

DESTINO DE LOS PLAGUICIDAS EN EL AMBIENTE. UN ESTUDIO DE CASO PARA EL PROGRAMA DE APOYO A PROYECTOS PARA LA INNOVACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA ENSEÑANZA DE LA UNAM

FATE OF PESTICIDES IN THE ENVIRONMENT. A CASE OF STUDY FOR THE PROGRAM FOR SUPPORT TO PROJECTS FOR INNOVATION AND IMPROVEMENT OF TEACHING AT UNAM

Luis Antonio Ramírez-Torres, ESTUDIANTE

UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, 8° Semestre,
correo-e: luis_ramirez1007@hotmail.com

Jimena Martínez-Vázquez, ESTUDIANTE

UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, 7° Semestre,
correo-e: martinez.vazquez.jimena@hotmail.com

Cand. Dr. en Ing. M. en I. IA Víctor Jesús García-Luna, ASESOR DIRECTO

Dra. en Ing. M. en C. IQ Marisela Bernal-González, ASESORA ESFERA AGUA

M. en C. Q.A. Rolando Salvador García-Gómez, ASESOR ESFERA SUELO

M. en A.I. QFB Landy Irene Ramírez-Burgos, ASESORA ESFERA SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS

Profa. M.C. M.E. Beatriz Espinosa-Aquino, ASESORA NORMAS DE CALIDAD*

Profa. Dra. QFB María Irene Cano-Rodríguez, ASESORA GESTIÓN AMBIENTAL**

Profa. Dr.-Ing. M.S. Ch.E. IQ María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, ASESORA GLOBAL

UNAM, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental

Conjunto E, Edificio E-3 Alimentos y Química Ambiental, Labs. 301, 302, 303

Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria

Tels. 5622-5300 al 04, fax 5622-5251. Correos-e: ing.vgarcial@yahoo.com.mx,

marisela_bernal2000@yahoo.com.mx, rolandoga2000_a@yahoo.com,

landy_irb@yahoo.com.mx, mcduran@unam.mx

*BUAP, Instituto de Ciencias, correo-e: bett_espinosa@hotmail.com

**Universidad de Guanajuato, correo-e: irene@ugto.mx

RESUMEN

En México, los plaguicidas son ampliamente utilizados con la finalidad de aumentar la producción agrícola y mejorar la calidad de los alimentos. Al ser aplicados, estos agroquímicos pueden estar sujetos a una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, que los afectan y definen su comportamiento y/o destino en el ambiente. Dichos procesos pueden

llevar a una completa mineralización de los compuestos o a la formación de productos de degradación, los cuales pueden ser igual o más tóxicos que el compuesto “padre” y encontrarse en concentraciones ambientales más elevadas. Una vez que los plaguicidas son aplicados, los fenómenos de sorción (adsorción-desorción), así como la degradación biológica (biodegradación) y química (hidrólisis química y fotólisis), son de los procesos predominantes que afectan y definen el comportamiento de dichos contaminantes en las diferentes matrices ambientales, mineralizándolos o llevándolos a la formación de productos de degradación, los cuales sean ya inocuos. En México, el uso de plaguicidas sigue siendo una práctica común, siendo detectada su presencia tanto en suelos, como en cuerpos de agua y sedimentos cercanos a las zonas agrícolas. Por ello, se considera importante seguir el estudio de estos contaminantes orgánicos persistentes y, en particular, los plaguicidas. Paralela a esta investigación sobre los plaguicidas en el ambiente, se ha considerado el impacto ambiental de su aplicación para tomarla de ejemplo para estudios ambientales en cursos universitarios, especialmente para ingenieros químicos.

Palabras clave: Destino de los plaguicidas en el ambiente, estudio de caso, programa de apoyo a proyectos para la innovación y mejoramiento de la enseñanza de la UNAM

ABSTRACT

In Mexico, pesticides are widely used to increase agricultural productivity and to improve food quality. To be applied in the fields, these agrochemicals may be subjected to a series of physical, chemical, and biological procedures that affect and define its behavior and/or fate in the environment. Such procedures may render a complete mineralization of the compounds or lead to the formation of new products upon degradation that may be equally toxic or sometimes even more toxic than the progenitors with concentrations in the environment that make them hazardous. Once the pesticides are applied, sorption phenomena (adsorption-desorption), as well as the biological and chemical degradation (biodegradation, Chemicals hydrolysis and/or photolysis) are the predominant processes that affect and define the behavior of these contaminants within the different environmental matrices, mineralizing them or bringing them to the formation of degradation products, that are innocuous. As in Mexico, the use of pesticides is still a very common operation its presence is found in soils, in water bodies, and in sediments near the agricultural fields. Thus, it is important to continue the study of these organic persistent pollutants and, in particular, the pesticides. Parallel to this research on pesticides in the environment, its results are being used as an example for environmental studies in university courses, especially for chemical engineers.

Key Words: *Fate of pesticides in the environment, case of study, program of support for projects for innovation and improvement of teaching at UNAM*

Introducción

El uso de los plaguicidas en la agricultura se ha convertido en una necesidad para el control de plagas y a su vez en una preocupación debido a que pueden representar un riesgo potencial para la salud humana y el ambiente, dado que pueden contaminar los cuerpos de agua, aire y suelo, así como también, su uso genera residuos sólidos como empaques, tanques, entre otros (Tappe y col., 2002).

En México la superficie agrícola, sembrada anualmente, varía entre 20 y 23 millones de hectáreas (CONAGUA, 2011), en las que se aplican de manera simultánea fertilizantes y plaguicidas. Los plaguicidas son sustancias o mezclas de las mismas que se destinan a controlar plagas, incluidos los vectores de enfermedades humanas y de animales, así como las especies no deseadas que causan perjuicio o que interfieren con la producción agropecuaria y forestal (USEPA, 2014). Los plaguicidas pueden ser transportados y contaminar los cuerpos de agua, superficial y subterránea, y suelos cercanos a las zonas de cultivos al momento de ser esparcidos, por medio de su depósito mediante fenómenos atmosféricos, la subsecuente escorrentía e infiltración originada por las lluvias y/o el riego, la inadecuada disposición de contenedores vacíos y el lavado del equipo después de la aplicación (Hernández-Antonio y Hansen, 2011; Herrero-Hernández y col., 2013; Holvoet y col., 2007).

En la lucha del hombre con la naturaleza para satisfacer sus necesidades, especialmente alimenticias, ha generado el incremento de los monocultivos, con el fin de lograr una alta producción y un mayor margen de rentabilidad. Actualmente no es posible una agricultura con altos rendimientos sin la utilización de medidas de protección de plantas, entre las cuales los plaguicidas siguen teniendo una participación considerable. Sin embargo, su uso intensivo y desmedido ha traído como consecuencia resultados bastante contradictorios (Farrera, 2004).

Los efectos negativos de los plaguicidas como contaminación del ambiente y seres vivos son más notorios en países en desarrollo que en los llamados países de primer mundo. De acuerdo con diversos estudios, se estima que en los países en desarrollo (aunque se utiliza sólo el 20% de todos los agroquímicos disponibles en el mundo), el 99% de todas las muertes son ocasionadas por el uso irracional y arbitrario de estos compuestos químicos (Farrera, 2004; Reeves y col., 2015).

La siguiente figura ejemplifica en un libro editado en Bolivia el impacto en todas las esferas ambientales.



Ecosistema afectado por el uso de plaguicidas (Condarco-Aguilar y Rejel-Encinas, 2016; RAP, 2015)

Objetivo

Establecer los principales procesos que afectan el comportamiento y/o destino de los plaguicidas una vez que estos se encuentran en las diversas matrices ambientales (aire, agua, suelo) estudios de sustancias y residuos peligrosos, gestión ambiental y ruido y radiaciones).

Desarrollo del estudio de caso

A partir de la década de los años 90 del siglo XX, gracias al desarrollo de las técnicas analíticas apropiadas como la cromatografía de gases o líquidos con detección selectiva de masas, se ha logrado la detección de cierto tipo de microcontaminantes orgánicos en diferentes matrices ambientales (Barceló, 2003; Hollender y col., 2008).

Los contaminantes emergentes o microcontaminantes incluyen una larga lista de compuestos de particular relevancia de entre los cuales se encuentra: los compuestos farmacéuticamente activos (*PhACs*, en inglés), drogas de abuso y sus productos metabólicos, productos de cuidado personal (*PCPs*, en inglés), hormonas y esteroides, agentes antibacterianos, así como también, compuestos industriales como plaguicidas y sus productos de transformación y/o degradación, retardantes de flama y plastificantes, tensoactivos y sus metabolitos, aditivos de gasolina, compuestos perfluorados (*PFCs*, en inglés), compuestos organometálicos, entre otros (Hollender y col., 2008; Petrovic y col., 2010). Muchas de estas sustancias han sido identificadas como compuestos causantes de disrupción endócrina (*EDC*, en inglés), es decir, sustancias exógenas causantes de efectos adversos a la salud como consecuencia de los cambios inducidos en las funciones endócrinas (Diano y Mita, 2011; European Commission, 1996). Dichos compuestos pueden ser altamente tóxicos y persistentes en el ambiente, debido a la dificultad que representa su degradación, y a su capacidad de bioacumularse y escalar la cadena alimenticia (Elvira-del-Cid y col., 1998).

