

USO DE PLAGUICIDAS EN DOS ZONAS AGRÍCOLAS DE MÉXICO Y EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUA Y SEDIMENTOS

Arturo HERNÁNDEZ-ANTONIO¹ y Anne M. HANSEN²

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis, Los Mochis 81220, Sinaloa, México, heaa@uas.uasnet.mx

² Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Laboratorio de Hidrogeoquímica, Jiutepec 62550, Morelos, México, ahansen@tlaloc.imta.mx

(Recibido mayo 2010, aceptado marzo 2011)

Palabras clave: cuenca hidrológica, COP, atrazina y desetilatrastina, DDD y DDE

RESUMEN

En este estudio se presenta el inventario de plaguicidas y una evaluación de la contaminación de agua y sedimentos en dos zonas agrícolas de México. Se analizaron plaguicidas triazínicos, fenoxiclorados y organoclorados, incluyendo seis contaminantes orgánicos persistentes (COP). Aunque el uso de atrazina ha sido prohibido y restringido en varias partes del mundo, en México este herbicida se sigue usando sin restricción alguna, los resultados obtenidos demuestran que afecta a la calidad del agua en una de las zonas agrícolas. Las concentraciones de atrazina y de su metabolito (desetilatrastina) en muestras de agua, rebasaron el límite para agua de consumo humano de $2 \mu\text{g L}^{-1}$ propuesto por la Organización Mundial para la Salud (WHO 2008) y el de la Comunidad Europea que establece un límite de $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ (European Parliament 1998). Los metabolitos del plaguicida DDT (DDD y DDE), excedieron el límite basal para calidad de sedimentos (ISQG por sus siglas en inglés) del criterio del Consejo de Ministros del Ambiente de Canadá para sedimentos en cuerpos de agua dulce, aunque no rebasan el límite de probable efecto (PEL por sus siglas en inglés) (CCME 2003). Aunque se restringió el uso de DDT en la agricultura en México (DOF 1991), los resultados muestran que los metabolitos de este plaguicida se continúan encontrando en muestras ambientales debido a su larga vida media. Se plantea la necesidad de vigilar mediante monitoreos en los cuerpos de agua, los plaguicidas encontrados en este estudio en concentraciones que exceden los criterios y límites establecidos.

Key words: watershed, POP, atrazine and desethylatrastine, DDD and DDE

ABSTRACT

This study presents the inventory of pesticides and an assessment of water and sediments pollution in two agricultural areas of Mexico. Triazinic, fenoxychlorinated, and organochlorine pesticides were analyzed, including six persistent organic pollutants (POP). Although the use of atrazine is restricted and prohibited in various parts of the World, this herbicide is still being used in Mexico without restriction and our results show that this herbicide affects water quality in one of the agricultural areas. The concentrations of atrazine and one of its metabolites (desethylatrastine) in water samples exceeded the limit of $2 \mu\text{g L}^{-1}$ proposed by the World Health Organization for this herbicide in

drinking water (WHO 2008) and the one of the European Community has satted at $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ for drinking water (European Parliament 1998). The metabolites of the pesticide DDT (DDD and DDE) exceeded the interim sediment quality guideline (ISQG) for freshwater sediments established by the Canadian Council of Environmental Ministers although concentrations do not exceed the probable effect level (PEL) (CCME 2003). Although the use of DDT in agriculture has been banned in Mexico (DOF 1991), the results show that the metabolites of this pesticide continue to appear in environmental samples due to its long half-life. Surveillance monitoring is proposed for the pesticides found in levels higher than established in limits and criteria.

INTRODUCCIÓN

En México la superficie agrícola varía entre 20 y 25 millones de hectáreas (CONAGUA 2008). Los plaguicidas son sustancias o mezclas de sustancias 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 2010). Se utilizan plaguicidas para el control de plagas y enfermedades que afectan la producción agrícola. En 2006 el consumo de plaguicidas en México fue de 95 025 toneladas (SENER 2007). Estas sustancias representan un riesgo para la salud humana y el ambiente debido a que pueden contaminar suelos, agua, sedimentos y aire (Cheng 1990). Los plaguicidas llegan a cuerpos de agua por escurrimiento, infiltración y erosión de los suelos, en lugares donde se han aplicado. También pueden movilizarse por transporte tanto atmosférico como por escurrimiento durante lluvias o riego agrícola y, de esta manera, transportarse hacia cuerpos de agua, tanto superficiales como subterráneos hasta contaminar agua y sedimentos (Ongley 1996).

Se han realizado estudios para evaluar la contaminación por plaguicidas en aguas superficiales (Pereira y Hostettler 1993, Thurman *et al.* 2000, Golfinopoulos *et al.* 2003, Fytianos *et al.* 2006, Gilliom 2007, Chen *et al.* 2008), en sedimentos (Bester y Hühnerfuss 1996, Daniels *et al.* 2000, Barakat *et al.* 2002, Kishida *et al.* 2007, Hong *et al.* 2008, Hoai *et al.* 2010) y en agua de lluvia (Goolsby *et al.* 1997, Coupe *et al.* 2000, Dubus *et al.* 2000). En México son relativamente escasos los estudios sobre la distribución geográfica de plaguicidas en muestras ambientales y se centran principalmente en plaguicidas organoclorados (Benítez y Bárcenas 1996, Rueda *et al.* 1997, Gutiérrez *et al.* 1998, Osuna *et al.* 1998, Caldas *et al.* 1999, Hernández-Romero *et al.* 2004, Afferden *et al.* 2005, Alegria *et al.* 2006, Wong *et al.* 2008, Ramírez *et al.* 2008).

En este trabajo se evaluó la afectación en agua y sedimentos por el uso de plaguicidas organoclorados, fenoxiclorados y triazínicos en dos zonas agrícolas de México. De los plaguicidas analizados, seis son sustancias consideradas como contaminantes orgánicos persistentes (COP) en el convenio de Estocolmo (UNEP 2007).

El estudio se realizó en el Distrito de Riego 063 (DR 063) de Guasave, Sinaloa, ubicado en la Cuenca Hidrológica Pacífico Norte y en una zona agrícola de referencia (ZAR). Se realizaron inventarios de uso de plaguicidas en las zonas agrícolas, así como muestreos y evaluación de plaguicidas en agua y sedimentos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El DR 063, se localiza en Guasave, Sinaloa, en la zona costera del estado de Sinaloa (**Fig. 1**). En el **cuadro I** se presentan las características generales de esta zona agrícola y de la ZAR.

