas tucuras en cultivos de alfalfa. Ese uso fue variando en cuanto a los productos, pero se amplió notablemente, lo que generó las preocupaciones acerca de sus posibles efectos tóxicos sobre la salud humana enfocados en la nota 'Plaguicidas y salud humana', también en este número de CIENCIA HOY. En la presente nota nos concentraremos en las consecuencias ambientales de esos compuestos.

En la Argentina, el uso masivo de plaguicidas coincidió con la expansión agrícola pampeana hacia áreas de bosque chaqueño y otras de pastizales inundables, en las que se implantó una agricultura permanente. También coincidió con la técnica del laboreo reducido de la tierra o siembra directa, en reemplazo del tradicional arado de reja y vertedera que removía el suelo. La siembra directa tuvo el propósito inicial de reducir la erosión del suelo causada por el uso del arado, pero requirió que el control de las malezas de los cultivos se realizase con herbicidas, pues quedó eliminada la acción de dar vuelta la capa superficial de suelo por el arado. Asimismo, la di-



Plantas de sorgo de Alepo en un cultivo de soja tratado con glifosato. Advértase que algunas plantas de la maleza sobrevivieron el tratamiento.

versidad de cultivos se redujo en la región y la soja dominó el paisaje agrícola.

En el último par de décadas se fue consolidando una situación por la que los insecticidas piretroides y el herbicida glifosato ocupan más de la mitad del mercado nacional de plaguicidas agrícolas. La gran extensión en la que se emplean esos productos y, sobre todo, la cantidad de herbicida aplicado más de una vez por año, aumentaron la preocupación sobre las consecuencias ambientales de su uso. La utilización de glifosato se multiplicó por más de diez en dicho período, lo que llevó, en algunos círculos, dicha preocupación sobre el riesgo potencial de efectos ambientales negativos a niveles de alarma.

## ¿Qué determina el efecto ambiental de un plaguicida?

Existe consenso acerca de que las alteraciones del ambiente causadas por los pesticidas dependen de su toxicidad, de su grado de movilidad y de su tiempo de permanencia o *residualidad* en el ecosistema.

El pesticida aplicado en un sitio puede pasar a la atmósfera por evaporación o permanecer en el suelo. En el segundo caso, varios procesos determinan su destino final, entre otros, su retención por sedimentos o por partículas suspendidas en el agua, fenómeno denominado *adsorción*; su ingreso en el metabolismo de las plantas; su degradación por microorganismos o *biodegradación*; y su arrastre por agua o *lixiviación*, que puede causar la contaminación de aguas superficiales o



**De arriba hacia abajo.** Acción del glifosato en el control de la vegetación de las banquinas de caminos y de áreas cultivadas en la pampa ondulada. La primera foto muestra el crecimiento natural de la vegetación; en la segunda se ve un cultivo de trigo (derecha) al borde de un camino desmalezado por acción del glifosato, y en la tercera se aprecia el efecto de la aplicación del herbicida tanto en el camino como en el campo de cultivo. Fotos Federico Weyland.

profundas. Las propiedades del pesticida y del suelo, más las condiciones climáticas definen la probabilidad de que acontezcan estos procesos.

Existe gran disparidad en la literatura acerca de la capacidad de retención de glifosato por distintos tipos de suelo, lo mismo que sobre las probabilidades de su degradación. Una abundante bibliografía señala que el glifosato posee alta propensión a ser retenido por las partículas del suelo, ya que se carga eléctricamente y se adsorbe con fuerza a la materia orgánica. Con ello abandona el agua y permanece inmóvil o se mueve poco en el suelo.

Sin embargo, en suelos muy ricos en materia orgánica, el glifosato puede unirse a compuestos orgánicos solubles en agua y conservar cierta movilidad que lo puede llevar tanto a niveles más profundos del suelo como hacia aguas superficiales. En esas aguas puede intoxicar a organismos que se alimentan por filtración, como crustáceos y moluscos, o a otros que ingieren cantidades significativas de suelo durante su alimentación normal, como peces, aves, anfibios y hasta algunos mamíferos.

La adsorción del glifosato, y por lo tanto su movilidad, varían con el tipo de suelo. En aquellos ricos en óxidos de hierro, como los de Misiones, es mayor, lo que disminuiría la degradación química o biológica. La presencia de cobre disminuye la adsorción, por la formación de compuestos del herbicida con ese metal. En la región pampeana los suelos tienen características que facilitan la formación de tales compuestos, por lo que se puede esperar que la movilidad del herbicida sea reducida y no se acumule en los cuerpos de agua.

Se ha determinado que los compuestos con fósforo presentes en el suelo compiten con el glifosato por los sitios de adsorción. En consecuencia, la fertilización de campos con fósforo podría contribuir a liberar el glifosato adherido a las partículas de suelo e incrementar las probabilidades de que el herbicida llegue a los ecosistemas acuáticos.