Los plaguicidas son sustancias o mezclas de las mismas, producidas de manera sintética y/o natural, destinadas a prevenir, mitigar, repeler o destruir el crecimiento y/o desarrollo de algunos seres vivos considerados como plaga (USEPA, 2014). Estos compuestos se conocen desde la antigüedad, aunque fue a partir de las décadas de los años 20 y 30 del siglo pasado, cuando se incrementó su uso en diversas partes del mundo. La utilización de estos agroquímicos ha conseguido aumentar la producción de alimentos y mejorar la salud humana. Sin embargo, deben vigilarse los daños ambientales ocasionados por su uso a gran escala, de manera que puedan hacerse las correcciones pertinentes (Pitarch, 2001).

En México, de acuerdo con la Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas (CICOPLAFEST), estos agroquímicos pueden clasificarse bajo el siguiente criterio (Anónimo, 2015a,b; COFEPRIS, 2010; INECC, 2014):

1. Concentración: ingrediente activo, plaguicida técnico o plaguicida formulado.
2. Organismos que controlan (Tabla 1): Insecticidas, acaricidas, rodenticidas, fungicidas, nematocidas, bactericidas, molusquicidas, avicidas, herbicidas, ovicidas, etc.
3. Modos de acción: de contacto, sistémicos, repelentes, de ingestión, defoliantes y fumigantes.

Tabla 1. Clasificación de los plaguicidas (Arias-Estévez y col., 2008; INECC, 2014)

Por objetivo		Por modo y tiempo de acción		Por estructura química
Tipo	Objetivo	Tipo	Acción	
<i>Bactericida (desinfectante)</i>	Bacterias	De contacto	Mata al contacto con la plaga	Los plaguicidas poder ser productos químicos orgánicos o inorgánicos. Hoy en día, la mayoría de ellos son orgánicos
<i>Defoliante</i>	Follaje	Erradicante	Eficaz después de infección por patógenos	
<i>Desecante</i>	Follaje	Fumigante	Entra en las plagas como un gas	
<i>Fungicida</i>	Hongos	No selectivos	Tóxico para ambos, cultivos y malezas	
<i>Herbicida</i>	Malezas	De post-emergencia	Eficaz cuando es aplicado después de la cosecha o malezas	
<i>Insecticida</i>	Insectos	De Pre-emergencia	Eficaz cuando es aplicado después de la siembra y antes de la cosecha o de malezas	
<i>Acaricida (miticida)</i>	Ácaros y garrapatas	De Pre-siembra	Eficaz cuando es aplicado antes de la siembra	
<i>Molusquicida</i>	Babosas y caracoles	Protectores	Eficaz cuando es aplicado antes de que el patógeno infecte a la planta	
<i>Nematicida</i>	Nematodos	Selectivos	Tóxico solo para la maleza	
<i>Regulador del crecimiento vegetal</i>	Procesos de crecimiento de los cultivos	Esterilizantes del suelo	Tóxico para toda la vegetación	
<i>Rodenticida</i>	Roedores	Veneno estomacal	Mata plagas después de su ingestión	
<i>Conservador de la madera</i>	Organismos destructores de la madera	Sistémicos	Transportado a través de los cultivos o plagas después de su adsorción	

4. Composición química: organoclorados, organofosforados, triazinas, carbamatos, compuestos de cobre, piretroides, clorfenoxi, bipiridílicos, entre otros.
5. Persistencia: ligeramente persistentes, poco persistentes, moderadamente persistentes, altamente persistentes y permanentes.
6. Uso al que se destinan: agrícola, urbano, pecuario, industrial, forestal, doméstico y para jardinería.

Los plaguicidas son un conjunto de sustancias con características muy diversas, entre los que se distinguen dos grandes grupos. En un grupo sus elementos están definidos por el tipo de uso de plaguicida, según el organismo sobre el cual actúan, así se tienen: los insecticidas, herbicidas, acaricidas, entre otros. Otro grupo está determinado de acuerdo a la estructura química de las sustancias con actividad plaguicida, y se tienen los plaguicidas organoclorados, organofosforados, carbamatos, ácidos carboxílicos, piretroides, amidas, anilinas, entre otros (Vega, 1985):

1. *Plaguicidas organoclorados*. Desde el punto de vista estructural, constituyen un grupo de sustancias, muy heterogéneo, teniendo en común la presencia de estructuras monocíclicas o policíclicas con distinto número de sustituyentes cloro (Figura 1). Incluyen varios grupos:

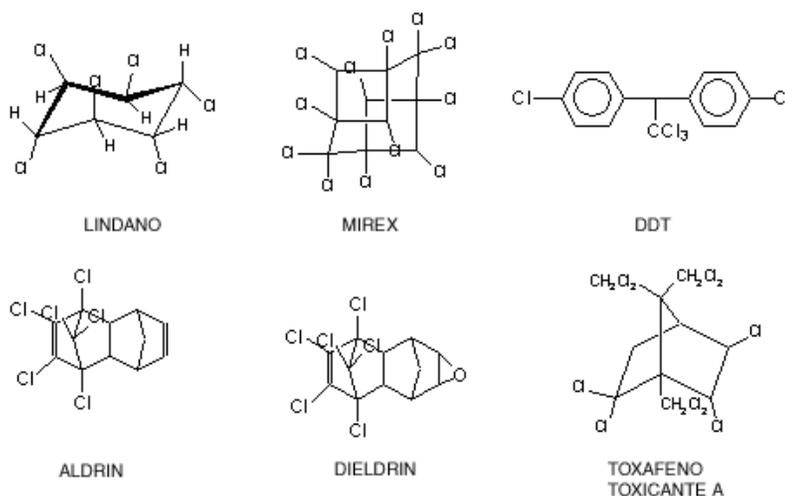


Figura 1. Plaguicidas organoclorados comunes (FAO, 2014)

- a. Grupo de los ciclodienos: aldrín y su epóxido, dieldrín, mirex.
 - b. Grupo del DDT (dicloro-difenil-tricloroetano): p-p'-DDT, o-p'-DDT, p-p'-Metoxiclor.
 - c. Grupo del hexaclorociclohexano (HCH) y hexaclorobenceno (HCB): HCH, -HCH, HCB.
 - d. Grupo de los indenos clorados: hepatacloro, a-clordano.
 - e. Grupo de los terpenos clorados: toxafeno.
2. *Plaguicidas organofosforados*. Son sustancias biodegradables en la naturaleza, sin tendencia a acumularse en las grasas del organismo, pero con gran actividad neurotóxica

que va a producir intoxicaciones agudas de gravedad. Son los insecticidas, junto con los carbamatos y piretroides, los más utilizados en la actualidad. Sus estructuras químicas (Figura 2) derivan de la sustitución por restos orgánicos en el fósforo pentavalente. Pueden clasificarse como:

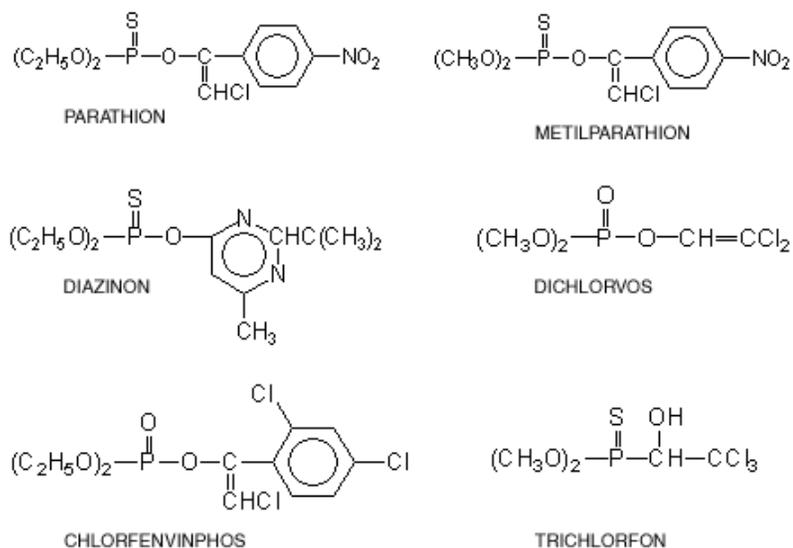


Figura 2. Plaguicidas organofosforados comunes (FAO, 2014)

- Derivados de la molécula del ácido fosfórico. Si los dos primeros oxhidrilos se esterifican con radicales alquílicos se obtienen los alquifosfatos o alquilpirofosfatos (p. Ej., *dichlorvos*). Si dichos oxhidrilos se sustituyen por amidas se obtienen las fosoramidas (p. Ej., metamidofós, acefato).
- Derivados de la molécula del ácido fosforotiónico. De este ácido derivarán a su vez numerosos ésteres tiofosfóricos (p. Ej., paratión).
- Derivados del ácido fosforotiolotiónico (p. Ej., malatión).
- Derivados del ácido fosforotiónico (p. Ej., malaoxón, demeton-S-metil).