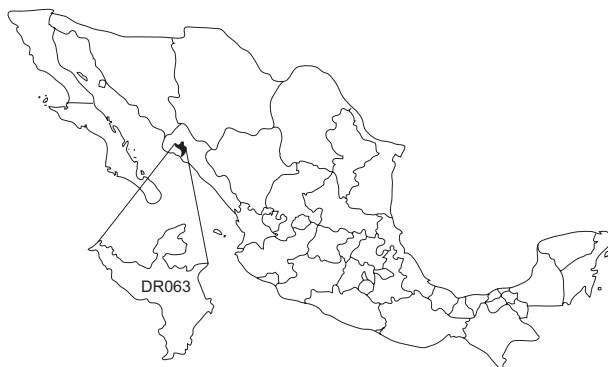


Fig. 1. Localización del DR 063 Guasave, Sinaloa

Inventario de uso de plaguicidas

Se realizó un inventario de uso de plaguicidas en ambas zonas agrícolas. Para ello se partió de información proporcionada por la Oficina Estatal

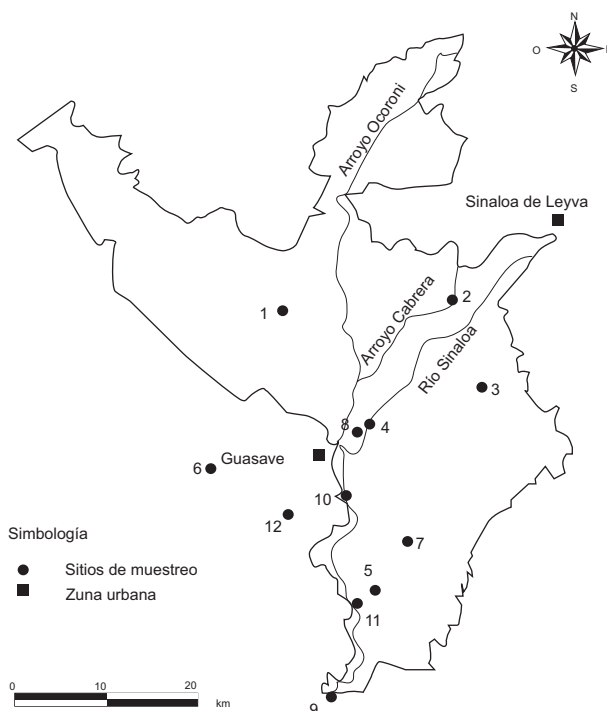
CUADRO I. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ZONAS AGRÍCOLAS ESTUDIADAS

Zona agrícola	DR 063	ZAR
Área (ha)	108 865	202 065
Población (habitantes)	355 277	320 761
Clima	Seco	Cálido subhúmedo
Precipitación media anual (mm)	393	2 346
Temperatura promedio anual (°C)	23.9	28.4
Riego (ha)	106 518	400
Drenaje agrícola (ha)	4 003.5	20.5

de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (OEIDRUS, 2008) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), sobre superficie de siembra de los diferentes cultivos. Para obtener información de los plaguicidas aplicados en cada cultivo, así como su dosis y frecuencia de aplicación, se realizaron entrevistas al personal de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Sanidad Vegetal y el Centro de Apoyo al Desarrollo Rural (CADER), dependientes de la SAGARPA, así como la Asociación de Agricultores y Distribuidores de Agroquímicos de ambas zonas, finalmente se revisaron los paquetes tecnológicos de los cultivos publicados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Se procesaron los registros en una base de datos para estimar la cantidad total de plaguicidas aplicados, considerando las superficies de siembra, dosis, frecuencia de aplicación y las concentraciones de ingredientes activos. Para determinar la cantidad anual utilizada por ingrediente activo, se investigó su grupo químico, la concentración y la densidad de cada producto en el catálogo oficial de plaguicidas (CICOPLAFEST 2005). Se agruparon los plaguicidas que pertenecen al mismo ingrediente activo y grupo químico para obtener la cantidad total aplicada por zona agrícola. Con la información recopilada, se estimó la cantidad anual de plaguicidas aplicados. Por último, para inferir sobre el destino de los plaguicidas y el peligro que representan para la contaminación del agua, se recopiló información de la literatura sobre las siguientes propiedades: Coeficientes de partición en materia orgánica (K_{OC}), constantes de adsorción (K_d), vidas medias ($t_{1/2}$) y categoría toxicológica.

Muestreo y análisis de plaguicidas en agua y sedimentos

Se realizaron muestreos de agua y sedimentos en el DR 063 en octubre de 2008 y en la ZAR en diciem-

**Fig. 2.** Sitios de muestreo en el DR 06

bre de 2007. Se ubicaron los sitios de muestreo con sistema de posicionamiento global (GPS) (**Fig. 2**).

El muestreo fue dirigido para comprobar si existe o no contaminación por plaguicidas en las zonas de estudio. En cada zona agrícola se obtuvieron muestras de agua y sedimentos, los sitios de muestreo incluyeron canales, drenes, arroyos, ríos, zona costera, pozos y norias. Las muestras de agua superficial y sedimentos se obtuvieron en sitios próximos a las zonas de aplicación y las muestras de agua subterránea, en pozos y norias en lugares donde el agua es utilizada como fuente de abastecimiento para uso y consumo humano. Los grupos de plaguicidas analizados en cada sitio y en los diferentes medios ambientales, se determinaron con base en la dinámica de estos contaminantes (**Cuadros II y III**).

