

© 2022 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 25: 1-13, 2022.

<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>

Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional

Leticia de Jesús Velázquez-Chávez¹, Ixchel Abby Ortiz-Sánchez²,
Jorge Armando Chávez-Simental^{3*}, Gerardo Antonio Pámanes-Carrasco⁴,
Artemio Carrillo-Parra³ y Martín Emilio Pereda-Solís⁵

¹Posgrado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Juárez del Estado de Durango, Río Papaloapan S/N Col. Valle del Sur, Durango 34120, Dgo., México. ³Instituto de Silvicultura e industria de la Madera de la Universidad Juárez del Estado de Durango, Área de Ecología y Cambio Climático, Durango 34120, Dgo., México. ⁴Cátedras CONACYT, Área de Ecología y Cambio Climático. ⁵Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango, Área de Ecología y Fauna Silvestre, Durango 34307, Dgo., México.

²Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana. Departamento de Análisis de Suelos, Durango 34371, Dgo., México. E-mail: *jorge.chavez@ujed.mx

RESUMEN

Los contaminantes del agua y el suelo son un tema polémico por los problemas que ocasionan a la agricultura moderna. El crecimiento de la población ha provocado la expansión de las áreas de cultivo, sobreexplotación de los recursos naturales, así como problemas de disponibilidad y degradación de los recursos. Esta situación se agrava debido al manejo inapropiado de los residuos industriales, de los pesticidas y los fertilizantes que contaminan con elementos orgánicos e inorgánicos persistiendo en el ambiente y dispersándose por medio de los procesos de bioacumulación en especies animales y vegetales, lo que contribuye al desequilibrio de los ecosistemas. Este artículo de revisión presenta un panorama general de los principales factores de contaminación que afectan los recursos naturales y en específico, la situación que enfrenta la agricultura en México y otros países por causa del transporte de compuestos químicos a los cultivos.

Palabras clave: contaminación del agua, contaminación del suelo, agricultura, recursos naturales, metales y metaloides.

Influence of water and soil pollution in national and international agricultural development

ABSTRACT

Water and soil pollutants are a controversial issue due to the problems they cause to modern agriculture. Population growth has caused the expansion of cultivated areas, overexploitation of natural resources, as well as problems of availability and degradation of resources. This situation is aggravated due to the inappropriate management of industrial waste, pesticides, and fertilizers which contaminate with organic and inorganic elements by persisting in the environment and dispersing through bioaccumulation processes in animal and plant species, contributing to the imbalance of the ecosystems. This review article presents an overview of the main pollution factors that contaminate natural resources and specifically, the situation facing agriculture in Mexico and other countries due to the transport of chemical compounds to crops.

Key words: water pollution, soil pollution, agriculture, natural resources, metals and metalloids.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se han realizado diversos estudios relacionados con la contaminación de los recursos naturales a escala nacional (Hernández-Ramírez *et al.*, 2019) e internacional (Ahmed, Matsumoto, Ozaki, Thinh & Kurosawa, 2019; Gyamfi, Appiah-Adjei & Amaning-Adjei, 2019). Específicamente, el estudio del agua y el suelo resulta de gran interés debido a la dispersión, bioacumulación y transporte de los contaminantes que se albergan en ellos (Manoj, Thirumurugan & Elango, 2017).

Estos contaminantes son el resultado de las actividades antropogénicas como la quema de combustibles fósiles, la minería, el riego con aguas residuales y la reutilización de lodos remanentes (Su *et al.*, 2010; Zhang, Li, Zhou, Dou & Cai, 2018). En consecuencia, los ecosistemas más afectados son los ríos y los arroyos (Rodríguez-Téllez, Domínguez-Calleros, Pompa-García, Quiroz-Arratia & Pérez-López, 2012), fuentes importantes para el consumo, el riego y el desarrollo sustentable (Jawad *et al.*, 2019) que, sin embargo, son utilizados como punto final de efluentes industriales, principalmente en zonas urbanas (Bhuiyan, Dampare, Islam & Suzuki, 2015). Otros factores perjudiciales son el aumento de las labores agrícolas y el uso excesivo de pesticidas y fertilizantes (Zhang *et al.*, 2018). Esto lo confirman Azpilcueta-Pérez, Pedroza-Sandoval, Sánchez-Cohen, Salcedo-Jacobo & Trejo-Calzada (2017) para la Comarca Lagunera, en México, región donde existe un uso intensivo del suelo y escasez de agua. Estos autores reportan concentraciones elevadas de metales pesados y sales disueltas por influencia de la temporada de muestreo en las localidades agrícolas de la región.

Aunado a lo anterior, es importante considerar el recurso natural del suelo y sus sedimentos, como depósitos donde se acumulan contaminantes tóxicos de lenta degradación por el amplio rango de su transporte (Adeyinka, Moodley, Birungi & Ndungu, 2019), a través de los ríos y los suelos, como lo afirman los estudios de Sánchez, Álvarez, Pacheco, Carrillo & González (2016); Serre & Karuppannan (2018) y Wijesiri *et al.* (2019).

Por ello, los estudios predictivos sobre el uso y el manejo del agua y del suelo, así como las medidas de remediación para mejorar su calidad, permitirán conservar un equilibrio entre los ecosistemas. De igual forma, es importante evaluar el grado de contaminación y sus efectos en los mantos acuíferos y terrestres, derivados de la actividad agrícola. Es así, que el objetivo de esta revisión es presentar una síntesis del panorama a nivel nacional e internacional sobre los principales factores de contaminación del agua y el suelo, y su impacto en la agricultura por el transporte y bioacumulación de contaminantes en los cultivos.