Propiedades fisicoquímicas generales

El destino y comportamiento de los plaguicidas en el ambiente dependen básicamente de las propiedades físicas y químicas del compuesto (las cuales son determinantes para su cinética ambiental), así como de la forma en la que es liberado y de las condiciones del ecosistema (Pitarch, 2001). Atendiendo a su movilidad, la contaminación por plaguicidas puede tener lugar en el aire, suelo, agua y biosfera (Barberá, 1989). El aire, el agua, el suelo y los alimentos retienen gran parte de los plaguicidas que posteriormente llegarán a los seres vivos.

Constituye un problema actual su persistencia en el ambiente, su concentración y su transformación en los organismos vivos. De entre las propiedades físicas y químicas de los compuestos, se pueden mencionar:

1. *Solubilidad en agua.* La solubilidad de un plaguicida es un elemento importante para la eliminación de los desechos. La solubilidad puede indicar la cantidad máxima de plaguicida disuelta en cualquier agua contaminada de manera accidental. La solubilidad de un compuesto en el agua se expresa en mg/L a 20°C. Es de suponer que los compuestos con un alto grado de solubilidad se lixiviarán en las aguas subterráneas (FAO, 2014). Las sustancias con solubilidad acuosa mayor a 50 ppm son muy móviles en los suelos y en los otros elementos del ecosistema; su mayor concentración se encuentra en los ecosistemas acuáticos. Por otro lado las sustancias con una solubilidad acuosa mayor de 25 ppm no son persistentes en los organismos vivos, en tanto que aquellas con una solubilidad acuosa menor a 25 ppm tienden a inmovilizarse en los suelos y a concentrarse en los organismos vivos. En general, los plaguicidas organofosforados tienen una solubilidad acuosa mayor a los 25 ppm, en tanto que los plaguicidas organoclorados tienen una solubilidad menor a los 25 ppm (Badii y Landeros, 2007).
2. *Coefficiente de partición octanol-agua (K_{ow}).* Este coeficiente se define como la razón o relación de la concentración de plaguicida en dos líquidos no mezclados, el octanol (o) y el agua (w). Los compuestos con un valor de K_{ow} alto (es decir fácilmente solubles en octanol y menos solubles en agua) se acumulan en los organismos (FAO, 2014). Este coeficiente de una manera indirecta proporciona información sobre la solubilización y distribución de una sustancia en un organismo vivo. Por ejemplo el aldrín y el DDT tienen un coeficiente de partición lípido/agua mayor a uno y, por lo tanto, son liposolubles y podría inferirse que se absorben fácilmente a través de las membranas biológicas y que se acumulan en el tejido graso (Badii y Landeros, 2007).
3. *Presión de vapor.* La presión de vapor de una sustancia determina su volatilidad. Las sustancias con presión de vapor mayor a 10^{-3} mm de Hg a 25°C, tienen gran movilidad y, por lo tanto, se dispersan hacia la atmósfera. Existen sustancias ligeramente volátiles, con presión de vapor entre 10^{-4} a 10^{-6} mm de Hg a 25°C, y las no volátiles, que son más persistentes en suelos y agua, con presión de vapor menor a los 10^{-7} mm de Hg. Por ejemplo, los herbicidas tienen presiones de vapor muy bajas; las clorotriazinas (probablemente los herbicidas más utilizados) tienen presiones de vapor menores a los 10^{-7} mm de Hg. Este grupo es de mayor persistencia y menor volatilidad que las metoxitriazinas, con presiones de vapor igual o mayores a los 10^{-7} mm de Hg (Badii y Landeros, 2007).
4. *Disociación e ionización.* Las sustancias al solubilizarse se pueden o no disociar. Las que no se disocian son sustancias no iónicas, las que se disocian son sustancias iónicas, las cuales pueden tener carga positiva (catiónicas) o bien cargas negativas (aniónicas). Los plaguicidas aniónicos y los no iónicos son móviles en los suelos, en tanto los catiónicos son absorbidos, inmovilizándose en ellos. El paraquat y el diquat son sustancias catiónicas que se adsorben fuertemente a las partículas de los suelos, en tanto que los plaguicidas fenoxiacéticos, sustancias aniónicas, se movilizan fácilmente (Badii y Landeros, 2007).
5. *Degradabilidad.* Es importante considerar también las propiedades químico-biológico de degradabilidad de los plaguicidas. Dichas propiedades se refieren a que la actividad de un plaguicida puede ser permanente o bien puede disminuir con el tiempo en función de su descomposición, ya sea química (quimiodegradabilidad), por acción de

la luz (fotodegradabilidad) o por acción de sistemas microbianos (biodegradabilidad) (Badii y Landeros, 2007).

Procesos que afectan a los contaminantes en el ambiente

Los mecanismos que rigen el comportamiento de los plaguicidas en las diversas matrices son diversos, de los cuáles resaltan (FAO, 2014):

- a) Proceso de hidrólisis química; que tiene lugar por procesos de oxidación, reducción, hidroxilación, desalquilación, rotura de anillos, hidrólisis e hidratación.
- b) Proceso de fotólisis; que se produce por efecto del espectro de luz ultravioleta de la luz solar. Las fuentes de luz y su intensidad regulan el grado de descomposición de un compuesto.
- c) Proceso de biodegradación; la acción de los microorganismos del suelo sobre los plaguicidas es probablemente el mecanismo de descomposición más importante. Dependiendo de la matriz, los microorganismos actuarán de diferente forma.
- d) Proceso de sorción; es la capacidad que tiene una matriz de inmovilizar un plaguicida u otra molécula orgánica y de prevenir el movimiento de dicha molécula hacia el exterior de esta.
- e) Proceso de volatilización; es la pérdida del compuesto en forma de vapor. Todas las sustancias orgánicas son volátiles en algún grado dependiendo de su presión de vapor, del estado físico en que se encuentre y de la temperatura ambiente.
- f) Proceso de dilución, el transporte de un plaguicida en la matriz; por disolución o arrastre mecánico, se hace bajo la influencia del agua.

Efectos de los plaguicidas en el ambiente

De manera general, aunque los plaguicidas son diseñados para eliminar plagas, muchos de ellos son extremadamente tóxicos para los humanos. Los plaguicidas son aplicados mediante muchos métodos en actividades de tipo forestal, granjas, hábitats acuáticos, vías carreteras, zonas urbanas, jardines, entre otros. El envenenamiento por plaguicidas puede resultar de exposiciones agudas y crónicas. Adicionalmente, los plaguicidas pueden impactar en poblaciones humanas y animales mediante exposición secundaria o a través de efectos indirectos (Badii y Landeros, 2007):

1. *Envenenamiento agudo.* Cortas exposiciones a algunos plaguicidas pueden matar o enfermar a la población humana y animales. Ejemplos de envenenamiento agudo incluye la muerte de peces que son causadas por residuos de plaguicidas arrastrados hasta presas, lagos y lagunas, mediante corrientes de arroyos y ríos, los cuales captan estos elementos del arrastre de zonas agrícolas, aves pueden morir a causa del forrajeo de insectos en zonas de vegetación asperjadas con plaguicidas, o por el consumo de gránulos tratados con plaguicidas, cebos o semillas. En general, el envenenamiento agudo toma lugar en un tiempo relativamente corto, los impactos son muy localizados geográficamente y están ligados a un solo plaguicida.
2. *Envenenamiento crónico:* la exposición de las personas o animales sobre un periodo de tiempo largo a niveles de plaguicida no inmediatamente letales, pueden resultar en un envenenamiento crónico. El ejemplo mejor conocido de un efecto crónico en animales es el del insecticida organoclorado DDT (vía el metabolito DDE) en la reproducción de

ciertas aves de presa. El DDT y otros plaguicidas organoclorados tales como el dieldrín, endrín y clordano han estado implicados en la mortalidad de aves como resultado de una exposición crónica. Los plaguicidas organoclorados usados en algunos países pueden poner en riesgo a las aves migratorias que pasan el invierno en ellos.

3. *Envenenamiento secundario*: los plaguicidas pueden impactar la población humana y los animales mediante un envenenamiento secundario cuando se consumen alimentos o presas que contienen residuos de plaguicidas. Ejemplos de envenenamiento secundario son aves de presa que se enferman después de alimentarse de un animal que muere o enferma por exposición aguda a un plaguicida, y la acumulación y movimiento de químicos persistentes en las cadenas tróficas.
4. *Efectos indirectos*: además del envenenamiento directo y secundario, los animales pueden ser afectados de manera indirecta cuando una parte de su hábitat o su suplemento alimenticio es modificada. Los herbicidas pueden reducir alimento, cobertura y sitios necesarios para la anidación de insectos, aves o peces: los insectos polinizadores pueden ser reducidos, afectando de esta manera el proceso de polinización de las plantas. El estudio de los efectos indirectos es un campo emergente.

Dada la rapidez con que la industria química crea e implementa nuevos plaguicidas, resulta virtualmente imposible para las organizaciones gubernamentales mantener un control real sobre lo dañino que estos pueden llegar a ser. Por esto mismo es indispensable realizar estudios constantes y legislar sobre lo rápido que las empresas pueden crear los plaguicidas.

A continuación se ven sus efectos en las diferentes esferas ambientales y en relación con las sustancias y residuos peligrosos, con la gestión ambiental y con el ruido y las radiaciones (Manahan, 2007), en el marco del programa de la asignatura Ingeniería Ambiental de la carrera de Ingeniería Química en la Facultad de Química de la UNAM (Durán-Domínguez-de-Bazúa y col., 2014).