Las muestras de agua se obtuvieron con botella van Dorn horizontal y se depositaron en botellas color ámbar de 1L, previamente lavados y enjuagados con hexano grado HPLC. Las muestras para análisis de atrazina y de sus metabolitos se conservaron con ácido ascórbico, ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) y citrato de potasio de acuerdo al Método 527 (USEPA 2005). Las muestras de sedimentos se obtuvieron con draga Ekman de 6" y se depositaron en frascos de vidrio con boca ancha de 1L. Las muestras de agua y sedimentos fueron transportadas al laboratorio bajo obscuridad y refrigeración, en tiempos inferiores a siete días a partir del muestreo,

CUADRO II. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS Y PLAGUICIDAS ANALIZADOS EN EL DR 063

No	Tipo de muestra	Agua			Sedimentos		
		Atrazina y metabolitos	Organoclorados	2,4-D	Atrazina y metabolitos	Organoclorados	2,4-D
1	Canal	NA	✓	✓	NA	✓	✓
2	Canal	NA	✓	✓	NA	✓	✓
3	Canal	NA	✓	✓	NA	✓	✓
4	Dren	NA	✓	✓	✓	✓	✓
5	Dren	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	Dren	✓	NA	NA	✓	NA	NA
7	Dren	✓	NA	NA	✓	NA	NA
8	Río	✓	NA	NA	✓	NA	NA
9	Río	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	Pozo	✓	NA	NA	NA	NA	NA
11	Pozo	✓	NA	NA	NA	NA	NA
12	Pozo	✓	NA	NA	NA	NA	NA

✓ Muestra analizada
 NA Muestra no analizada

CUADRO III. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS Y PLAGUICIDAS ANALIZADOS EN LA ZAR

No	Tipo de muestra	Agua			Sedimentos		
		Atrazina y metabolitos	Organoclorados	2,4-D	Atrazina y metabolitos	Organoclorados	2,4-D
1	Dren	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	Dren	✓	✓	✓	NA	NA	NA
3	Dren	✓	✓	✓	✓	✓	NA
4	Dren	✓	✓	✓	✓	✓	NA
5	Dren	NA	NA	NA	✓	✓	NA
6	Dren	✓	✓	✓	✓	✓	NA
7	Dren	✓	✓	✓	✓	✓	NA
8	Dren	✓	✓	✓	✓	✓	NA
9	Dren	✓	✓	✓	✓	✓	NA
10	Río	✓	✓	✓	✓	✓	NA
11	Río	✓	✓	✓	✓	✓	NA
12	Río	NA	NA	NA	✓	✓	NA
13	Zona costera	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14	Zona costera	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15	Zona costera	✓	✓	✓	✓	✓	NA
16	Zona costera	NA	NA	NA	✓	✓	NA
17	Zona costera	NA	NA	NA	✓	✓	NA
18	Noria	✓	NA	✓	NA	NA	NA
19	Noria	✓	NA	✓	NA	NA	NA
20	Noria	✓	NA	✓	NA	NA	NA
21	Noria	✓	✓	✓	NA	NA	NA
22	Noria	✓	✓	✓	NA	NA	NA
23	Noria	✓	✓	✓	NA	NA	NA

✓ Muestra analizada
 NA Muestra no analizada

fueron extraídas y analizadas de acuerdo con las metodologías indicadas en el **cuadro IV**.

Los extractos de las muestras de agua y sedi-

mentos se concentraron en un rotavapor (Buchi, R-210/215) hasta 5 mL. La cuantificación se realizó en un cromatógrafo de gases Agilent 6890N con in-

CUADRO IV. MÉTODO PARA CUANTIFICACIÓN DE PLAGUICIDAS EN AGUA Y SEDIMENTOS

Plaguicida	Método		Solvente para extracción		Método de cuantificación y verificación
	Agua	Sedimentos	Agua	Sedimentos	
Atrazina y metabolitos	AOAC-991.07 ^a	AOAC-970.52 ^b	Cloruro de metileno a pH 7	Hexano:Acetona (1:1) a pH 7	Cromatógrafo de gases equipado con detector selectivo de masas. Columna DB5 30m x 0.25mm x 0.25 mm.
Organoclorados	EPA-8081A ^c		Cloruro de metileno a pH 7	Hexano:Acetona (1:1) a pH 7	Cromatógrafo de gases con detector de captura de electrones (ECD); columna DB5 30 m x 0.32 mm x 0.25 mm (cuantificación) y DB1 30 m X 0,32 mm X 0,25 mm (verificación).
2,4-D	EPA-515.4 ^d		Hexano:Metil terbutil éter (9:1) a pH 2	Hexano:Metil terbutil éter (9:1) a pH 2	Cromatógrafo de gases equipado con detector selectivo de masas; columna DB5 30m x 0.25mm x 0.25 mm.

^aAOAC (2000a)
^bAOAC (2000b)
^cUSEPA (1996a)
^dUSEPA (1996b)

yector automático, la descripción del trabajo de los cromatógrafos se encuentra en el **cuadro IV**.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inventario de uso de plaguicidas

En las zonas agrícolas se siembran diferentes cultivos (**Fig. 3**). En el DR 063 predominan los cultivos de maíz, frijol y garbanzo, mientras que en la

ZAR, predominan los cultivos de café, pasto, maíz y mango. Las superficies de siembra de los diferentes cultivos se presentan en la misma **figura 3** y en el **cuadro V**. Se observa que la superficie total sembrada en el DR 063 fue de 166911 ha mientras que en la ZAR, fue de 173 539.

La información recopilada sobre el uso de plaguicidas reveló que las sustancias utilizadas provienen de 25 grupos químicos. Asimismo, en el periodo 2007-2008, se aplicaron un total de 707 toneladas

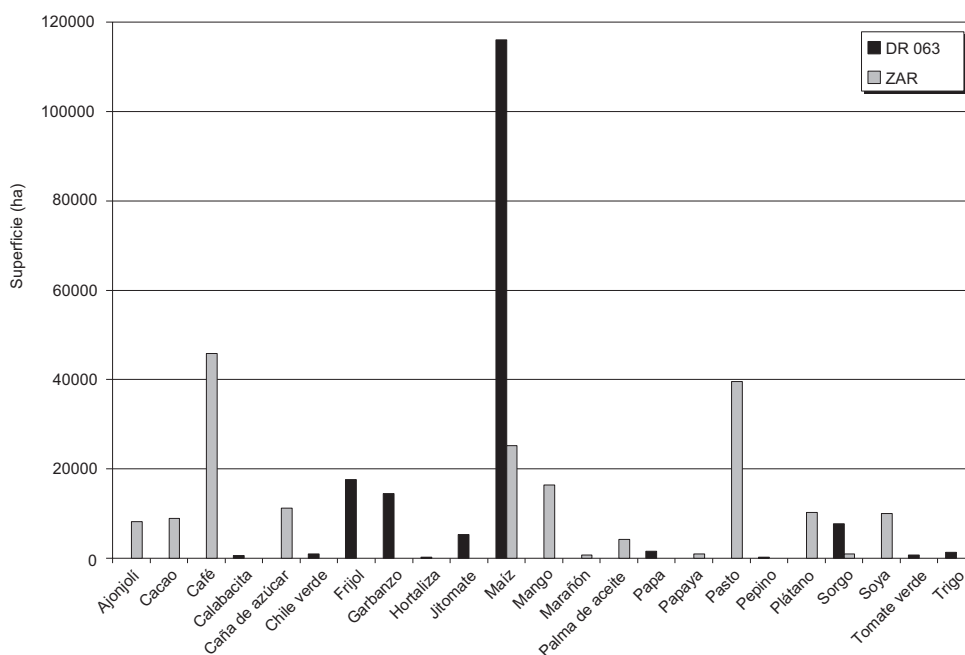


Fig. 3. Superficies de siembra en las zonas de estudio (2007-2008)