CALIDAD DEL AGUA

Disponibilidad del agua

El agua tiene un alto valor como recurso natural, ya que actividades como la producción de alimentos, agricultura, procesos industriales y uso doméstico dependen de este líquido (Gyamfi *et al.*, 2019). Aunque el agua cubre cerca del 71% de la superficie total de la Tierra, es un recurso muy limitado, ya que sólo el 2.5% es agua dulce (Hasan, Shahriar & Ullah, 2019), de la que el 20% es subterránea (Talabi & Kayode, 2019), misma que representa una parte importante en el ciclo hidrológico.

A pesar de la escasez del agua dulce, a nivel mundial cerca del 40% de los cultivos de consumo son irrigados con esta (Islam *et al.*, 2017). La actividad agrícola representa casi un 70% de la extracción total de este recurso y al aumentar la población, también aumenta el grado de presión sobre el mismo. En la Figura 1 se muestran los países con mayor extracción de agua anualmente. México ocupa el séptimo lugar a nivel mundial.

Por consiguiente, la disponibilidad del agua por habitante es diferente entre los países y va en decremento. De acuerdo al Sistema de Información Aquastat (2018), de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés: Food and Agriculture Organization of the United Nations), entre los años 2012 y 2017, la disponibilidad per cápita se ha reducido a nivel mundial (Figura 2), principalmente en países como Canadá (3, 911 m³/hab/año), Colombia (2, 242 m³/hab/año) y Nueva Zelanda (3, 701 m³/hab/año) y en menor proporción, Estados Unidos (336 m³/hab/año), Afganistán (289 m³/hab/año) y México (247 m³/hab/año). En el caso particular de México, la CONAGUA estima que para el año 2030 el agua renovable per cápita a nivel nacional se reducirá, siendo las regiones hidrológico-administrativas del Valle de México, el Río Bravo y la península de Baja California las más afectadas con 134 m³/hab/año, 894 m³/hab/año y 881 m³/hab/año, respectivamente (CONAGUA, 2018).

Propiedades fisicoquímicas del agua

El agua pura es un líquido inodoro, insípido e incoloro. Cuenta con propiedades físicas como la temperatura, la turbidez y la conductividad eléctrica (Hasan *et al.*, 2019) y propiedades químicas como el oxígeno disuelto, con demanda biológica y química de oxígeno (DBO y DQO, respectivamente) son parámetros que indican el tipo y la cantidad de contaminantes presentes. Algunos de estos factores incluso controlan la solubilidad de los metales pesados, como lo son el pH y el potencial redox; este último indica el contenido de metales y de carbono orgánico (Abdel-Satar *et al.*, 2017). De esta forma, el conjunto de las propiedades fisicoquímicas actúan en el ciclo del agua al provocar cambios en su calidad y en el ecosistema que



Figura 1. Países con mayor extracción de agua en miles de millones de m³ al año y el porcentaje destinado a la actividad agrícola. Fuente: Comisión Nacional del Agua (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018).

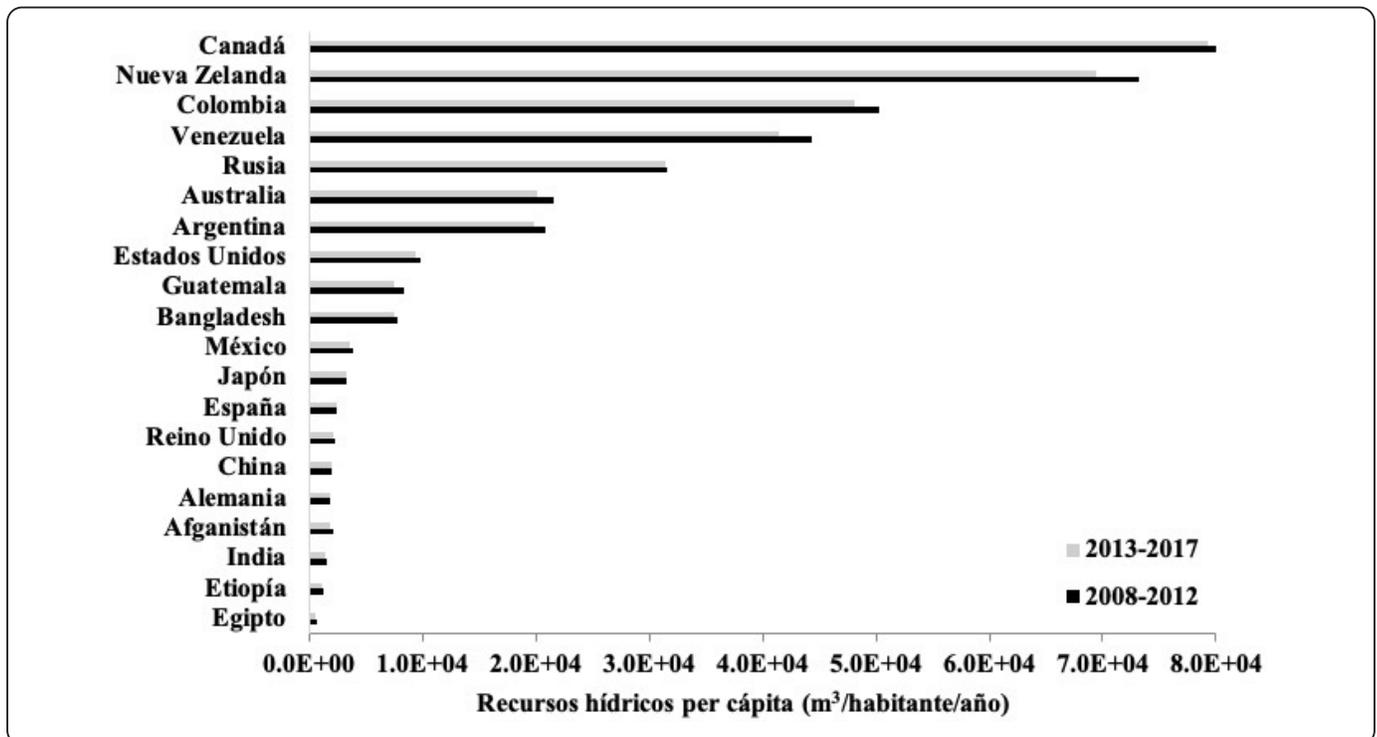


Figura 2. Disponibilidad de recursos hídricos totales per cápita (m³/hab/año). Fuente: Aquastat, 2018.

