

M Alejandra Martínez-GhersaInstituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas
Vinculadas a la Agricultura, UBA-Conicet

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



Un tordo músico (*Agelaioides badius*), ave autóctona de la llanura pampeana, posado sobre una planta de sorgo granífero. Foto Federico Weyland

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 definitivamente 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.



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

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 solo con herbicidas, pues quedó eliminada la acción de dar vuelta la capa superficial de suelo por el arado. Asimismo, la diversidad 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, la 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 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



De arriba hacia abajo. Acción del glifosato en el control de la vegetación de las banquetas 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

MEDIDA BIOLÓGICA	HERBICIDAS						INSECTICIDA	NEMATICIDA	FUNGICIDA
	Atrazina	Diuron	2,4-D	Glifosato	Paraquat	Trifluralin	Clorpirifos	Aldicarb	Mancozeb
Biota del suelo									
Bacterias	0/+	+							
Hongos	0/+	-	-	-/+	-	0	0/+		-
Hongos micorríticos		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
Fijación de nitrógeno									
No-simbiótica	0						-		-
Simbiótica		-		-	-	-	-	-	-/0
Enzimas del suelo									
Dehidrogenasa	-		-/0/+	0/+		0	-		
Fosfatasa	-/0			-			-		
Ureasa	-/+		-	+	+				
Transformaciones de nitrógeno									
Amonificación	0		-/0	0/+				-	-
Nitrificación	0	-/+	-/0	0/+	0	0	0	0	-/0
Denitrificación	0	0/+	0	-/0/+		0	0		0
Transformaciones de carbono									
Respiración CO2	+	-	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 C 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*, Adelaida.

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. 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 su 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 fotodegradación 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 Protección 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, así como 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 de plaguicidas que tienen los menores efectos sobre los organismos del suelo y las funciones biológicas. 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:



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

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 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 controlar. 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 otros 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 reestructuración 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 y JOBBAGY E (eds.), 2010, 'Expansión de la frontera agropecuaria en la Argentina y su impacto ecológico-ambiental', disponible (abril de 2011) en <http://www.inta.gov.ar/anguil/info/pdfs/giga/Expansi%C3%B3n%20Frontera%20Agropecuaria%202010.pdf>