Atmosfera o atmósfera¹

El índice metropolitano de la calidad del aire, IMECA, instrumentado originalmente para la Ciudad de México y su área conurbada, es una medida con la cual se busca establecer los niveles de polución del aire en las grandes ciudades. Los niveles van de BUENA (0-50) a EXTREMADAMENTE MALA (<201). Además de gases de efecto invernadero como el CO₂ provocado por la exhalación de máquinas de combustible fósil, también los IMECA miden la contaminación provocada por el uso de plaguicidas.

La contaminación provocada por los plaguicidas en el aire se debe principalmente a la incapacidad de la atmosfera o atmósfera de procesar ciertos productos químicos desprendidos por su uso o fabricación. Tiene importancia especial cuando se trata de aplicaciones por medios aéreos, afectando no sólo a los operarios, sino que los tratamientos extensivos por avión o avioneta pueden incidir tanto en la salud humana como en la fitotoxicidad a cultivos y,

¹ Las palabras derivadas de esfera debieran ser graves, o sea, tener el acento en su penúltima sílaba. Sin embargo, atmosfera se conoce como atmósfera, una palabra esdrújula y aunque es la única con este cambio aceptada por el diccionario de la Real academia Española, RAE, las personas tienden a usar voces esdrújulas aún cuando son incorrectas para estratosfera, hidrosfera, geosfera, etc. (Nota de la última autora)

en buena extensión, a la fauna ornitológica al ser sometida a nubes contaminantes que reducen en parte sus posibilidades de supervivencia (Figura 1).

Estos residuos que quedan por la utilización de los plaguicidas en los campos de cultivos son generalmente arrastrados por las corrientes de aire que rigen el ciclo de los vientos en el planeta. Esto provoca que haya una acumulación de diversos restos de plaguicidas flotando en diversas concentraciones en los lugares donde se juntan las corrientes. Por esto mismo se crea una nueva dificultad para los organismos encargados del control de los plaguicidas, dado que en estos lugares se pueden concatenar diferentes mezclas de mayor toxicidad que la permitida por dichos organismos y por ello los daños son mayores y pueden ir más allá de lo previsto.

El uso de avionetas para la aplicación de plaguicidas en cultivos de gran extensión es la predilecta por los agricultores pese a su pobre efectividad. Según un estudio conducido en los Estados Unidos, se llegó a comprobar que cerca del uno por ciento del plaguicida cumplía con su cometido de acabar con los insectos o plagas que azotaban las cosechas, mientras que el resto se filtraba al subsuelo o era llevado lejos por las corrientes de aire (USEPA, 2014).



Avioneta que asperja plaguicidas sobre campos de cultivo (Anónimo, 2015c)

Muchas veces, en las aplicaciones aéreas, se usa una persona, - el banderillero- para indicar hasta donde la avioneta debe asperjar el insecticida, situación que aumenta el riesgo de intoxicación a este trabajador cuando recibe el rocío del plaguicida (Reeves y col., 2015).

La aplicación aérea de los plaguicidas y su deriva (es decir, su arrastre, o la cantidad del plaguicida aplicado que sale del área tratada al ser arrastrada por el viento, volatilizarse, o lixiviarse) puede contaminar a otros cultivos, sus trabajadores, residentes de comunidades

cercanas y a la vida silvestre que la circunda (Anónimo, 2016a). Estas afectaciones pueden ocurrir a varios kilómetros de distancia. Esto es debido a que son volátiles y muy ligeros por lo que la corriente más leve de aire puede provocar que estos viajen del campo y lleguen a las ciudades aumentando los niveles de contaminación.

Además, las partículas más livianas pueden ser arrastradas a zonas lejanas del punto de tratamiento, lo que explica la presencia de residuos de insecticidas en zonas que nunca fueron tratadas. Tal es el caso de los compuestos organoclorados (*OCs*, en inglés) o de algunos bifenilos policlorados (*PCB*, en inglés), los cuales han sido detectados en la fauna de zonas subantárticas (De Boer y Wester, 1991).

Se recomienda evitar en la manera de lo posible el riego de plaguicidas por medio aéreo, como ocurre en México en toda la zona agrícola del estado de Sonora, especialmente en el Valle del Yaqui (Macías-Zamora y col., 2008).

Asimismo, se recomienda el uso de protección personal para los trabajadores del campo (Figuras 2a, 2b), para reducir el impacto en su salud.

Reeves y col. (2015) realizaron un estudio muy serio sobre el impacto de los plaguicidas en los trabajadores del campo, generalmente mexicanos indocumentados en los campos californianos incluyendo datos “duros”: En la Tabla 1 de su documento mencionan que, de 1991 a 1996 hubo 3991 casos de envenenamiento. “La mayoría de los envenenamientos con pesticidas ocurren cuando los trabajadores agrícolas están trabajando en el campo, como en la recolección de la cosecha (pizca), el empaque en el campo, la siembra y la irrigación. De 1991 a 1996 las dos fuentes más comunes de exposición a pesticidas que llevaron a enfermedades relacionadas con ellos, fueron la dispersión en el aire de los pesticidas rociados (44%) y los residuos en el campo (33%). El mayor número de envenenamientos se reportaron en el condado de Kern (534), ocurriendo la mayoría de ellos en los cultivos de algodón y de uva. Los 15 condados con más reportes de envenenamiento relacionados con pesticidas aparecen enlistados en la Tabla II. En nueve de estos condados, la mayoría de los reportes de envenenamiento no identificó el cultivo específico causante del mal, limitando severamente los esfuerzos por llevar a cabo acciones reguladoras en los cultivos más problemáticos”.



Figura 2a. Trabajador completamente expuesto a los efectos del plaguicida que está asperjando (piel, mucosas, aparato respiratorio, etc.) (FAO, 2014)



Figura 2b. Trabajador completamente protegido de los efectos del plaguicida que está asperjando (FAO, 2014)

1 **Por la boca (vía oral):** Cuando se come o bebe mientras se está en contacto con **PLAGUICIDAS**, se ingiere alimentos contaminados, se toma alguna bebida en un envase de **PLAGUICIDA**, o se toma alguno de éstos **q u í m i c o s** intencionalmente.

2 **Por la nariz (vía respiratoria):** Cuando se respiran los olores o vapores del químico, se fumiga sin protección o se ingresa en un lugar recién fumigado.

3 **Por la piel (vía dérmica):** Cuando se manipula o utiliza plaguicidas sin ropa de protección.

Agricultor fumigando sin el equipo ni la ropa de protección adecuados
(Condarco-Aguilar y Rejel-Encinas, 2016)

Respecto de la contaminación intramuros, especialmente ahora que tratan de eliminarse los vectores de enfermedades como el dengue, el chikungunya o el zika al interior de los domicilios, los plaguicidas pueden ser retirados del aire interior por medio de limpieza del gas (eliminación del gas disolviéndolo en un líquido), por absorción en un sólido o convirtiéndolos en otros gases. A veces ciertos polvos o sólidos granulados pueden absorber un plaguicida en especial del aire. El aire que necesita ser purificado se dirige a través de un sistema de carbón activo o a través de óxidos de metal. Después los gases pueden ser nuevamente liberados, calentando el absorbente. Algunos gases de plaguicidas pueden ser destruidos por la acción térmica.

Agua

Esta es una vía muy importante a través de la cual los plaguicidas se extienden por el ambiente, bien por el uso de plaguicidas destinados a la higiene pública (p. ej., la lucha contra larvas de mosquitos en charcas y aguas estancadas, especialmente los que transmiten la malaria, el dengue, el chikungunya y el zika), o indirectamente por la movilización de

contaminantes de aire y suelos (p. ej., arrastres por agua de lluvia) (Figura 3). De este modo, el plaguicida disuelto en el agua puede ser desplazado horizontalmente, por escorrentía superficial, o verticalmente a través de la zona no saturada (lixiviación) pudiendo alcanzar el agua subterránea. Durante su paso a través del suelo, el plaguicida puede quedar absorbido y/o sufrir transformaciones químicas o microbianas (dependiendo de la reactividad intrínseca de sus grupos funcionales), así como degradación, proceso que reduce o elimina la presencia del plaguicida en el ambiente (Pitarch, 2001).

A pesar de tener un organismo encargado de cuidar y dar buen uso de nuestros mantos acuíferos, ríos, lagos, lagunas, riachuelos como lo es la Comisión Nacional del Agua, esta entidad gubernamental parece no realizar estudios sobre la contaminación del agua causada por los plaguicidas porque no se encontraron datos oficiales sobre los niveles de contaminación de mantos acuíferos o aguas superficiales. Si bien organizaciones no gubernamentales han presionado al gobierno para que realice dichos estudios las respuestas siempre han sido negativas. Diversas instituciones académicas han llevado por su propia cuenta estudios sobre la contaminación del agua causada por plaguicidas, mas no se ha llegado a un acuerdo o cifra oficial.