la rodea. Cabe resaltar, que la calidad del agua es controlada por los cambios en la geología local y de la región, las interacciones entre el agua y las rocas, así como su dilución por el efecto de las lluvias (Abdel-Satar *et al.*, 2017).

Un ejemplo de lo mencionado es reportado por la CONAGUA (2019), con base en el monitoreo de la DQO en 2,831 sitios a nivel nacional, tan solo el 20.7% presentó una calidad excelente ($DQO \leq 10$); el 14.7% tuvo una buena calidad ($10 < DQO \leq 20$); el 30.2% de estas cualidades fue categorizada con una calidad aceptable ($20 < DQO \leq 40$), el 28.0% contaminada ($40 < DQO \leq 200$) y el 6.4% muy contaminada ($DQO > 200$) de acuerdo con el Índice de la Calidad del Agua (ICA) de la SEMARNAT (2019). Resulta alarmante que el más alto porcentaje confirme la presencia de contaminantes que provocan afecciones en la seguridad alimentaria, así como en la salud (Lu *et al.*, 2015). Enfermedades como el cólera, la diarrea, disentería y la hepatitis, están estrechamente relacionadas con la contaminación de este recurso (Hasan *et al.*, 2019). Por esto, Gyamfi *et al.* (2019) consideran imperativo proteger los medios hídricos, al regular y controlar la contaminación y las fuentes que la provocan.

CALIDAD DEL SUELO

Disponibilidad del suelo

El suelo representa una pieza clave de los ecosistemas terrestres; es un recurso natural y vital para las plantas (Jiao, Zhang, Wang, Liu & Li, 2014). Sin embargo, a pesar de ser el factor principal en las áreas agrícolas, también es el más grande almacén de

contaminantes (Martínez-Mera, Torregraza-Espinosa, Crissien-Borrero, Marrugo-Negrete & González-Márquez, 2019). De acuerdo con la FAO (2018), las tierras de cultivo han cambiado con el tiempo (Figura 3). Algunos países entre los años 2000 y 2016 han establecido nuevas áreas agrícolas, principalmente, por el crecimiento demográfico como es el caso de China con 57, 300 km², Brasil con 221, 400 km² y Argentina con 201, 900 km². Otros países presentan una reducción en los campos agrícolas, probablemente asociada a la pérdida de su economía, tierra fértil, contaminación y la erosión del suelo, como en los Estados Unidos con - 85, 365 km², Australia con - 844, 220 km², India con - 12, 540 km² y México con - 940 km².

La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) afirma que los procesos de degradación del suelo comprometen tanto a sus propiedades biológicas al incumplir con sus funciones de bienes y servicios como por la manifestación de cambios químicos y/o biológicos (Granados-Sánchez, Hernández-García, Vázquez-Alarcón & Ruíz-Puga, 2013; SEMARNAT, 2018). A su vez, la FAO (2016) menciona que las principales causas de la degradación del suelo se encuentran relacionadas con actividades de deforestación, plantaciones con monocultivos, uso excesivo de pesticidas inorgánicos, el cambio de uso de suelo o bien, la falta de planificación de las tierras.

De esta forma, únicamente en México, más de la mitad de la superficie presenta degradación; de casi 200 millones de ha en el territorio nacional, 154 millones se encuentran sometidas