CUADRO V. ÁREAS Y PLAGUICIDAS APLICADOS POR TIPO DE CULTIVO

Cultivo	Grupo químico	Ingrediente activo	Superficie (ha)		Cantidad aplicada (t año ⁻¹)	
			DR 063	ZAR	DR 063	ZAR
Cacao	Organofosforado	Paratión	0	8 867	0	7.32
Café	Bipiridilo	Paraquat	0	45 813	0	22.32
	Compuestos de cobre	Oxicloruro de cobre			0	131.94
	Fosfonometilglicina	Glifosato			0	33.23
Calabacita	Organofosforado	Metamidofós	595	0	1.23	0
Caña de azúcar	Bipiridilo	Paraquat	0	11 249	0	0.88
	Carbamato	Carbofurán			0	11.25
	Clorofenoxi	2,4-D			0	0.0032
	Derivado de la urea	Diurón			0	5.46
	Fosfonometilglicina	Glifosato			0	3.18
	Triazina	Atrazina y ametrina			0	14.17
Cebolla	Piretroide	Zeta cipermetrina	3	0	0.0002	0
Chile verde	Pentaciclina	Abamectina	944	0	0.04	0
	Triazina	Cyromazina			0.29	0
Frijol	Benzimidazol	Benomilo	17 590	0	6.38	0
	Piretroide	Lambda cyalotrina			0.22	0
	Antibiótico	Oxitetraciclina			1.52	0
	Organofosforado	Clorpirifos etílico			12.67	0
Garbanzo	Organofosforado	Clorpirifos etílico	14 523	0	11.24	0
Hortalizas	Organofosforado	Metamidofós	296	0	0.61	0
	Triazina	Pymetrozine			0.24	0
Jitomate	Pentaciclina	Abamectina	5 247	0	0.22	0
	Triazina	Cyromazina			1.61	0
Maíz	Bipiridilo	Paraquat	116 055	25 160	0	8.35
	Carbamato	Carbofurán			0	5.96
	Clorofenoxi	2,4-D			245.22	0.0062
	Fosfonometilglicina	Glifosato			0	5.21
	Organofosforado	Clorpirifós etílico			133.68	2.01
	Piretroide	Cyalotrina			0	22.98
	Sulfonil urea	Nicosolfurón			0	0.18
	Sal de acido benzóico	Dicamba			267.84	0
	Triazina	Atrazina			1.12	8.21
Mango	Benzimidazol	Benomilo	0	16 442	0	2.06
	Carboxamida	Captán			0	2.74
	Compuestos de cobre	Oxicloruro de cobre			0	5.26
	Ditiocarbamato	Mancozeb			0	4.38
	Inorgánico	Azufre elemental			0	12.74
	Organofosforado	Malatión			0	16.91
	Piretroide	Zeta cipermetrina			0	7.23
Melón	Organofosforado	Metamidofós	79	0	0.04	0
Palma de aceite	Bipiridilo	Paraquat	0	4 203	0	0.74
Papa	Bipiridilo	Paraquat	1 616	0	2.87	0
Papaya	Bipiridilo	Paraquat	0	968	0	2.36
	Ditiocarbamato	Mancozeb			0	3.10

CUADRO V. CONTINUACIÓN

Cultivo	Grupo químico	Ingrediente activo	Superficie (ha)		Cantidad aplicada (t año ⁻¹)	
			DR 063	ZAR	DR 063	ZAR
Pastos	Clorofenoxi	2,4-D	0	39 537	0	27.87
	Organofosforado	Clorpirifós etílico			0	18.98
	Piridina	Picloram			0	4.84
Plátano	Aromático policlorado	Clorotalonil	0	10 245	0	35.15
	Carbamato	Carbofurán			0	1.54
	Ditiocarbamato	Mancozeb			0	28.10
	Pirimidina	Azoxistrobin			0	0.28
	Triazol	Difenoconazole			0	0.49
Sandía	Organofosforado	Metamidofós	107	0	0.03	0
Sorgo	Bipiridilo	Paraquat	7 753	986	0	1.44
	Fosfometilglicina	Glifosato			0	1.89
	Organofosforado	Metamidofós			2.02	0
	Piretroide	Zeta cipermetrina			0.58	0
	Piridinoxi	Fluroxipir meptílico			2.24	0
	Sal de ácido benzóico	Dicamba			8.95	0
	Triazina	Atrazina			0	3.32
Soya	Bipiridilo	Paraquat	0	10 069	0	2.72
	Carboxamida	Captán			0	15.77
	Fenoxi	Fluazifop butílico			0	1.20
	Fosfometilglicina	Glifosato			0	14.61
	Imidazolinona	Imazetafir			0	1.06
	Nitrobenzamida	Fomesafén			0	6.85
	Piretroide	Zeta cipermetrina			0	14.65
Tomate verde	Pentaciclina	Abamectina	719	0	0.03	0
	Triazina	Cyromazina			0.22	0
Trigo	Sal de ácido benzóico	Dicamba	1 384	0	1.60	0
Total			166 911	173 539	707	521

de plaguicidas en el DR 063, donde típicamente se tienen dos ciclos agrícolas, mientras que en la ZAR, se aplicaron 521 toneladas (**Cuadro V**).

El grupo de sustancias más utilizado en el DR 063 fue el organofosforado (**Fig. 4**), que se aplican a cultivos de calabacita, frijol, garbanzo, hortalizas, maíz, melón, sandía y sorgo. El segundo grupo más utilizado en esta región, fue la sal de ácido benzóico, que se aplican a cultivos de maíz, sorgo y trigo. El tercer lugar lo ocupa el grupo clorofenoxi, que se aplica a cultivos de maíz. El uso de atrazina en esta zona agrícola ha disminuido a partir del 2002 y se ha sustituido por otros herbicidas (Vctor Hernández, Lof Agro de Guasave S.A. de C.V. 2008, comunicación personal).