Debido a la escorrentía de los distritos de riego o de las áreas de aplicación de plaguicidas se pueden contaminar las aguas superficiales. Desgraciadamente es frecuente que se laven los tanques y equipos de aplicación de plaguicidas, en arroyos o canales, contaminándolos y afectando, corriente abajo, a animales acuáticos, plantas, el fitoplancton, zooplancton y a los peces.



Figura 3. Medición de la contaminación de cuerpos de agua por escorrentías (Anónimo, 2016a)

De la búsqueda bibliográfica solamente se encontró lo siguiente: En la página electrónica <http://tramites.semarnat.gob.mx/Doctos/DGGIMAR/Guia/07-015AD/riesgos.pdf> se señala: “Muchos plaguicidas organoclorados o sus productos de transformación que se encuentran en el aire y el suelo, llegan eventualmente a los ecosistemas acuáticos. Una vez en ellos, pueden ser degradados parcial o totalmente, permanecer sin cambios, regresar a la atmósfera por volatilización, o bioconcentrarse en los organismos de dichos ecosistemas. Los efectos

adversos de los plaguicidas en los ecosistemas acuáticos dependen no sólo de las características del tóxico y de su concentración, sino también de la naturaleza del ecosistema. Los principales efectos ocurren sobre el agua, el sedimento y la biota del sistema”.

Esta contaminación provocada por plaguicidas al agua como producto del arrastre de la irrigación ya sea por lluvia o por riego tecnificado de los campos de cultivo y que van hasta los ríos y mares se introducen en las cadenas tróficas (de alimentos) provocando la muerte de varias formas de vida necesarias para el balance de los ecosistemas. Estos compuestos químicos provocan la muerte de peces tanto en agua dulce como en salada, ya sea por intoxicación directa causada por la acumulación en ciertas aéreas o el envenenamiento por la ingestión de peces contaminados. Este envenenamiento también puede darse en humanos que ingieran dichos animales. En condiciones de laboratorio se ha observado que algunos de ellos son cancerígenos, teratogénicos y mutágenos en ratas, hámsters y monos (Sánchez-Bravo, A.A. 2006). A continuación se señalan brevemente los efectos en algunos tipos de agua:

⇒ Agua marina

Pese a no tener contacto directo con los plaguicidas el océano es el manto acuífero más contaminado. Esto se debe a que a él van todos los ríos y por él pasan las corrientes de aire. Es decir, a él llega toda la contaminación de los ríos y mantos subterráneos y también la contaminación de las corrientes aéreas.

⇒ Agua potable

Las escorrentías de aguas superficiales pueden transportar pesticidas de zonas agrícolas, campos de golf y propiedades residenciales a lagos, ríos y embalses. La lluvia y la nieve pueden transportar pesticidas a suministros de agua subterráneos a través del suelo. Los pesticidas que no se desechan correctamente pueden moverse a través del suelo y alcanzar suministros de agua potable. Los plaguicidas que no se aplican correctamente pueden infiltrarse en el agua de pozos, en particular si el pozo se encuentra cerca de la casa o el revestimiento del pozo está en mal estado. Normalmente en el agua potable los niveles de concentración de plaguicidas son bajos y a corto plazo no representan un verdadero problema. Sin embargo no se hay llevado a cabo exámenes de largo plazo sobre la ingesta de pequeñas dosis de pesticida en agua por lo que se desconoce realmente el efecto que estos tienen en las poblaciones. La exposición prolongada a dosis elevadas de plaguicidas puede provocar cáncer, otros también pueden provocar defectos de nacimiento y daños en el sistema nervioso.

⇒ Agua subterránea

Los mantos subterráneos sufren una contaminación de primera mano por los plaguicidas. Esto ocurre gracias a la filtración del contaminante a través del suelo o por medio del agua de riego que es reabsorbida por la tierra. El problema de esta contaminación reside en que los mantos subterráneos proveen agua directamente a poblaciones o son el origen de ríos o riachuelos por lo que estos están contaminados desde su génesis.

Una forma preventiva para evitar la contaminación de las aguas subterráneas, es la implementación de un sistema inteligente de riego de plaguicidas con una serie de estructuras complejas de tuberías que incluya sensores de humedad de suelo, la electrónica respectiva y un software específico para cada cultivo. En el tratamiento de aguas residuales, los plaguicidas

pueden ser removidos de las aguas en la etapa del tratamiento terciario o avanzado, como por ejemplo el proceso de nanofiltración (Manahan, 2007). El análisis exhaustivo de muestras contaminadas es útil para cuantificar la disposición que tiene ésta hacia el contaminante y desarrollar nuevas formas de mitigación (Bernal-González, 2008; Orta-Arrazcaeta, 2002). El uso de métodos de oxidación avanzada también es una opción para su depuración (Jiménez-González y col., 2014; Malato-Rodríguez y col., 2016).

Suelo y subsuelo (Mantos acuíferos)

Con el aumento de la densidad de población en el mundo crece a la par la voraz necesidad de espacio para el cultivo. Para obtener el espacio necesario para satisfacer la demanda de alimentos, la industria agrícola ha llevado su imperio a tierras ocupadas por otras especies vegetales. La necesidad de asegurar la supervivencia de sus cosechas los obliga a utilizar plaguicidas y herbicidas, lo que genera una contaminación desmedida de espacios previamente vírgenes. La actividad agrícola se ha visto incrementada en las últimas décadas, debido al aumento demográfico, requiriendo una mayor producción para abastecer a toda la población. Esta se basa principalmente en el abono de la tierra, para aumentar las zonas de plantación y conservación de las existentes, así como el control de plagas, por el aumento de insectos que se reproducen al tener más alimento al que atacar. Estos métodos utilizados para el control de plagas e insectos son muy agresivos y devastadores en la tierra, que va contaminado el suelo al verter anualmente toneladas de fertilizantes y plaguicidas (Figura 4). También las aguas sufren la contaminación, por la infiltración de estos productos en los ríos o en los acuíferos al ser utilizados por el hombre como ya se mencionó arriba (Anónimo, 2015c).

La problemática es que al ser aplicados los plaguicidas (herbicidas, insecticidas, etc.) se dispersan a través de la matriz del suelo (Figura 4a).

Hay que considerar en primer lugar que los plaguicidas alteran el balance de la naturaleza desequilibrando los sistemas ecológicos. Este hecho tiene gran trascendencia, ya que, como es sabido, el suelo es un ecosistema francamente complejo, en el que coexisten multitud de poblaciones animales, vegetales y microbianas que mantienen entre sí y con el agua y los elementos minerales edáficos un equilibrio dinámico muy preciso. La alteración de este equilibrio por la introducción de unos agentes químicos tan activos, como suelen ser los plaguicidas, producen una serie de fenómenos variados que probablemente afectan a muchos de los elementos biológicos del suelo (Sánchez-Martín y Sánchez-Camazano, 1984).

“Muchos plaguicidas son persistentes y permanecen muchos años en el suelo. Esto afecta a los microorganismos del suelo, disminuye la fertilidad y, finalmente, favorece la erosión” (Condarco-Aguilar y Rejel-Encinas, 2016).

El suelo es el lugar donde van a parar gran parte de los desechos sólidos y líquidos de cualquier actividad humana. La contaminación del suelo es la presencia de compuestos químicos hechos por el hombre u otra alteración al ambiente natural de suelo. Todo lo que no es útil en cualquier proceso industrial, minero, urbano, agrícola, etc. se termina acumulando en el suelo por el paso de los años. Los productos químicos que pueden detectarse en el suelo pueden ser, desde hidrocarburos, plaguicidas y metales pesados y su dispersión entra en los ciclos biogeoquímicos naturales del suelo (Anónimo, 2015c) (Figura 4b).

EL COLOR DE LA ETIQUETA	GRADO DE TOXICIDAD	SU PELIGROSIDAD ES
	Ia Extremadamente tóxico	 MUY TÓXICO
	Ib Altamente tóxico	 TÓXICO
	II Moderadamente tóxico	X DAÑINO
	III Ligeramente tóxico	CUIDADO
	IV Precaución	PRECAUCIÓN

Figura 4. Clasificación de los plaguicidas por peligrosidad (Condarco-Aguilar y Rejel-Encinas, 2016)

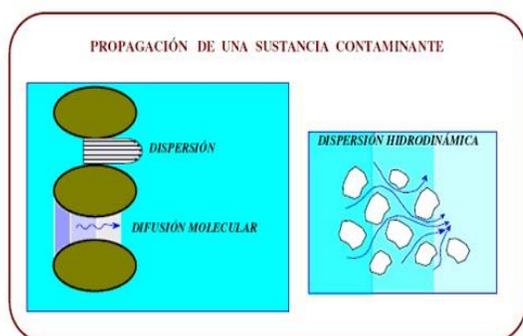


Figura 4a. Dispersión de un plaguicida en el suelo (Yáñez, 2012)



Figura 4b. El suelo como regulador de sustancias químicas aplicadas en la agricultura (García y Dorronsoro, 2002)

La contaminación en el suelo se debe tanto a tratamientos específicos (insecticidas del suelo, desinfectantes, tratamientos de surco o de semillas, y de modo especial herbicidas de pre-siembra y pre-emergencia), como también por contaminación proveniente de otros tratamientos, como los aéreos, cuando los residuos volátiles caen al suelo o son arrastrados por la lluvia (Figura 5).