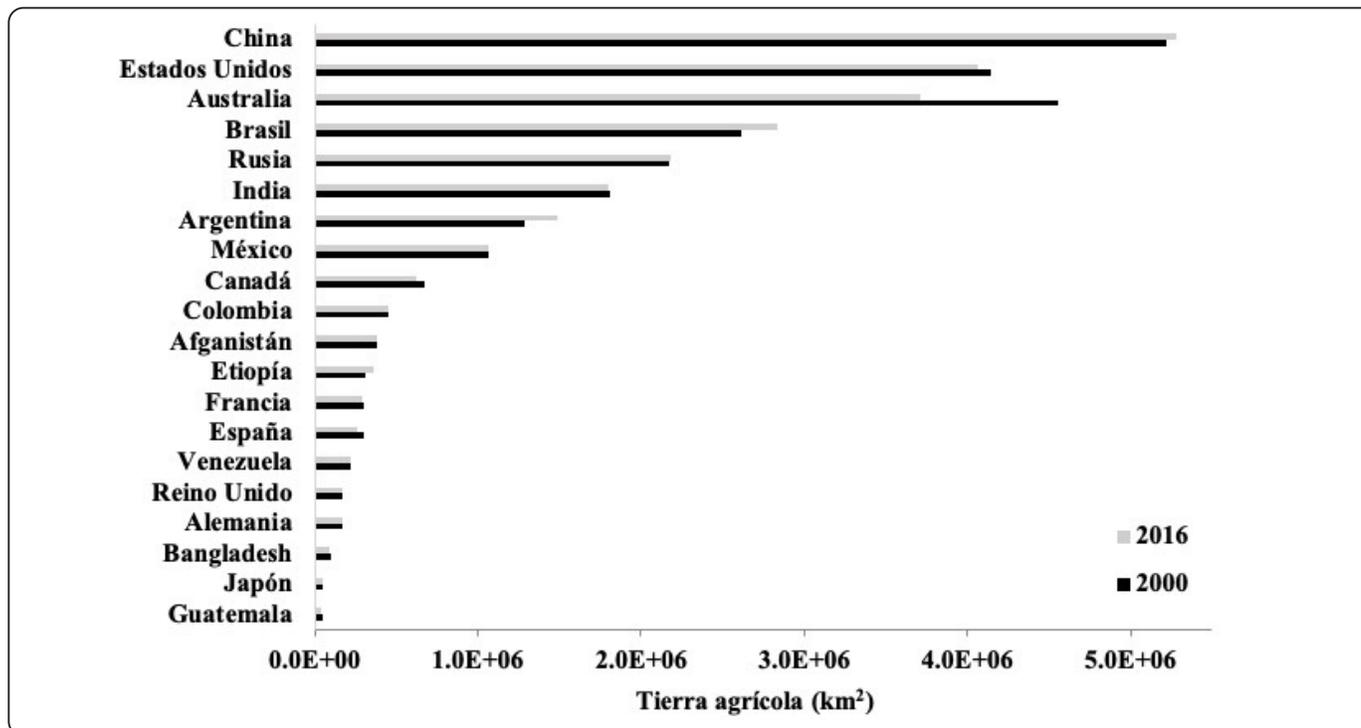


Figura 3. Superficie agrícola (en km²) de diversos países a través del tiempo. Fuente: FAO, 2018.

a algún grado de erosión catalogada entre leve y moderada, representando el 78.30% de la superficie total (Romero, Ruiz & Espinosa, 2013). La SEMARNAT (2018) afirma que en el año 2003, el 44.9% del país se encontraba afectado por algún tipo de degradación, principalmente la química en un 17.8%, seguida de la erosión hídrica con un 11.9%, la eólica con un 9.5% y la degradación física con un 5.7%. La erosión también afecta a la biodiversidad, la seguridad alimentaria y el transporte de contaminantes (Silva *et al.*, 2019).

Dentro de los principales procesos de degradación del suelo se encuentra la desertificación, propia de las regiones áridas, las semiáridas y las subhúmedas secas. Cerca del 40% de la superficie del planeta son tierras secas, estimando que el 70% de ellas son productivas y amenazadas por diversas formas de desertificación (Castelán-Vega, Tamaríz-Flores, Ramírez-García, Handal-Silva & García-Suastegui, 2019). Este proceso depende de agentes biofísicos como la deforestación, la reducción de la materia biológica y los cambios fisicoquímicos del suelo, además de la erosión eólica e hídrica (Granados-Sánchez *et al.*, 2013; Castelán-Vega *et al.*, 2019). A su vez, los bosques tropicales también han sido amenazados por efectos de la deforestación, siendo la expansión agrícola la principal causa de reducción (cerca del 80%) a nivel mundial. Por ejemplo, en Asia, las plantaciones de palma aceitera y la producción de biocombustible han reemplazado superficies de bosque natural, en América del Sur existe una expansión de los pastos destinados al pastoreo extensivo, repercutiendo en un 71% a la deforestación (FAO, 2016). En México, durante los años 2011-2014 se habían transformado cerca de 413, 000 ha de vegetación natural a otros usos. Se perdieron superficies de selvas (111,000 ha) pastizales (5,000 ha) y 24,000 ha de matorrales (SEMARNAT, 2018). Es importante mencionar que, aunque la pérdida de la vegetación natural continúa en todo el mundo, en muchos países se realiza de manera paulatina.

Propiedades fisicoquímicas del suelo

El suelo posee propiedades fisicoquímicas y biológicas inherentes a la región, al clima y principalmente a la estructura geológica de la que se forma. Algunas de sus propiedades como la cantidad de materia orgánica, el pH, el estado de oxidación-reducción, la estructura y el desarrollo, podrían cambiar la solubilidad y el transporte de compuestos tóxicos (Aharonov-Nadborny, Tsechansky, Raviv & Graber, 2017; Bai *et al.*, 2019). De esta manera, un cambio en las propiedades del suelo incrementa el transporte de los metales y la contaminación hídrica (Barsova, Yakimenko, Topeshta & Motuzova, 2019). A su vez, la estructura, los nutrientes, las partículas fraccionadas, la retención de agua y la adsorción también son importantes para este recurso, por retener y acumular los compuestos químicos (Jiao *et al.*, 2014; Abdel-Satar *et al.*, 2017; Wijesiri *et al.*, 2019).

Lo anterior es afirmado por Zhou, Feng, Pei & Lu (2016) quienes reportan la variación de los metales en China, al encontrar

concentraciones de: As de 23.8 mg/kg, Cu de 58.9 mg/kg, Pb de 71.4 mg/kg y Cr de 120.3 mg/kg, cerca de 1.6, 1.7, 5 y 1.3 veces mayor a los reportados en años anteriores. En México, el estudio de Wong, Alegria & Bidleman (2010) reporta que, tras un estudio en 29 sitios, se detectó la presencia de dicloro difenil tricloroetano (DDT) en todos los suelos muestreados a pesar de que no se había aplicado DDT en 10 años atrás. Por otro lado, López-Pérez, *et al.*, (2018) reportaron concentraciones de elementos traza (As, Cd, Cu, Pb y Zn) en suelos agrícolas de México que, aunque no rebasaron la normativa de este país, representan un riesgo debido al nivel de acumulación de estos elementos, derivados del uso de agroquímicos y emisiones industriales.

PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN

El avance de la industria ha afectado gravemente los sistemas de agua (Villalba-Atondo *et al.*, 2013). Se ha demostrado que las principales fuentes de contaminación son los efluentes industriales y las aguas residuales (Yang, Meng & Jiao, 2018; Sánchez *et al.*, 2019), los residuos de las minas, fármacos, así como los desechos alimentarios y veterinarios, la disposición de residuos sólidos, los fertilizantes y los pesticidas (Bhuiyan *et al.*, 2015). Estos contaminantes pueden ser clasificados como patógenos, orgánicos e inorgánicos, aniones y cationes, hidrocarburos aromáticos, policíclicos y bifenilos policlorados, entre otros (Azizullah, Nasir, Khattak, Richter & Häder, 2011; Rügner *et al.*, 2019). Además, su presencia causa daños severos en el ambiente y a los seres vivos. Es el caso del Río Agua Prieta, en Sonora, México, cuyas aguas reciben desechos industriales con cantidades elevadas de sales minerales y elementos como el As, Cd y Ni, por lo que el riego agrícola con estas aguas puede representar un riesgo para los cultivos (Villalba-Atondo *et al.*, 2013).

Asimismo, debido a la escasez de agua, actualmente algunos países como China o México, han utilizado aguas residuales con poco o nulo tratamiento que son vertidas directamente a los campos de cultivo (Sarabia-Meléndez, Cisneros-Almazán, Aceves de Alba, Durán-García & Castro-Larragoitia, 2011; Lu *et al.*, 2015); por ello, el riesgo de contaminación del suelo y cultivos, es más propenso. Las aguas residuales son ricas en fósforo y nitrógeno, dos elementos que causan la eutrofización (Azizullah *et al.*, 2011) y cuyos valores deberían estar por debajo de los 0.01 mg/L y los 0.02 mg/L, respectivamente (Pérez-López, Sánchez-Martínez, Vicencio & Teutli, 2013). Este fenómeno favorece el crecimiento de las algas, provocando la muerte de la flora y la fauna al bloquear la entrada de la luz solar al manto acuífero. De igual forma, los elementos contenidos en las aguas residuales representan una fuente de contaminación para el agua subterránea, ya que logran alcanzarla por infiltración.

Algunos metales pesados pueden ser transportados a los ríos por efectos fluviales o eólicos (Ruelas-Inzunza, Green-Ruiz, Zavala-Nevárez & Soto-Jiménez, 2011). Esto lo afirman Yuan *et al.*

(2019) quienes examinaron las emisiones de Cd en el agua, el suelo y la atmósfera en China; el agua captó la mayoría de ellas en un 90%, seguido del suelo (9%) y la atmósfera (1%). La liberación de estos elementos químicos puede darse de forma natural, a través de fuertes lluvias que implican inundaciones, por el alcantarillado y el transporte pluvial (Rügner *et al.*, 2019). Aunado a esto, algunas aguas subterráneas presentan metales y metaloides de forma natural por su origen geogénico como es el caso del arsénico, en la zona norte de México (Valles-Aragón, Ojeda-Barrios, Guerrero-Prieto, Prieto-Amparan & Sánchez-Chávez, 2017). En el estudio de Abdel-Satar *et al.* (2017) reportaron que el agua subterránea en Arabia Saudita, es empleada en actividades industriales, agrícolas y domésticas y que no existen problemas severos, pues concentraciones de Cu y Zn se encuentran dentro del rango permisible por el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente, a excepción del Cd con valores de hasta 2.18 $\mu\text{g}/\text{cm}$, sobre el nivel máximo de 1.4 $\mu\text{g}/\text{cm}$.

Contaminación por metales y metaloides

Los metales y metaloides son elementos con propiedades metálicas que incluyen a los que presentan una densidad mayor a 5 g/cm^3 como el mercurio (Hg), el arsénico (As), el plomo (Pb) o el cromo (Cr), el zinc (Zn), el cadmio (Cd) y el níquel (Ni), por mencionar algunos (Azizullah *et al.*, 2011; Covarrubias & Peña-Cabriales, 2017). Varios autores asocian la presencia de los metales pesados y los metaloides a la aplicación de pesticidas y fertilizantes (Kong *et al.*, 2014), a las descargas de plantas termoeléctricas (Villalba-Atondo *et al.*, 2013), a las industrias automotrices (Hernández-Ramírez *et al.*, 2019), a los residuos de baterías, pigmentos, recubrimientos, estabilizadores para plásticos, desechos hospitalarios e industriales, que después de ciertos procesos son transportados a los cultivos, animales, aguas residuales y al hombre (Abdel-Satar *et al.*, 2017; Yuan *et al.*, 2019; Wijesiri *et al.*, 2019). Un caso particular es el estudio de Yang *et al.* (2013) donde reportan que las concentraciones de Cu, Zn, Cd y Pb en suelos agrícolas han superado las de los suelos no agrícolas, posiblemente por el riego con aguas residuales o bien, por el uso de fertilizantes y pesticidas.