Este fenómeno, junto con el reciente aumento de la aplicación de fertilizantes fosforados en la Argentina, motivó que se realizaran estudios orientados a comprender los efectos de la aplicación prolongada de glifosato sobre las comunidades de microorganismos acuáticos que habitan las lagunas bonaerenses. Esos estudios revelaron que agregar glifosato a piletas que simulan cuerpos de agua naturales alteró la calidad de la luz a lo largo de la columna de agua y aumentó la concentración de fósforo, a la vez que incrementó la cantidad de cianobacterias a expensas de algas de mayor tamaño. A pesar del aumento documentado de fósforo, los cambios que se constataron en las comunidades de microorganismos parecieron ser más la consecuencia del efecto directo del glifosato que la de un enriquecimiento en fósforo.

El glifosato es considerado un producto de toxicidad relativamente baja, ya que interfiere en procesos metabólicos de las plantas que están ausentes en los animales.

MEDIDA BIOLÓGICA	HERBICIDAS						INSECTICIDA	NEMATICIDA	FUNGICIDA
	Atrazina	Diuron	2,4-D	Glifosato	Paraquat	Trifluralin	Clorpirifos	Aldicarb	Mancozeb
<b>Biota del suelo</b>									
Bacterias	0/+	+							
Hongos	0/+	-	-	-/+	-	0	0/+		-
Hongos micorrízicos		0			-	0		0	0
Patógenos de las raíces		+	0	+	+	0/+		0/+	-
Biomasa microbiana	-/0	0	-/0	0/+	-	-	0	+	
Microfauna	-		-	-	-			-	0
Microartrópodos	-			-	-				-
Lombrices	-/0	0	0	0	-/0	0		-	0
<b>Fijación de nitrógeno</b>									
No-simbiótica	0						-		-
Simbiótica		-		-	-	-	-	-	-/0
<b>Enzimas del suelo</b>									
Dehidrogenasa	-		-/0/+	0/+		0	-		
Fosfatasa	-/0			-			-		
Ureasa	-/+		-	+	+				
<b>Transformaciones de nitrógeno</b>									
Amonificación	0		-/0	0/+				-	-
Nitrificación	0	-/+	-/0	0/+	0	0	0	0	-/0
Denitrificación	0	0/+	0	-/0/+		0	0		0
<b>Transformaciones de carbono</b>									
Respiración CO <sub>2</sub>	+	-	0	0	-	-/0	0	0	
Descomposición de materia orgánica	0		0		-/0	0		0	

- disminución (usualmente temporaria) / 0 (sin efecto) / + aumento (usualmente temporario)

**Tabla 1.** Efectos conocidos de algunos pesticidas de uso común sobre los organismos y las funciones biológicas del suelo, adaptado de Pankhurst 2006, 'Effects of pesticides used in sugarcane cropping systems on soil organisms and biological functions associated with soil health, A report prepared for the Sugar Yield Decline Joint Venture, Adelaide.

Ejerce su acción herbicida por la inhibición de una enzima conocida por EPSPS, lo cual impide que las plantas elaboren tres aminoácidos esenciales para su crecimiento y supervivencia. El glifosato puede, sin embargo, interferir con algunas funciones enzimáticas de los animales, pero los síntomas de envenenamiento solo aparecen con dosis muy altas. De todos modos, los productos comerciales que contienen glifosato también incluyen otros compuestos que pueden ser tóxicos. Todo pesticida comercial, además del ingrediente activo, se compone de otras sustancias llamadas *surfactantes*, lo que hace que toxicidad sea diferente a la de aquel ingrediente administrado solo. Así, un herbicida comercial con el que se aplica glifosato puede contener cantidades pequeñas de N-nitroso glifosato, que es cancerígeno, como la mayoría de los compuestos N-nitroso derivados del glifosato, pero no se puede descartar la posibilidad de que este compuesto se forme espontáneamente en el ambiente por efecto de nitrato presente en el suelo o en fertilizantes.

Una vez que el glifosato se aplicó sobre el follaje, una parte penetra en los tejidos de la planta pero otra

puede ser arrastrada por lluvias que caigan en los días siguientes a la aplicación. Aun si la planta muere como resultado de la aplicación, el glifosato permanece en los tejidos vegetales muertos. Investigaciones realizadas en bosques templados indican que el 50% de los residuos de glifosato en desechos de hojas desaparece luego de ocho o nueve días. Igual velocidad de disipación se ha observado en frutos y en líquenes. También se puede producir destrucción por luz o *foto degradación* si llega suficiente radiación ultravioleta.