Muchos plaguicidas (la mayoría de ellos herbicidas polares, derivados fosfóricos y carbámicos, etc.) se degradan rápidamente en el suelo y sus residuos desaparecen en un corto plazo de tiempo. Sin embargo, la aplicación de derivados clorados de difícil eliminación lleva consigo una elevada persistencia en el medio ambiente. Debido a estos riesgos, las legislaciones de muchos países actuales consideran que el uso de tales derivados clorados está prohibido o sujeto a restricciones (Pitarch, 2001).



Figura 5. Zonas agrícolas de riego y temporal en México (Flores, 1959)

Al igual que en el agua, la contaminación de la tierra varía según ciertos factores en los que se incluyen el tiempo, la composición del suelo, de los contaminantes, la capacidad de los suelos de amortiguar dichos compuestos. Todo esto puede retardar el efecto de la contaminación haciendo creer que dicha contaminación no es tan tóxica. Este craso error hace que haya una mayor permisividad con las empresas ya que no se perciben los efectos a corto plazo; sin embargo se desconocen los efectos a largo plazo. Los efectos producidos con la aplicación de los plaguicidas en los cultivos no cesan de forma inmediata, ya que estas sustancias al ser solubles en agua pueden ser arrastradas por las lluvias o el riego hasta llegar al suelo y las aguas subterráneas, generando un problema de contaminación. Cuando estos compuestos llegan al suelo pueden generar efectos nocivos sobre los organismos presentes pues sus efectos biocidas siguen activos. De esta forma se afecta la vida del suelo, ocasionando disminución de procesos bióticos importantes como la descomposición, mineralización, humificación y la regulación de otros microorganismos fitopatógenos (García y Dorronsoro, 2002).

La mayoría de los plaguicidas pueden ser degradados por procesos que se dan dentro del propio suelo o simplemente por la acción de la luz solar sobre este, pero cuando un suelo está demasiado dañado por la acción humana o por agentes naturales y la concentración de estos microorganismos es muy baja resulta muy complicado y costoso restaurarlo ya que, desafortunadamente, los plaguicidas pueden llegar a penetrar muchas capas del suelo (Figura 4a). La determinación de estos contaminantes en el suelo (que en la mayoría de los casos se realiza por cromatografía de gases y/o líquidos) puede permitir escoger un tratamiento adecuado (extracción de vapores, inyección de aire, bombeo de agua, lavado de suelos o tratamientos químicos *in situ*) para su rescate y reutilización evitando el transporte de los plaguicidas hacia otras capas del suelo donde el tratamiento se ha más difícil o hasta imposible (Manahan, 2007). Su depuración resulta muy complicada y costosa por lo que esto está retrasando su remediación. De hecho, los llamados “superfondos” en los Estados Unidos no son suficientes para la restauración de suelos contaminados debido a su alto costo (Davis y Cornwell, 2008).

Por ello, el mejor método es no contaminarlo y, sobre todo, concientizar a los agricultores, industriales y a la sociedad en su conjunto.

Residuos sólidos y sustancias y residuos peligrosos

No existe un acuerdo común que estandarice el estudio de los daños que las sustancias pueden llegar a hacer, sin embargo la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda, para evaluar la toxicidad, un método por el cual se calcula la dosis letal, DL_{50} , de una sustancia. La DL_{50} es la cantidad mínima de una sustancia que es capaz de matar al 50% de una población de animales de prueba expuestos a ella, generalmente es expresada en mg/kg. Los valores de la DL_{50} se extrapolan a los humanos y sirven como base para la clasificación de las sustancias por su toxicidad aguda o a corto plazo. Con este valor puede evaluarse la toxicidad de los plaguicidas. Es importante mencionar lo que señala la OMS (2015) sobre las personas que tienen dietas pobres en proteínas y con estados importantes de deshidratación ya que son las que sufren un mayor daño debido a la falta de nutrientes en su cuerpo. En algunos animales de laboratorio que son sometidos a dietas hipo-proteínicas, las DL_{50} de ciertos plaguicidas pueden bajar entre 4 y 2,100 veces y, aunque esto aún no se prueba en el ser humano, podría ser utilizado como criterio entre los trabajadores del campo y ver de qué manera los afecta.

Como se mencionó antes, a los plaguicidas se les puede clasificar como:

*Grupo V: no implican riesgo cuando se utilizan normalmente, tienen un DL_{50} mayor o igual a 2000 mg/kg en sólidos y mayor o igual a 3000 mg/kg en líquidos.

*Grupo VI: No se les asigna una clasificación debido a que son considerados como obsoletos.

*Grupo VII: Fumigantes gaseosos o volátiles. La clasificación de la OMS no establece criterios para las concentraciones aéreas en las cuales pueda basarse la clasificación. La mayoría de estos compuestos son de muy alta toxicidad y existen recomendaciones sobre límites de exposición ocupacional en muchos países

En algunos casos, como las preparaciones de aerosoles o fumigantes gaseosos o volátiles los valores de DL_{50} oral y dérmica no deben emplearse como base de clasificación, por lo que es necesario usar otros criterios como la concentración en el aire.

Por otro lado, los desechos de plaguicidas se entiende productos caducos, deteriorados o que por alguna razón no pueden ser utilizados, equipos de aplicación o elementos de protección, restos de derrames o incendios, sobrantes de mezclas, envases, empaque y embalajes vacíos de plaguicidas. Estos desechos constituyen un riesgo potencial y deben ser dispuestos de modo que no afecten la salud humana o el ambiente. Si un residuo sólido proveniente de algún plaguicida (empaques, botellas, tanques, etc.) y no es desechado correctamente, contaminará de una manera muy significativa.

Disposición de los desechos sólidos de plaguicidas

Para la correcta disposición de desechos de plaguicidas se debe tener en cuenta los siguientes factores (Anónimo, 2016c):

1. *La clase de sustancia.* Existen métodos de eliminación apropiados para cierto tipo de sustancias, pero no convenientes para otras.

2. *La cantidad de sustancia.* Cantidades pequeñas pueden ser eliminadas por métodos que no se aceptan para cantidades grandes.
3. *La legislación vigente.*

Disposición final

Para llevar a cabo una adecuada disposición final de los envases de los plaguicidas, debe cumplirse con lo siguiente (INECC, 2014):

1. Las instrucciones sobre la disposición final adecuada de los envases de plaguicidas deben figurar en la etiqueta.
2. Idealmente los envases deberían ser retornados al distribuidor o al fabricante para ser reutilizados sólo para contener plaguicidas. Deberían estar diseñados para ser reutilizados o reciclados con el mismo fin.
3. Los envases que no sean reutilizables o reciclables para el mismo uso con plaguicidas deben ser aplastados o desfondados después del triple lavado con agua, de manera de asegurar que no puedan ser reutilizados para otros usos.
4. Si los envases no pueden ser devueltos al fabricante, deben ser tratados como residuos tóxicos y eliminados de manera acorde con las normas de eliminación y tratamiento de ese tipo de residuos en sitios de recolección y disposición final para residuos tóxicos.
5. Los envases vacíos que esperan su disposición final adecuada deben estar marcados y almacenados en un lugar seguro.

Algunos plaguicidas han sido transformados en derivados de menor toxicidad en presencia de peróxido de hidrógeno y complejos de Fe(III) mediante la aplicación de radiación UV en presencia de oxígeno y peróxido de hidrógeno. Muchos otros plaguicidas de diversas estructuras han sido degradados mediante estos procesos de oxidación avanzada como irradiación directa con luz solar y ozono/Fe (III). A pesar de sus ventajas, estas tecnologías de tratamiento también presentan algunos inconvenientes que no pueden ser soslayados (Barrera-A. y col., 2014; Barrera-Andrade, 2016). Por ello, nuevamente, deben considerarse otras opciones para la producción masiva de alimentos evitando el uso de estas sustancias peligrosas (Reyes y col., 2015).

Estudios ambientales

En lo referente a la gestión ambiental, los estudios de impacto ambiental con sus informes preventivos de impacto ambiental y manifestación de impacto ambiental, así como las técnicas de identificación de impactos ambientales (Matriz de Leopold, Técnica Battelle Columbus, Superposición de mapas) y los estudios de riesgo ambiental (Técnicas de cuantificación de riesgos: *What if?*, *Hazop*, *Árbol de fallas*), existen numerosos y amplios estudios al respecto, ya que esta problemática existe no solamente en nuestros países con economías emergentes sino en todo el planeta incluidos los países llamados de primer mundo ya que se ha dado el uso y abuso de estas sustancias químicas (tanto como armas químicas en las guerras - napalm en VietNam por solamente mencionar uno -, como su uso indiscriminado en los campos sin ningún entrenamiento previo para los usuarios). Se tienen auditorías ambientales e incluso la aplicación de las normas tipo ISO9000 e ISO14000 las cuales están profusamente publicadas en las redes internacionales y las revistas técnico-científicas de mayor impacto.

La Figura 6 muestra en forma de caricatura los efectos de estas sustancias químicas especialmente por los residuos que dejan en los alimentos.



Figura 6. Efectos residuales de los plaguicidas en los alimentos (Bickerton 2014)

Ruido y radiaciones

El empleo de lámparas fluorescentes de luz ultravioleta para llevar a cabo la irradiación de los materiales a tratar puede aumentar los costos de operación hasta más de tres veces por arriba del costo de operación del proceso utilizando radiación solar.