En los últimos años, los reportes de contaminación por metales pesados y metaloides se han incrementado (Li *et al.*, 2018) y excedido los límites máximos permisibles, estos provienen de fuentes naturales y, principalmente, antropogénicas (Kong, Cao & Tang, 2014). La peligrosidad de los metales pesados y metaloides en el suelo es debido a que no son solubles y, a diferencia de la materia orgánica, no se pueden degradar en sustancias menos tóxicas o más simples (Mahmoud & Ghoneim, 2016). Además, son asociados a procesos, de bioacumulación, que derivan en una alta toxicidad y riesgos por consumo de agua y cultivos contaminados (Hu *et al.*, 2019). No obstante, muchos estudios se han limitado a las áreas definidas para depositar los residuos o provenientes de las minas, dejando de lado algunas zonas donde los residentes al no ser conscientes del peligro

de la contaminación, viven con una mayor exposición a ellos (Zhang *et al.*, 2018). Los estudios incluyen en su mayoría a los siguientes elementos: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn (Yang, Zhou, Yu, Wei & Pan (2013); Mahmoud & Ghoneim, 2016; Martínez-Mera *et al.*, 2019; Zeng *et al.*, 2019).

Otra característica importante sobre la presencia de estos elementos en los suelos de las tierras de cultivo, es que son absorbidos y transportados en los alimentos a través del proceso de bioacumulación mencionado (Zhou *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2018). Lo anterior, representa la toxicidad de los cultivos como lo afirma el estudio de Hu *et al.* (2019) en China, región cuya alimentación depende de los cultivos de arroz, han reportado la presencia de Cr, Pb, Cd, Hg, As, Cu, Zn y Ni, elevando el riesgo ecológico del suelo y las plantaciones, principalmente por el riesgo a la salud de los consumidores. Otro estudio en México, reportó concentraciones de As, Pb, Mn, Cu y Fe en los suelos y en diversos cultivos de acelga, nopal, lechuga, apio, entre otros y aunque en este trabajo las plantas no presentaron un nivel excedente de metales en sus tejidos, es importante mantener un monitoreo constante para evitar una acumulación excesiva (Sarabia-Meléndez *et al.*, 2011). Diversos estudios han evaluado la biodisponibilidad y el transporte de los metales (Tabla I).

Contaminación por aniones y cationes

El agua y el suelo contienen aniones y cationes que son esenciales para la vida (Azizullah *et al.*, 2011). Sin embargo, cuando la cantidad de estos es excesiva, los recursos pasan a ser inadecuados para los seres vivos (Hasan *et al.*, 2019). Su presencia son el resultado de interacciones entre el agua y el entorno, entre la hidroquímica y la evaporación, la meteorización de rocas, la deposición atmosférica y los insumos humanos (Hua, Xiao, Li & Li, 2020).

Las propiedades del suelo pueden perderse por un exceso de iones que afectan su fertilidad y causan toxicidad a los cultivos (Serre & Karuppanan, 2018). Algunos de estos iones son el Cl^- , que no es absorbido por el suelo, sino transportado a las hojas de los cultivos; el Na^+ que en exceso destruye la estructura del suelo, el HCO_3^- que en altos niveles forma compuestos de NaHCO_3 que, a su vez, dan lugar a altas concentraciones de sales, limitando el crecimiento de los cultivos por la poca absorción de agua (Abdel-Satar *et al.*, 2017; Serre & Karuppanan, 2018). Otros elementos como el Mg^{2+} , pueden facilitar la movilidad de algunos metales en el suelo, indicando que, a mayor salinidad, mayor movilidad (Bai *et al.*, 2019).

Algunos estudios, como el de Zheng *et al.* (2017) reportan que al evaluar la calidad del agua del Río Basin, en China, el 15.56% de 45 muestras, es apta para fuentes centralizadas de agua potable, actividades recreativas y uso doméstico, el 46.67% es útil para el consumo humano, la agricultura y la industria, mientras que el 37.78% puede ser utilizada para

Tabla I. Niveles máximos de contaminación del agua y el suelo por metales pesados y metaloides en varios países.

Países	Tipo de muestra	Concentraciones en muestras de agua (mg/L) y suelo (mg/kg)								Referencias
		Pb	Zn	Cu	Cd	Cr	Hg	As	Ni	
Eslovaquia	Agua Suelo	38.12 4.5	194.87 6.9	294.7 8	-	-	27.66 0.8	5	-	Angelovicova & Fazekasova (2014)
China	Agua	33.95	99.66	34.6	0.32	98.82	-	28.1	35.7	Kong <i>et al.</i> (2014)
Bangladesh	Suelo	0.119	0.332	0.239	0.03	0.114		0.134	0.15	Bhuiyan <i>et al.</i> (2015)
China	Agua	30.78	201	26.98	0.24	61.45	0.029	13.11	13.66	Zhou <i>et al.</i> (2016)
Egipto	Agua Suelo	55 0.18	184 0.037	123 0.28	21 0.07	-	-	-	104 0.31	Mahmoud & Ghoneim (2016)
China	Suelo	41.3	86.1	22.8	0.074	44	-	6.3	18.2	Zhuang, Li & Liu (2018)
México	Suelo	0.63	10.31	2.50	0.41	9.14	3.43	2.41	4.64	Hernández-Ramírez <i>et al.</i> (2019)
México	Sedimento	27.35	-	-	0.38	75.62	0.53	-	-	Ruelas-Inzunza <i>et al.</i> (2011)
India	Suelo	0.83	-	-	-	0.36	-	-	0.54	Jawad <i>et al.</i> (2019)
Colombia	Suelo	6.51	109.4	-	0.43	73.9	0.92	-	47.2	Martínez-Mera <i>et al.</i> (2019)
México	Agua	5.0	50	6.0	0.4	1.0	-	0.4	4.0	Villalba-Atondo <i>et al.</i> (2013)
México	Suelo	0.329	-	-	0.042	-	-	0.066	-	Azpilcueta-Pérez <i>et al.</i> (2017)
México	Suelo	22.11	-	119.2	-	-	-	1.24	-	Sarabia-Meléndez <i>et al.</i> (2011)
Límites Máximos Permitidos para el suelo		400	300		37	280	23	22	1600	NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004
Límites Máximos Permitidos para el agua		5.0	2.0	0.2	0.01	0.1	-	0.1	0.2	USEPA (2004)