En la ZAR, el grupo de sustancias más utilizado fue el oxiclورو de cobre (**Fig. 4**), que se aplica a cultivos de café y mango. El segundo grupo fue fosfometilglicina, que se aplica a cultivos de café,

maíz, soya, caña de azúcar y sorgo. El tercer lugar lo ocupa el grupo clorofenoxi, que se aplica a cultivos de maíz, caña de azúcar y pastos. Se observa que los herbicidas del grupo triazínico siguen empleándose en mayor grado en la ZAR que en el DR 063.

En el **cuadro VI**, se presentan las propiedades de los plaguicidas utilizados en las zonas de estudio. Los plaguicidas representan mayor peligro para transportarse y contaminar a los cuerpos de agua cuando tienen bajo coeficiente de distribución octanol-agua (K_{oc}) o constantes de adsorción (K_d), cuando son más persistentes ($t_{1/2}$ alto) y cuando su categoría toxicológica es más baja. Las categorías toxicológicas se clasifican en I (extremadamente tóxicos), II (altamente tóxicos), III (moderadamente tóxicos) y IV (ligeramente tóxicos).

A continuación se describen las propiedades de los plaguicidas de mayor uso en las zonas agrícolas

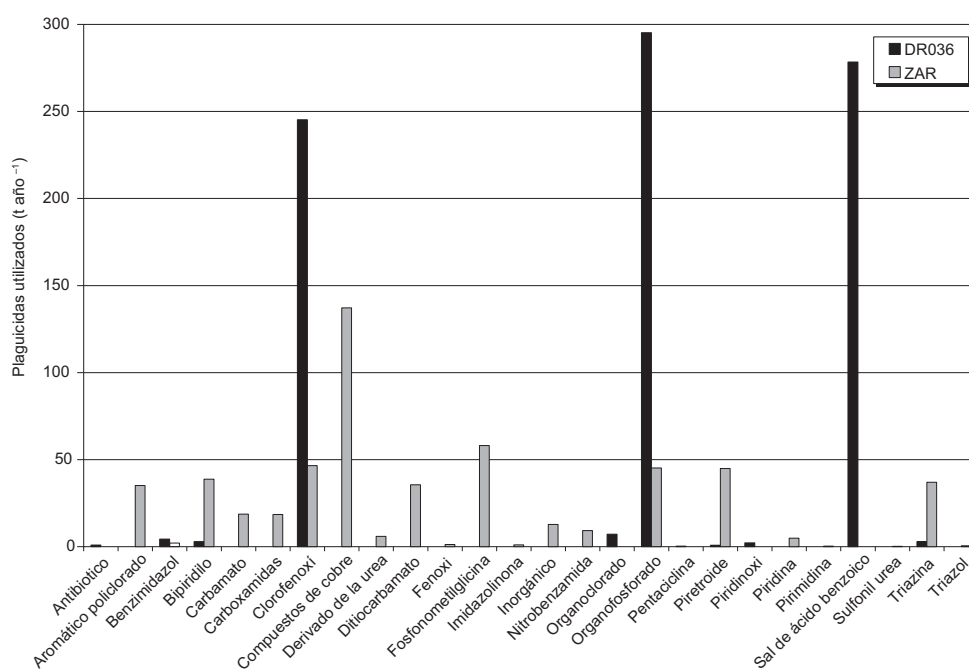


Fig. 4. Plaguicidas utilizados en las zonas de estudio (2007-2008)

CUADRO VI. PROPIEDADES DE LOS PLAGUICIDAS UTILIZADOS EN LAS ZONAS AGRÍCOLAS. FUENTE: MONTGOMERY (1997) CUANDO NO SE INDICA OTRA REFERENCIA

Grupo	K _{OC} (mL g ⁻¹)	K _d (mL g ⁻¹)	t _{1/2} (d)	Categoría toxicológica ^a
Antibiótico	102 600	Ind	21 - 70	IV
Aromático policlorados	980	25	45 - 90	IV
Benzimidazol	1900	Ind	0.80	IV
Bipiridilo	0.42	0.177 - 0.843	485 - 3 000	II
Carbamatos	10 - 160	0.07 - 8.74	29 ^b	II
Carboxamidas	97 ^b	Ind	14	IV
Clorofenoxi	8 - 614	0.05 - 79.43	4 - 29	III
Compuestos de cobre	Ind	Ind	Ind	IV
Derivados de urea	15 - 1 377	0.32 - 244.34	365	IV
Ditiocarbamato	998 ^b	Ind	1 - 7	IV
Fenoxi	3 000 ^b	Ind	112	IV
Fosfonometilglicina	554 - 33 967	8 - 1 621	14 - 22	III
Imidazolinona	52 ^b	Ind	90 ^b	IV
Inorgánico	1 903	Ind	30 ^b	IV
Nitrobenzamida	50 ^b	Ind	7 - 42	III
Organofosforados	240 - 4 527	0.45 - 66.92	1 - 30	III
Pentaciclina	5 638	53.1	14 - 60	I
Piretroide	66 - 13 198	2 - 260	7 - 28	III
Piridinoxi	6 200 - 43 000	Ind	14 - 56	IV
Piridina	35 ^b	Ind	21 - 308	IV
Pirimidina	482 ^b	Ind	70 ^b	IV
Sal de ácido benzóico	1.28 - 1.88	0.03 - 0.11	6	IV
Sulfonil urea	21 ^b	Ind	35	IV
Triazina	120 - 959	0.88 - 18.23	277 - 9 242 ^c	III
Triazol	3 760	Ind	85 ^b	IV

^aWHO (2009)

^bUniversity of Hertfordshire (2007)

^cGonzález-Márquez y Hansen (2009)

Ind = información no disponible

y se concluye sobre los peligros de contaminar a los cuerpos de agua. Se observa que los grupos organofosforados y sal de ácido benzóico son de baja persistencia con vidas medias cortas, tienden a adsorberse y acumularse en materia orgánica, por lo que se espera que presenten poco peligro de contaminar a los cuerpos de agua. Estos grupos de sustancias se clasifican entre ligeros y moderadamente tóxicos. Los plaguicidas clorofenoxi son de baja persistencia con vidas medias cortas, sin embargo se adsorben y se acumulan poco, por lo que se espera que tengan más movilidad en los suelos y el peligro de contaminar a los cuerpos de agua es mayor. Estas sustancias se clasifican como moderadamente tóxicas.