La aplicación de tecnologías que utilizan solamente agentes oxidantes como el ozono o el peróxido de hidrógeno no son todavía lo suficientemente eficientes para la eliminación de los residuos de plaguicidas, puesto que el potencial de oxidación de éstos es menor que el de su combinación con radiación UV y no son siempre capaces de llevar a cabo la mineralización completa de los contaminantes, generando residuos que podrían presentar complicaciones ambientales adicionales como alta toxicidad, persistencia, bioacumulación o biomagnificación (Jiménez-González y col., 2014).

Con respecto a la contaminación por ruido, ésta es causada por los medios usados para la aplicación de pesticidas a los campos. En esta parte, el ruido está asociado principalmente al riego de los plaguicidas empleando aviones o avionetas. Dado que en su normalidad los campos se encuentran aislados de zonas urbanizadas y que los empleados están provistos de protecciones auditivas, este tipo de contaminación es menor. Si se lograra eliminar este mecanismo de aspersión no se tendría esta fuente de ruido (Anónimo, 2016a).

Sobre las radiaciones, tampoco se tiene un impacto sobre este rubro en el estudio de caso presentado. Por el contrario, la radiación solar en el ultravioleta cercano o UVA y la radiación visible podrían ayudar en la eliminación de estos compuestos tóxicos si en el suelo hubiera óxidos como los de titanio o equivalentes que ayudaran a la descomposición fotocatalítica de ellos (Barrera-A. y col., 2014; Barrera-Andrade, 2015).

Balance de materia

Se puede proponer un balance de materia general (Figura 7). El balance general está dado por:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Acumulación}$$

El término de la acumulación está en función de la matriz donde se encuentre el contaminante. En forma matemática es:

$$\sum \dot{m}_A^i x_A^i = \sum \dot{m}_E^i x_E^i + \frac{d\dot{m}_T}{dt}$$

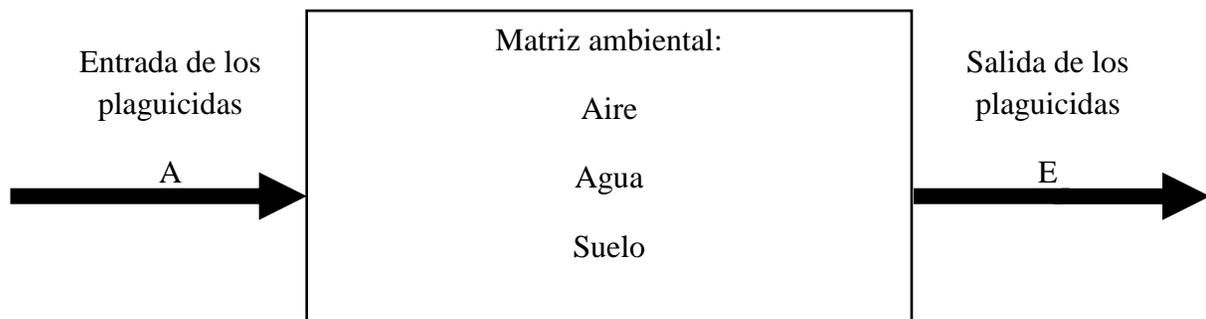


Figura 7. Balance de materia general en una matriz ambiental

El término de la izquierda muestra las entradas del plaguicida en todos los modos posibles antes mencionados, denota una suma debido a que existen diferentes tipos de plaguicidas y entran con su fracción respectiva. El primer término del lado derecho de la igualdad denota la salida del plaguicida de la matriz ambiental, ya sea por medio de una descontaminación o por algunos procesos naturales (que implican el traslado a otra matriz ambiental [a otro balance de materia], o bien a su destrucción), también es una suma debido a la gran cantidad de plaguicidas existentes (cada uno con sus propiedades fisicoquímicas de ahí que surja la necesidad de asignarles un término) con su fracción pertinente. El término de acumulación es un tanto más complicado, está en función de muchos factores:

$$\frac{d\dot{m}_T}{dt} = f^*(T.\text{energía}, T.\text{masa}, \text{prop.matriz amb.}, \text{prop.cont.}, \text{fenómenos de sup.})$$

La información que podría proporcionar dicho término es determinante para escoger un tratamiento que elimine completamente todos los contaminantes alojados en la matriz ambiental problema. Se pueden realizar experimentos con apoyo de la teoría para dar una buena aproximación de cuál es la dinámica de los contaminantes.

Conclusiones y perspectivas

Una vez que los plaguicidas son aplicados, los fenómenos de sorción (adsorción-desorción), así como la degradación biológica (biodegradación) y química (hidrólisis química y fotólisis), son de los procesos predominantes que afectan y definen el comportamiento de dichos contaminantes en las diferentes matrices ambientales, mineralizándolos o llevándolos a la formación de productos de degradación, los cuales pueden ser más tóxicos y estar presentes en mayores concentraciones. No obstante, en México, el uso de plaguicidas sigue siendo una práctica común, siendo detectada su presencia tanto en suelos, como en cuerpos de agua y sedimentos cercanos a las zonas agrícolas. Por ello, se considera importante seguir el estudio de estos contaminantes orgánicos persistentes.

Reconocimientos

Los autores reconocen el apoyo para la parte de docencia en ingeniería química a la UNAM que, a través de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM mediante el Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) Clave PE100514, permitió la adquisición de materiales y reactivos para los estudios experimentales con el plaguicida atrazina y sus subproductos, que están afectando una zona patrimonio cultural de la humanidad. Asimismo, se agradece al Programa de Apoyo a la Investigación y Posgrado de la Facultad de Química, PAIP-FQ, Clave 50009067, con el que se adquirieron otra parte de los reactivos, consumibles y materiales empleados en esta investigación en la fase experimental. Finalmente, se agradece al DAAD de Alemania por el donativo del equipo Büchi que se empleó para medir compuestos nitrogenados en las muestras de agua de la zona afectada con la presencia del plaguicida atrazina.

Bibliografía

- Anónimo. 2015a. Plaguicidas. Dirección electrónica: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/768-sqre-plaguicidas>
- Anónimo. 2015b. Riesgos de los plaguicidas para el ambiente. Dirección electrónica: <http://tramites.semarnat.gob.mx/Doctos/DGGIMAR/Guia/07-015AD/riesgos.pdf>
- Anónimo. 2015c. Efectos de la contaminación por insecticidas químicos en el suelo. Dirección electrónica: https://www.extertronic.com/shop/es/blog/22_insecticidas-quimicos-y-contaminacion.html
- Anónimo. 2016a. Minnesota Department of Agriculture. St. Paul, Minnesota, EE.UU. Dirección electrónica: <http://www.mda.state.mn.us/chemicals/pesticides/complaints/aerial.aspx>
- Anónimo. 2016b. Dirección electrónica: <http://www.diarioinformacion.com/alicante/2014/11/16/gobierno-descarta-trasvase-agua-cullera/1567877.html>
- Anónimo. 2016c. Dirección electrónica: <http://publicaciones.ops.org.ar/publicaciones/publicaciones%20virtuales/proyectoPlaguicidas/libro/carpModulo4/modulo4F1.html>
- Arias-Estévez, M., López-Periago, E., Martínez-Carballo, E., Simal-Gándara, J., Mejuto, J.C., García-Río, L. 2008. The mobility and degradation of pesticides in soils and the

- pollution of groundwater resources. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **123**:247-260.
- Badii, M., Landeros, J. 2007. Plaguicidas que afectan a la salud humana y la sustentabilidad. *CULCyT/Toxicología de Plaguicidas* **19**:21-34.
- Barberá, C. 1989. *Pesticidas agrícolas*. Ediciones Omega, S.L. 4a. ed. Barcelona. España.
- Barceló, D. 2003. Emerging pollutants in water analysis. *Trends in Analytical Chemistry* **22**(10):14-16.
- Barrera-A., J.M., García-M., J.A., Jiménez-G., A.E., Zanella-S., R., Gelover-S., L.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2014. Titanium dioxide supported in mesoporous material (SBA-15) to remove the textile dye Reactive Blue 69 in aqueous solution. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*. 17(1):152-158. ISSN 1203-8407.
- Barrera-Andrade, J.M. 2015. **Degradación de colorantes textiles en soluciones acuosas usando catalizadores mesoporosos de TiO₂/SiO₂ dopados con Fe**. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental, Agua). UNAM. Defensa: Abril 15, 2016. México D.F. México.
- Bernal-González, M. 2008. **Desarrollo de un muestreador pasivo para carbamatos y triazinas en agua**. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental, Agua). UNAM. Defensa: Abril 8. México D.F. México.
- Bickerton, D. 2014. Plaguicidas utilizados en los transgénicos: ¿inseguros a cualquier dosis? [Figura 6]. Dirección electrónica: <http://www.uakix.com/articulos/plaguicidas-utilizados-en-los-transgenicos-inseguros-a-cualquier-dosis/>
- COFEPRIS. 2010. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, México. Dirección electrónica: <http://www.cofepris.gob.mx/AZ/Paginas/Plaguicidas%20y%20Fertilizantes/PlaguicidasYFertilizantes.aspx>
- CONAGUA. 2011. *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, editor. Pp. 43-56. México, D.F. México.
- Condarco-Aguilar, G. Coordinador General Plagbol y Rejel-Encinas, S. Coordinadora de Comunicación Plagbol. 2016. Dirección electrónica: <http://es.slideshare.net/fundacionplagbol/cartilla-informativa-plaguicidas-salud-y-medio-ambiente>
- Davis, M.L., Cornwell, D.A. 2008. Introduction to environmental engineering. 4a edición. McGraw-Hill Companies, Incorporated. Nueva York, EE.UU.
- DeBoer, J., Wester, P. 1991. Chlorobiphenyls and organochlorine pesticides in various sub-Antarctic Organisms. *Marine Pollution Bulletin*. **22**:441.
- Diano, N., Mita, D. 2011. Removal of endocrine disruptors in waste waters by means of bioreactors. *Desalination* **85**:29-54.
- Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C., Bernal-González, M., García-Gómez, R.S., Ramírez-Burgos, L.I. 2014. Propuesta para enriquecer el Programa de la asignatura de Ingeniería Ambiental, de la carrera de Ingeniería Química, con la integración de Estudios de Caso. Proyecto Clave PE100514. Programa de Apoyo a Proyectos de Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza, PAPIIME. Dirección General de Asuntos del Personal Académico, DGAPA, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. México D.F. México.