actividades agro-industriales pero no para su consumo por las altas concentraciones de elementos como el $\text{NH}_4^+\text{-N}$, el Cl^- y el $\text{NO}_2\text{-N}$. En México, Valles-Aragón *et al.* (2017) mencionan que tras el análisis del agua de 13 pozos de una zona nogalera en Chihuahua, se localizó un pozo con agua altamente salina, siendo perjudicial para el desarrollo de los cultivos como el nogal pecanero. Otro ejemplo son los estudios realizados por Hernández-Ramírez *et al.* (2019), en México, el Río Atoyac contiene altas concentraciones de SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , F^- y PO_4^- ; atribuidas principalmente a las actividades antropogénicas, rocas en la litosfera y residuos de fertilizantes. La Tabla II muestra estudios realizados en diversas zonas geográficas que

reportan cifras elevadas de aniones y cationes en muestras de agua y suelo.

Contaminación por pesticidas y fertilizantes

La finalidad del uso de los pesticidas y los fertilizantes es para aumentar la producción agrícola de manera sustancial y protegerla de las plagas (Sun, Sidhu, Rong & Zheng, 2018). Sin embargo, un uso excesivo de los mismos o las malas prácticas facilitan el proceso de degradación de los suelos (Mahmoud & Ghoneim, 2016) al acumular sales, metales pesados y metaloides (Kong *et al.*, 2014). Estos contaminantes son biológicamente activos, dañan por igual a los organismos que no son un objetivo,

Tabla II. Niveles máximos de aniones y cationes en el agua y el suelo de varios países.

Países	Tipo de muestra	Aniones y cationes en agua (mg/L) y suelo (mg/kg)							Referencias
		Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	
Ghana	Agua	141	573	88	27	17.0	573.3	-	Gyamfi <i>et al.</i> (2019)
China	Agua	312.8	159.4	39.9	187.1	217.3	736.8	592.3	Yang <i>et al.</i> (2018)
México	Agua	507	62.1	250	74.8	29.8	-	4940	Hernández-Ramírez <i>et al.</i> (2019)
México	Suelo	-	17.27	0.25	20.89	9.09	-	-	Azpilcueta-Pérez <i>et al.</i> (2017)
China	Suelo	522.7	165.7	180.1	330.6	116.0	-	268.1	Zheng <i>et al.</i> (2017)
Arabia Saudita	Agua	463	272	4.6	221	33.1	146	266	Abdel-Satar <i>et al.</i> (2017)
Etiopía	Agua	35.5	208.0	35.0	174.8	25.0	1000.4	-	Serre & Karuppanan, (2018)
Límites Máximos Permitidos		250	200	12	75	50	250	250	WHO (2008)

incluyendo los seres vivos (Deknock *et al.*, 2019; Hasan *et al.*, 2019; Martínez-Mera *et al.*, 2019). Tan solo el 1% de un pesticida aplicado llega a la plaga objetivo, el resto termina en el suelo, agua y aire, lo que facilita su ingreso a la cadena alimentaria (Azizullah *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2018). Además, representan una amenaza para los ecosistemas, para el abasto de agua y los viveres. En la larga lista de fertilizantes y pesticidas utilizados, en suelos agrícolas de la Unión Europea y China, Silva *et al.* (2019) encontraron residuos de glifosato (2.05 mg/kg), DDT (0.31 mg/kg), hexaclorobenceno (0.01 mg/kg) y Zeng *et al.* (2019) DDT (0.06 mg/kg), hexaclorociclohexano (0.02 mg/kg), y benzopireno (0.04 mg/kg). Por otro lado, en México, el estudio de Hernández-Ramírez *et al.* (2019) señala las cifras de residuos de compuestos orgánicos contenidas en el río Atoyac como DDT (620.2 µg/L), hidrocarburo policíclico aromático (47' 015, 800 µg/L) y pireno (1, 689 µg/L) sugiriendo su presencia por influencia de pesticidas o bien, por las industrias textil, farmacéutica y petroquímica que se encuentran cerca del área de estudio.

Los efectos de los pesticidas se han incrementado por el uso excesivo y malas prácticas en la producción de cultivos como el arroz, el algodón, el maíz y el trigo (Jin, Bluemling & Mol, 2014). Únicamente en México, se calcula la existencia superior a 900 pesticidas aplicados en cantidades que van desde 395 T hasta 13,163 T al año (García-Gutiérrez & Rodríguez-Meza, 2012). Lo elevado de las cifras es señal de lo contaminados que están los cultivos, fuente de la alimentación humana y del ganado; pues no hay información del volumen y el tipo de pesticidas durante su aplicación; sin embargo, es posible detectar los daños que ocasionan en zonas de cultivo por el estado de la contaminación del agua de los ríos que se utiliza para el riego.