Los grupos bupiridilos y derivados de urea son persistentes, con vidas medias largas, tienen una alta afinidad por los suelos y son de baja movilidad. Los bupiridilos se clasifican como altamente tóxicos y los derivados de urea, como ligeramente tóxicos. Los plaguicidas triazínicos tienen las propiedades de ser persistentes con vidas medias largas, se adsorben poco y son de alta movilidad, por lo que representan un peligro si contaminan a los cuerpos de agua. Las

sustancias de este grupo se clasifican como moderadamente tóxicas.

Aún cuando el inventario del uso de plaguicidas demostró que los plaguicidas organoclorados no se aplican en la actualidad, en este estudio se analizaron por ser persistentes con vidas medias largas, se adsorben en materia orgánica y, por lo general, tienen baja movilidad. Además, estos plaguicidas pueden persistir en la atmósfera por largos periodos y viajar grandes distancias antes de precipitar, por lo que pueden contaminar a cuerpos de agua lejanos de su aplicación (Scholtz y Bidleman 2007). De acuerdo a su clasificación toxicológica los plaguicidas de este grupo se consideran altamente tóxicos.

Muestreo y análisis de plaguicidas en agua y sedimentos

Los resultados de cuantificación de plaguicidas en las muestras de agua de ambas zonas agrícolas se presentan en el **cuadro VII**, donde se compararon las concentraciones obtenidas en agua superficial con los límites de los criterios ecológicos de calidad del agua para protección de la vida acuática (DOF 1989). Los

CUADRO VII. PLAGUICIDAS CUANTIFICADOS EN MUESTRAS DE AGUA Y COMPARACIÓN CON LÍMITES ESTABLECIDOS

Plaguicida	Límite ($\mu\text{g L}^{-1}$) ^a		Concentración ($\mu\text{g L}^{-1}$)		
	Fuente de abastecimiento	Protección de la vida acuática	DR 063	ZAR	
Atrazina	2 ^b	1.8 ^c	nd (< 0.009)	Sitio 10 Río	4.62
Desetilatrazina	sl	sl	nd (< 0.008)	Sitio 11 Río	15.01
				Sitio 4 Dren	14.73
				Sitio 10 Río	30.23
				Sitio 11 Río	21.51
				Sitio 22 Noria	21.26
Clordano*	3	2	nd (< 0.01)	Sitio 23 Noria	6.23
				Sitio 14 Zona costera	0.02
DDD	0.0002	10	nd (< 0.01)		0.02
DDE	sl	10	nd (< 0.01)		0.03
DDT*	1	1	nd (< 0.01)		nd (< 0.01)
Aldrín*	0.03	3	nd (< 0.01)		nd (< 0.01)
Desisopropilatrazina	sl	sl	nd (< 0.012)		nd (< 0.012)
Dieldrín*	0.0007	2	nd (< 0.01)		nd (< 0.01)
Heptacloro	0.1	0.5	nd (< 0.01)		nd (< 0.01)
Hexaclorobenceno*	0.01	sl	nd (< 0.01)		nd (< 0.01)
Lindano*	3	2	nd (< 0.01)		nd (< 0.01)
Metoxicloro	30	sl	nd (< 0.5)		nd (< 0.5)
2,4-D	100	sl	nd (< 1.32)		nd (< 1.32)

^aDOF (1989)
^bWHO (2008)
^cCCME (2003)
 *COP (UNEP 2007)
 sl = sin límite
 nd = no detectado

resultados para pozos y norias se compararon con los límites para agua como fuente de abastecimiento de los mismos criterios ecológicos (DOF 1989). Las sustancias que no se mencionan en dichos criterios se compararon con los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (WHO 2008) para consumo humano o por la Guía canadiense de Calidad del Agua para Protección de la Vida Acuática (CCEM 2003) (**Cuadro VII**).

El análisis de plaguicidas en muestras de agua demostró la presencia de plaguicidas en agua de ríos en la ZAR, donde se encontraron concentraciones de atrazina y un metabolito, desetilatrastina, que exceden los límites de la Guía canadiense (CCEM 2003). Asimismo, en tres norias se encontró el metabolito desetilatrastina en concentraciones que excedieron el límite establecido por la Organización Mundial de la Salud (WHO 2008) para agua de uso y consumo humano. Es importante mencionar que México no establece límite alguno para este herbicida y sus metabolitos para agua en los criterios ecológicos (DOF 1989) ni límite para agua de uso y consumo humano (DOF 2000).

En una laguna costera de la ZAR, se encontraron clordano, DDD y DDE. El DDD rebasó el límite para protección de la vida acuática en agua dulce, mientras que las otras sustancias estuvieron por debajo de sus respectivos límites (DOF 1989). No se detectaron los demás plaguicidas analizados.

En muestras de sedimentos se encontraron plaguicidas en ambas zonas agrícolas (**Cuadro VIII**). En el DR 063 se hallaron DDT y DDD en tres sitios, DDE en seis sitios y lindano en un sitio; las concentraciones cuantificadas fueron inferiores a los límites basales, ISQG (CCME 2003). En la ZAR se encontraron DDD y DDE en una zona costera; las concentraciones excedieron los límites basales para protección de la vida acuática (CCME 2003).