- Elvira-del-Cid, M., Alonso-García, A.M., Martínez-Etayo, L. 1998. Estudio de microcotaminantes orgánicos en las aguas subterráneas. En *Textos de las jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Pp. 239-246. Valencia. España.
- European Commission. 1996. The impact of endocrine disruptors on human health and wildlife, *Environment* **54**:25-34.
- FAO. 2014. Evaluación de la contaminación del suelo: manual de referencia. Food and Agriculture Organization. Dirección electrónica: <http://www.fao.org/docrep/005/x2570s/X2570S00.htm#TOC>. 25/04/2014.
- Farrera, P. 2004. Acerca de los plaguicidas y su uso en la agricultura. Revista digital del Centro de Investigaciones Agropecuarias de Venezuela. CENIAP HOY. Número 6. Dirección electrónica: http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_tec/ceniaphoy/articulos/n6/arti/farrera_r/arti/farrera_r.htm. 02/05/2014.
- Flores, E. 1959. Tipos de agricultura en México. [Mapa]. Recuperado de: *La localización de la Agricultura y los Cambios del uso de la Tierra en México*. Investigación Económica. 19(73):3-30.
- García, I., Dorronsoro, C. 2002. Contaminación del suelo: Contaminación por fitosanitarios: pesticidas. Tema 13. Universidad de Granada, Edafología. Granada, España. Dirección electrónica: http://dateca.unad.edu.co/contenidos/358013/ContenidoEnLinea/leccin_18_contaminacin_por_plaguicidas_y_herbicidas.html
- Hernández-Antonio, A., Hansen, A.M. 2011. Uso de plaguicidas en dos zonas agrícolas de México y evaluación de la contaminación de agua y sedimentos. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27 (2) 115-127
- Herrero-Hernández, E., Andrades, M.S., Álvarez-Martín, A., Pose-Juan, E., Rodríguez-Cruz, M.S., Sánchez-Martín, M.J. 2013. Occurrence of pesticides and some of their degradation products in waters in a Spanish wine region. *Journal of Hydrology* **486**:234-245.
- Hollender, J., Singer, H., McArdell, C.S. 2008. Polar organic micropollutants in the water cycle. En *Dangerous pollutants (xenobiotics) in urban water cycle*. Hlavinek, P., Bonacci, O., Marsalek, J., Mahrikova, I., editores. Springer. Pp. 113-116. Lednice, Czech Republic.
- Holvoet, K.M.A., Seuntjens, P., Vanrolleghem, P.A. 2007. Monitoring and modeling pesticide fate in surface waters at the catchment scale. *Ecological Modelling* **209**:53-64.
- INECC. 2014. **Plaguicidas**. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Dirección electrónica: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/768-sqre-plaguicidas>. 29/05/2014.
- Jiménez-González, A. E., Pineda-Arellano, C. A., Gutiérrez-Mata, A. G., Pérez-Franco, C., Hernández-Cárdenas, R., Iragorri-Sámamo, E. 2014. *Effect of solar concentration ratio on the mineralization of the carbaryl pesticide by means of photo-Fenton process at a pilot plant level / Efecto de la razón de concentración solar sobre la mineralización del plaguicida carbarilo por medio del proceso foto-Fenton a nivel de planta piloto*. En *Fifth International Daad Alumni Seminar: Green Engineering Final Book / Libro final del Quinto Seminario Internacional de Ex-Becarios del DAAD de Alemania: Ingeniería verde. June 30 / Junio 30, 2014*. Dirección electrónica: <http://www.ambiental.unam.mx/cursos.html>

- Macías-Zamora, J.V., Sánchez-Osorio, J.L., Ramírez-Álvarez, N., Hernández, J. 2008. **Diagnóstico de contaminantes orgánicos persistentes (COP) en el Valle del Yaqui.** REPORTE FINAL. Número de registro: INE/A1-006/2008. INECC. Guaymas, Sonora, México.
- Malato-Rodríguez, S., Blanco-Gálvez, J., Estrada-Gasca, C.A., Bandala, E.R. 2016. Degradación de plaguicidas. Capítulo 12. Dirección electrónica: <http://www.psa.es/en/projects/solwater/files/CYTED01/19cap12.pdf>
- Manahan, S.E. 2007. **Introducción a la química ambiental.** Co-Edición UNAM-Editorial Reverté. 1a. ed. Pp. 176-177. México, D.F. México-Barcelona, España.
- OMS. 2015. Organización Mundial de la Salud. Direcciones electrónicas: <http://www.who.int/features/qa/87/es/>, <https://manipulacionplaguicidas.wordpress.com/2010/06/07/nueva-clasificacin-de-plaguicidas-de-la-oms/>, <http://www.who.int/bulletin/volumes/86/3/07-041814-ab/es/>
- Orta-Arrazcaeta, L. 2002. Contaminación de las aguas por plaguicidas químicos. Fitosanidad. 6(3):55-62. Dirección electrónica: <http://www.redalyc.org/pdf/2091/209118292006.pdf>
- Petrovic, M., Farré, M., López, M., Perez, S., Postigo, C., Köck M., Radjenovic, J., Gros, M., Barcelo, D. 2010. Recent trends in the liquid chromatography-mass spectrometry analysis of organic contaminants in environmental samples. *Journal of Chromatography A* 1217:4004-4017.
- Pitarch, E. 2001. Desarrollo de metodología analítica para la determinación de plaguicidas organofosforados y organoclorados en muestras biológicas humanas. *Tesis doctoral.* Departament de Ciències Experimentals Química Analítica, Universitat Jaume, España.
- RAP. 2015. Red de acción en plaguicidas y sus alternativas en América Latina. Plaguicidas. Dirección electrónica: http://www.rap-al.org/index.php?seccion=4&f=clasificacion_plaguicidas.php
- Reeves, M., Schafer, K., Hallward, K., Katten, A. 2015. Campos envenenados: Los trabajadores agrícolas y los pesticidas en California. Pesticide Action Network North America www.panna.org. Dirección electrónica: http://www.oocities.org/rap_al/California.htm
- Reyes-López, D.R., Cabrera, J.L., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2015. Biofertilizantes y bioplaguicidas aplicados al campo mexicano: Innovación para mejorar la productividad en el cultivo de la cebada (*Hordeum vulgare* L.) / *Biofertilizers and biopesticides applied to the Mexican fields: Innovation to improve the productivity in barley cultivation (Hordeum vulgare L.)*(SyAS-3). En **Proceedings of the 2015 SIXTH INTERNATIONAL SEMINAR OF EXPERTS ON THE TREATMENT OF INDUSTRIAL EFFLUENTS AND RESIDUES.** Libro electrónico. Pp. 203-216. RACAM-UNAM-LIQAyQA, FQ, UNAM. ISSN En trámite. Noviembre 11-14. México, D.F., México.
- Sánchez-Bravo, A.A. 2006. Agua: Un recurso escaso. Arcibel editores, ISBN: 9788493537401. 222 págs.
- Sánchez-Martín, M.J., Sánchez-Camazano, M. 1984. Los plaguicidas. Adsorción y evolución en el suelo. CSIC, CeresNet, Diputación de Salamanca, España. Dirección electrónica: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/12919/1/plaguicidas.pdf>
- Tappe, W., Groeneweg, J., Jantsch, B. 2002. Diffuse atrazine pollution in German aquifers. *Biodegradation* 13:3-10.

- USEPA. 2014. **About pesticides**. United States Environmental Protection Agency. Dirección electrónica: <http://www.epa.gov/pesticides/about/index.htm>. 08/05/2014.
- Vega, S. 1985. *Toxicología I: Evaluación epidemiológica de riesgos causados por agentes químicos ambientales*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. Pp. 69.
- Yáñez, L. 2012. Propagación de una sustancia contaminante. [Figura 4a]. Recuperado de: <http://teseinguimica.blogspot.mx/>