Se dice a menudo que el glifosato se degrada rápidamente en el suelo. Pero estudios realizados en Canadá indican que la vida media del glifosato en el suelo o en el agua, después de una aplicación directa, puede alcanzar los 60 días. Hay estudios de campo que encontraron residuos de glifosato en el suelo y el agua, de entre el 6% y 18% del volumen aplicado, luego de un año de la aplicación.

Si bien el glifosato no se degrada rápidamente en agua estéril, en presencia de bacterias y hongos se descompone y da lugar a un ácido de baja toxicidad, y probablemente también a dióxido de carbono según la Agencia de Protec-

ción Ambiental de los Estados Unidos. Se ha documentado la degradación de ese ácido a moléculas de fósforo inorgánico, que no tienen acción herbicida ni efectos tóxicos para organismos acuáticos en las concentraciones que se originarían por el uso de glifosato en la agricultura.

## Efectos indeseados

Cuando se estudian las consecuencias de usar un pesticida, es necesario considerar el peligro relativo de cada uno de los caminos de dispersión del producto, así como tomar en cuenta los organismos afectados en esos caminos. De esta manera, el análisis ambiental puede llevar a definir si es más peligrosa la volatilización del producto o su percolación a aguas profundas, como así también a jerarquizar la toxicidad para lombrices o humanos comparada con la toxicidad para algas. Estas cuestiones son importantes para evaluar los efectos de los plaguicidas, sean fungicidas, insecticidas o herbicidas, teniendo en cuenta que afectan tanto a los organismos que se desea controlar, llamados *organismos blanco*, como a otros.

Algunos estudios indican que la cantidad de pesticida que entra en contacto directo o es consumida por los organismos blanco es una fracción extremadamente pequeña del total aplicado, del orden del 0,3%, lo que significa que el 99,7% va a parar a otro lugar o actúa sobre organismos que no son su blanco.

En términos generales, los estudios resumidos en la tabla indican que los herbicidas constituyen el grupo plaguicidas que tienen los menores efectos. Todos poseen, sin embargo, cierto efecto sobre algún componente del suelo, por lo común de duración limitada a días o semanas, al cabo de los cuales tanto las comunidades del suelo como su funcionamiento recuperan valores similares a los anteriores a la aplicación.

Existe evidencia de que la aplicación repetida durante años de algunos herbicidas distintos del glifosato (como atrazina, paraquat o 2,4D) podría cambiar la estructura de las comunidades microbianas del suelo, pero no hay prueba documentada de que esos cambios redunden en disminuciones críticas de la fertilidad del suelo o del rendimiento de los cultivos. El orden de los herbicidas por sus efectos negativos observados sobre la comunidad de seres vivos o *biota* del suelo es, de mayor a menor: paraquat, 2,4D, atrazina, diuron, glifosato y trifluralina. Una explicación del mayor efecto del paraquat es su larga persistencia, que excede los tres años.

En la Argentina se dispone de poca información sobre el efecto de los plaguicidas en las propiedades biológicas de los suelos, la que tampoco abunda en el resto del mundo. Recientemente se ha evaluado en laboratorio el efecto de tres herbicidas comerciales con metasulfuron-methyl, 2,4D y glifosato como ingredientes activos, muy utilizados en la región pampeana. Se analizaron sus



Flor de espuela de caballero o conejito (*Delphinium ajacis*) visitada por una mosca del género *Toxomerus*. La imagen muestra dos organismos que no constituyen el blanco de los pesticidas pero que pueden verse afectados por la aplicación de estos. Foto Pamela Graff.

secuelas en la densidad, la actividad y la riqueza funcional de las comunidades microbianas de diferentes suelos. Los resultados mostraron que las consecuencias de aplicarlos fueron muy leves, aun con dosis hasta diez veces mayores que las recomendadas. En coincidencia con estudios realizados en otros países, los cambios observados desaparecieron rápidamente y los suelos retornaron a su condición anterior a la aplicación.

También conocemos estudios locales que evaluaron las repercusiones de una aplicación repetida de productos agroquímicos sobre organismos pequeños del suelo pero detectables a simple vista, que forman la *mesofauna*. Sobre la base de información registrada durante diez años, no se constataron resultados claros atribuibles a los plaguicidas. Igualmente se están realizando estudios de larga duración sobre el efecto de la aplicación de glifosato, clorpirifos y su mezcla en la fauna y la descomposición de los residuos vegetales del suelo en condiciones de cultivo. Sus resultados preliminares indican que el glifosato reduce la viabilidad de los capullos de las lombrices de tierra y el número de individuos de estadios juveniles, pero no se detectaron efectos sobre la descomposición de los residuos vegetales.

Las repercusiones negativas de los herbicidas sobre la biología del suelo no solo deben atribuirse a la acción directa del producto, pues pueden producirse *efectos indirectos*, como la disminución de comunidades de artrópodos, tanto benéficos como perjudiciales para la agricultura, asociados con las malezas afectadas por los herbicidas.