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo proporcionan información del uso de plaguicidas en dos zonas agrícolas. En las zonas de estudio se cultivan diversos productos, siendo maíz y sorgo los que se siembran

CUADRO VIII. PLAGUICIDAS CUANTIFICADOS EN MUESTRAS DE SEDIMENTOS Y COMPARACIÓN CON LÍMITES ESTABLECIDOS

Plaguicida	Límite ^a ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Concentración ($\mu\text{g kg}^{-1}$)		
		DR 063		ZAR
Atrazina	0.2	nd (< 0.10)		nd (< 0.10)
Desetilatrastina	sl	nd (< 5.16)		nd (< 5.16)
Desisopropilatrastina	sl	nd (< 11.08)		nd (< 11.08)
Aldrín	sl	nd (< 0.4)		nd (< 0.4)
Clordano	4.5	nd (< 0.4)		nd (< 0.4)
Dieldrín	2.85	nd (< 0.4)		nd (< 0.4)
Epóxido de Heptacloro	sl	nd (< 0.4)		nd (< 0.4)
Hexaclorobenceno	sl	nd (< 3)		nd (< 3)
Heptacloro	0.6	nd (< 0.4)		nd (< 0.4)
Metoxicloro	sl	nd (< 10)		nd (< 10)
2,4-D	sl	nd (< 20.8)		nd (< 20.8)
DDT	1.19	Sitio 1 Canal de riego	0.002	nd (< 0.001)
		Sitio 2 Canal de riego	0.010	
		Sitio 3 Canal de riego	0.001	
DDD	3.54	Sitio 3 Canal de riego	0.001	Sitio 13 Zona costera
		Sitio 4 Dren agrícola	0.002	
		Sitio 5 Dren agrícola	0.004	
DDE	1.42	Sitio 1 Canal de riego	0.051	4.29
		Sitio 2 Canal de riego	0.001	
		Sitio 3 Canal de riego	0.001	
		Sitio 4 Dren agrícola	0.042	
		Sitio 5 Dren agrícola	0.045	
Lindano	0.94	Sitio 9 Río Sinaloa	0.050	nd (< 0.001)
		Sitio 2 Canal de riego	0.001	

sl = sin límite

^aCCME (2003)

nd = no detectado

en ambas regiones. Por la heterogeneidad de cultivos se utilizan diferentes grupos de plaguicidas; entre los que se aplican en ambas zonas son los grupos que pertenecen a organofosforados, clorofenoxis, bipiridilos y triazínicos. A pesar de que las extensiones de ambas zonas agrícolas son semejantes, difieren los cultivos y las frecuencias de cosecha por lo que el uso total de plaguicidas en el DR 063 fue mayor que en la ZAR.

Mediante muestreo y análisis de agua y sedimentos, se evaluó la afectación ambiental por el uso de estas sustancias. La presencia de plaguicidas en concentraciones superiores a los límites establecidos, sugiere la necesidad de realizar monitoreos de vigilancia en los cuerpos de agua. Para ello se recomienda implementar programas de monitoreo dirigidos a la protección de la salud humana y el ambiente. Asimismo, se recomienda restringir el uso de atrazina en la cercanía de norias y otras fuentes de abastecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por el apoyo brindado mediante un proyecto interno de investigación, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por los apoyos económicos a través de beca de doctorado a AHA y beca de investigador nacional a AMH. Se agradece también al Dr. Luis Carlos González-Márquez por el apoyo en los muestreos en campo y a la M.I. Yodina E. Díaz Vidal por la revisión del manuscrito. Al Posgrado de Ciencias de la Tierra de la UNAM por el apoyo financiero para realizar un muestreo en el DR-063, Guasave, Sinaloa.

REFERENCIAS

- Afferden van M., Hansen A.M. y Fuller C.C. (2005). Reconstrucción de la deposición atmosférica histórica de DDT en la laguna de Zempoala en el centro de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. 20, 71-83.
- Alegria H.A., Bidleman T.F. y Salvador-Figueroa M. (2006). Organochlorine pesticides in the ambient air of Chiapas, Mexico. *Environ. Pollut.* 140, 483-491.
- AOAC (2000a). Method 991.07. *Nitrogen and phosphorus containing pesticides in finished drinking water by gas chromatography*. Association of Analytical Communities. Gaithersburg, Maryland.
- AOAC (2000b). Method 970.52: *Organochlorine and organophosphorus pesticide residues by gas chromatography*. Association of Analytical Communities. Gaithersburg, Maryland.
- Barakat A.O., Kim M., Qian Y. y Wade T.L. (2002). Organochlorine pesticides and PCBs residues in sediments of Alexandria Harbour, Egypt. *Mar. Pollut. Bull.* 44, 1421-1434.
- Benítez J.A. y Bárcenas C. (1996). Patrones de uso de los plaguicidas en la zona costera del Golfo de México. En: *Golfo de México contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias*. (A.V. Botello, G.J.L. Rojas, J. Benítez y L.D. Zarate, Eds.). EPOMEX, Serie Científica 5, Campeche, pp. 155-167.
- Bester K. y Hühnerfuss H. (1996). Triazine herbicide concentrations in the German Wadden Sea, *Chemosphere* 32, 1919-1928.
- Caldas E.D, Coelho R.L.C., Souza K.R. y Siba S.C. (1999). Organochlorine pesticides in water, sediment, and fish of Paranoá Lake of Brasilia, Brazil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 62, 199-206.
- CCME (2003). The Canadian Environmental Quality Guidelines, Report PN1299, Update 3.2. Canadian Council of Ministers of the Environment. Winnipeg, Manitoba, 5 pp.
- Chen J., Liu C., Yang Z. y Wang J. (2008). Residues and characteristics of organochlorine pesticides in the surface water in the suburb of Beijing. *Earth Sci. Front.* 15, 242-247.
- Cheng H.H. (1990). Pesticides in the soil environments - An overview. En: *Pesticides in the soil environment: processes, impacts, and modelling*. (H. Cheng, Ed.). Soil Science Society of America, book series No. 2, Madison, WI, pp. 1-5.
- CICLOPLAFEST (2005). *Catálogo oficial de plaguicidas*. Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas. México D.F. 483 pp.
- CONAGUA (2008). *Estadísticas del agua en México*. Actualizado al mes de agosto de 2009. Comisión Nacional del Agua. México, D.F. CD-ROM.
- Coupe R.H., Manning M.A., Foreman W.T., Goolsby D.A. y Majewski, M.S. (2000). Occurrence of pesticides in rain and air in urban and agricultural areas of Mississippi, April-September, 1995. *Sci. Total Environ.* 248, 227-240.
- Daniels W.M., House W.A., Rae J.E. y Parker A. (2000). The distribution of micro-organic contaminants in river bed sediment cores. *Sci. Total Environ.* 253, 81-92.
- DOF (1989). Criterios ecológicos de calidad del agua. Comisión Nacional del Agua. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. pp. 1-9.
- DOF (1991). Relación de plaguicidas prohibidos para su importación, fabricación, formulación, comerciali-

- zación y uso en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. pp. 1-9.
- DOF (2000). Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. pp. 1-21.
- Dubus I.G., Hollis J.M. y Brown C.D. (2000). Pesticides in rainfall in Europe. *Environ. Pollut.* 110, 331-344.
- European Parliament (1998). Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. *Official Journal of the European Communities*, L 330/32, pp. 32-54.
- Fytianos K., Meesters R.J.W., Schröder H.Fr., Gouliarmou B. y Gantidis N. (2006). Concentration and distribution of organochlorine pesticides in surface water and sediments in Lake Volvi (northern Greece). *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 86, 109-118.
- Gilliom R.J. (2007). Pesticides in U.S. streams and groundwater. *Environ. Sci. Technol.* 41, 3409-3414.
- Golfinopoulos S.K., Nikolaou A.D., Kostopoulou M.N., Xilourgidis N.K., Vagi M.C. y Lekkas, D.T. (2003). Organochlorine pesticides in the surface waters of Northern Greece. *Chemosphere* 50, 507-16.
- González-Márquez L.C. y Hansen A.M. (2009). Adsorción y mineralización de atrazina y relación con parámetros de suelos del DR 063 Guasave, Sinaloa. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 26, 587-599.
- Goolsby D.A., Thurman E.M., Pomes M.L., Meyer M.T. y Battaglin W.A. (1997). Herbicides and their metabolites in rainfall: Origin, transport, and deposition patterns across the midwestern and northeastern United States, 1990-1991. *Environ. Sci. Technol.* 31, 1325-1333.
- Gutiérrez G.E., Ríos L.M., Muñoz G.F. y Villaescusa J.C. (1998). Chlorinated hydrocarbons in marine sediments of the Baja California (Mexico) - California (USA) border zone. *Mar. Pollut. Bull.* 36, 27-31.
- Hernández-Romero A.H., Tovilla-Hernández C., Malo E.A. y Bello-Mendoza R. (2004). Water quality and presence of pesticides in a tropical coastal wetland in southern Mexico. *Mar. Pollut. Bull.* 48, 1130-1141.
- Hoai P.M., Ngoc N.T., Minh N.H., Viet P.H., Berg M., Alder A.C. y Giger W. (2010). Recent levels of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in sediments of the sewer system in Hanoi, Vietnam. *Environ. Pollut.* 158, 913-920.
- Hong S.H., Kim U.H., Shim W.J., Oh J.R., Viet P.H. y Park P.S. (2008). Persistent organochlorine residues in estuarine and marine sediments from Ha Long Bay, Hai Phong Bay, and Ba Lat Estuary, Vietnam. *Chemosphere* 72, 1193-1202.
- Kishida M., Imamura K., Maeda Y., Lan T.T.N., Thao N.T.P. y Viet P.H. (2007). Distribution of persistent organic pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment samples from Vietnam. *J. Health Sci.* 53, 291-301.
- Montgomery J.H. (1997). *Agrochemicals desk reference*. 2ª ed. Lewis Publishers, Boca Raton. Nueva York. 656 pp.
- OEIDRUS (2008). Anuario de estadística básica agrícola. Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable [en línea]. <http://www.oeidrus-portal.gob.mx/01/08/2009>.
- Ongley E.D. (1996). *Control of water pollution from agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 55. Roma, Italia, 111 pp.
- Osuna I., Galindo J.G. y Riva M.C. (1998). Efectos toxicológicos de plaguicidas organofosforados y organoclorados sobre camarones del género *Penaeus* sp en Sinaloa, México. *Boletín Intexter del Instituto de Investigación Textil y de Cooperación Industrial* 114, 61-70.
- Pereira W.E. y Hostettler F.D. (1993). Nonpoint source contamination of the Mississippi River and its tributaries by herbicides. *Environ. Sci. Technol.* 27, 1542-1552.
- Ramírez Q.Y., López G.E., Barceló Q.I.D. y Domínguez E.Z.J. (2008). Caracterización de triazinas en la cuenca alta del Río Lerma en Estado de México, México. *Memorias. XXXI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Santiago de Chile. 12 al 15 de octubre, 2008. CD-ROM.
- Rueda L.Q., Botello A.V. y Díaz G.G. (1997). Presencia de plaguicidas organoclorados en dos sistemas lagunares del estado de Chiapas, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 13, 55-61.
- SENER (2007). *Anuario estadístico de la industria petroquímica*. Secretaría de Energía. México, D.F. 289 pp.
- Scholtz M.T. y Bidleman T.F. (2007). Modelling of the long-term fate of pesticide residues in agricultural soils and their surface exchange with the atmosphere: part II. Projected long-term fate of pesticide residues. *Sci. Total Environ.* 377, 61-80.
- Thurman E.M., Bastian K.C. y Mollhagen T. (2000). Occurrence of cotton herbicides and insecticides in playa lakes of high plains of West Texas. *Sci. Total Environ.* 248, 189-200.
- UNEP (2007). Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes. United Nations Environment Programme [en línea]. http://www.pops.int/documents/convtext/convtext_sp.pdf. 21/11/2009.
- University of Hertfordshire (2007). Footprint. Base de datos de las propiedades de plaguicidas [en línea]. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/es>. 03/09/2009.
- USEPA (1996a). Method 8081A. *Organochlorine pesticides by gas chromatography*. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio. 44 pp.

- USEPA (1996b). Method 8151A. *Chlorinated herbicides by gas chromatography using methylation or pentafluorobenzoylation derivatization*. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio. 31 pp.
- USEPA (2005). Method 527. *Determination of selected pesticides and flame retardants in drinking water by solid phase extraction and capillary column gas chromatography/mass spectrometry*. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio. 44 pp.
- USEPA (2010). Types of Pesticides. United States Environmental Protection Agency [en línea]. <http://www.epa.gov/pesticides/about/types.htm>. 12/03/2010.
- WHO (2008). *Guidelines for drinking-water quality*. 3ª ed. World Health Organization. Ginebra, Suiza. 515 pp.
- WHO (2009). *The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification: 2009*. World Health Organization. Stuttgart, Alemania. 78 pp.
- Wong F., Alegria H.A., Jantunen L.M., Bidleman T.F., Salvador-Figueroa M., Gold-Bouchot G., Ceja-Moreno V., Waliszewski S.M. y Infanzon R. (2008). Organochlorine pesticides in soils and air of Southern Mexico: Chemical profiles and potential for soil emissions. *Atmos. Environ.* 42, 7737-7745.