## Organismos resistentes a los plaguicidas

Igual que con antibióticos suministrados a humanos, el uso sostenido de un mismo plaguicida suele generar resistencia en las poblaciones de plagas que se procura contro-

lar. Para el glifosato, por las características de su principio activo, se esperaba un reducido desarrollo de resistencia por parte de las malezas, pues no se conocían mutaciones del gen que codifica la mencionada enzima EPSPS.

Además, la complejidad de las manipulaciones genéticas realizadas en laboratorio para lograr cultivos resistentes al glifosato llevó a considerar poco probable que otras plantas se volvieran resistentes en forma natural. Pero en 1996 apareció en Australia una población de un pasto (*Lolium rigidum*, una especie de ryegrass) resistente a ese compuesto, y desde entonces se han difundido noticias de una decena de otras especies con esas características en varios países.

En la Argentina se ha encontrado esa resistencia en poblaciones de una importante maleza de cultivos de verano, el sorgo de Alepo (*Sorghum halepense*), lo mismo que casos de supervivencia al herbicida en ejemplares de los pastos *Lolium multiflorum* y *L. perenne*. Esas evidencias indican que es biológicamente factible la adquisición de resistencia al glifosato por malezas. Como consecuencia, los investigadores han sugerido modificar ciertas prácticas agronómicas actuales, para poder seguir usando el herbicida. Algunas de estas modificaciones son reemplazar el glifosato por otros herbicidas y rotar los cultivos.

## Conclusiones

La información disponible indica que los plaguicidas, incluido el glifosato, no son inocuos para el ambiente. Si

bien constituyen una potente herramienta para controlar las poblaciones de organismos plaga que perjudican a los cultivos, su utilización puede afectar en forma directa e indirecta a los organismos que crecen encima y debajo del suelo, y en los ecosistemas acuáticos.

Desde sus inicios, la agricultura ha producido grandes cambios en las formas de uso de la tierra que resultaron en la restructuración del paisaje agrícola y de comunidades enteras de seres vivos. Es decir, las modificaciones de los ecosistemas terrestres y acuáticos comenzaron mucho antes de que la aplicación de glifosato se convirtiera en la técnica más empleada para controlar la vegetación indeseada en los cultivos. Por otra parte, este herbicida parece tener pocas probabilidades de acumularse en los suelos, en las aguas o en los tejidos vivos, con lo cual su actividad se concentra en los períodos en que se aplica en los campos.

El potencial impacto ecológico de los cambios observados por el uso del glifosato no sería tanto atribuible a la toxicidad del herbicida, ni a su acumulación en el ambiente, cuanto a su poder de reducir los componentes vegetales de los agroecosistemas, que se magnifica por la frecuencia de su uso en grandes extensiones.

Aún son necesarios estudios de larga duración, que incluyan experimentos en el campo, para evaluar críticamente no solo los factores más importantes que determinan los efectos del uso masivo del glifosato y otros pesticidas, sino también sus consecuencias en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos y terrestres. Solo entonces será posible dar una respuesta sobre bases sólidas acerca de los beneficios o riesgos de su uso. 

### LECTURAS SUGERIDAS

- BUSSE MD *et al.*, 2001, 'Glyphosate toxicity and the effects of long-term vegetation control on soil microbial communities', *Soil Biology and Biochemistry*, 33: 1777-1789.
- CASABÉ N *et al.*, 2007, 'Ecotoxicological assessment of the effects of glyphosate and chlorpyrifos in an Argentine soya field', *Journal of Soils Sediments*, 7, 4: 232-9.
- FERRARO DO & GHERSA CM, 2007, 'Exploring the natural and human-induced effects on the assemblage of soil microarthropod communities in Argentina', *European Journal of Soil Biology*, 43: 109-119.
- PÉREZ GL *et al.*, 2007, 'Effects of the herbicide Roundup on freshwater microbial communities: a mesocosm study', *Ecological Applications*, 17: 2310-2322.
- PICCOLO A *et al.*, 1994, 'Adsorption and desorption of glyphosate in some european soils', *Environmental Science Health*, 29: 1105.
- VIGLIZZO E & JOBBAGY E (eds.), 2010, 'Expansión de la frontera agropecuaria en la Argentina y su impacto ecológico-ambiental', disponible (abril 2011) en: <http://www.inta.gov.ar/anguil/info/pdfs/giga/Expansi%C3%B3n%20Frontera%20Agropecuaria%202010.pdf>



**M Alejandra Martínez-Ghera**

PhD en ciencias ambientales, Oregon State University  
Profesora adjunta de ecología, Facultad de Agronomía, UBA  
Investigadora independiente del Conicet  
[martinez@agro.uba.ar](mailto:martinez@agro.uba.ar)