Después de la aplicación de estos pesticidas y fertilizantes, éstos pueden ser transportados por el aire, de acuerdo a los estudios de Wong *et al.* (2010), quienes afirman que compuestos como el DDT en una cantidad de 0.34 ng/g y el endosulfán de 0.82 ng/g, son algunos de los principales pesticidas organoclorados detectados en el aire de México, y transportados a países vecinos como Guatemala y Belice. A su vez, las lluvias facilitan la dispersión de estos compuestos al agua y posteriormente, son absorbidos a través del suelo. El estudio de Deknock *et al.* (2019) aluden a que las concentraciones de los pesticidas o fertilizantes crecen con las lluvias, debido a la escorrentía y las inundaciones. De igual forma, Cui *et al.* (2020) detectaron la presencia de ellos en el agua como el metaldehído en una cantidad de 10.5 ng/L. No obstante, las concentraciones se vieron influenciadas debido a la estación del año. Sin embargo, si se unen al suelo, aumenta su persistencia en el ambiente, limitando su degradación y movilidad (Hvězďová *et al.*, 2018). Algunos estudios, como el de Hvězďová *et al.* (2018) hallaron residuos de triazina de 0.163 mg/kg, de conazole de 0.065 mg/kg y carbamatos de 0.034 mg/kg, en concentraciones que no se han degradado, aun cuando han pasado meses desde su aplicación.

IMPACTO AMBIENTAL EN LA AGRICULTURA

En los últimos años, los cultivos para la producción de alimentos abarcan cerca de un tercio de la superficie terrestre convirtiendo a la agricultura en la mayor transformación del hábitat (Landeros-Sánchez, Moreno-Seceña, Nikolskii-Gavrilov & Bakhlaeva-Egorova, 2011). La demanda a nivel internacional de productos agrícolas y la expansión de las áreas de cultivo son factores importantes de la deforestación (Armenteras & Rodríguez, 2014). También, es la actividad responsable de la extinción de diversas especies, pues se ha deforestado un 45%

de los bosques templados y 27% de los bosques tropicales y sigue en aumento (Andrade, 2016).

Aunado a lo anterior, la degradación de los suelos agrícolas y la pérdida del rendimiento de los cultivos ponen en riesgo a la población global, al considerar que la producción de cultivos debe aumentar para el año 2050 (Hou *et al.*, 2020). Para esta producción se requiere el uso de fertilizantes y pesticidas, cuyos componentes pueden desarrollar enfermedades por el consumo de cultivos contaminados. Por otro lado, el uso constante de sistemas de riego comprometen la disponibilidad del agua (Neri-Guzmán & Medina-Ortega, 2019; Hou *et al.*, 2020). El riego de cultivos implica el uso del 70% del agua en el mundo y es el principal factor limitante para el rendimiento de muchos cultivos (Andrade, 2016). Particularmente en México, en el año 2017, el 76.04 % del agua se utilizó para actividades agrícolas y la superficie sembrada bajo riego fue de 6.5 millones de ha (CONAGUA, 2018) afectando su calidad y disponibilidad.

Debido a la alta demanda del agua y el suelo, existe una reducción en la producción de los alimentos, por lo que se han desarrollado los llamados transgénicos para abastecer las necesidades de la población (Llamas-Covarrubias, 2019). Los alimentos transgénicos son aquellos a los que se les ha introducido un gen a través de técnicas genéticas y no por medio de técnicas convencionales de mejora (Melgarejo, Romagosa & Duran, 2014). Las semillas de estos cultivos son resistentes a las plagas y a las enfermedades y se adaptan mejor a las prácticas agrícolas. Además, se busca implementar que los cultivos puedan superar el estrés por sequía o que utilicen con más eficiencia los nutrientes (Ortiz, 2012). Es necesario enfatizar que la población en México y en el mundo ha ido en aumento, por lo que la agricultura transgénica se ha incrementado a nivel mundial, durante el período de 1996 a 2013, alcanzó una superficie acumulada de más de 1,600 millones de ha. Tan solo para el 2011, ya se habían sembrado 160 millones de ha de cultivos transgénicos en 29 países, incluyendo los mayores exportadores agrícolas (Ortiz, 2012; Melgarejo *et al.*, 2014).

A su vez, una de las mayores producciones agrícolas a nivel mundial es el maíz, siendo Estados Unidos y China los mayores productores, seguidos de Brasil, Argentina y México (Santillán-Fernández *et al.*, 2021). Particularmente en México, el sector agrícola se encuentra con baja productividad para cubrir a toda la población debido, a la diversidad climática, hidrológica, fisiográfica y cultural (Neri-Guzmán & Medina-Ortega, 2019). México tiene una producción de 23 millones de T y un consumo nacional de cerca de 39 millones de T (Santillán-Fernández *et al.*, 2021). Se estima que la producción de maíz en México se ha mantenido debido al aumento de la irrigación en los cultivos, aún en temporada de lluvia. Sin embargo, existen zonas donde hay una notable reducción de ellos debido a la poca disponibilidad de agua, la competencia por este recurso

y la conversión de áreas más rentables (Santillán-Fernández *et al.*, 2021). Además, muchas de las áreas agrícolas son abandonadas una vez que la producción disminuye al agotarse los nutrientes del suelo.

Debido a lo anterior, se han implementado estrategias nacionales e internacionales para solucionar el problema de la contaminación de los recursos naturales que afectan a la actividad agrícola, por lo que en México se ha establecido la Agenda para el año 2030 y los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES). Dentro de los objetivos de la Agenda año 2030, se incluye el manejo sustentable de los recursos para la agricultura como: el cuidado adecuado del suelo, reducción de las muertes y enfermedades generadas por los productos químicos, agua limpia, reducción de la deforestación para campos de cultivo y protección a la biodiversidad del suelo (Naciones Unidas, 2018). En México, dentro de los Programas Nacionales Estratégicos (CONACYT, 2021) se busca conocer la situación actual de diversas regiones susceptibles a la presencia de agentes tóxicos con el fin de llevar a cabo la aplicación de estrategias sustentables que den lugar a la producción de alimentos inocuos.

Como resultado de las estrategias nacionales e internacionales, en la actualidad existen métodos de remediación o descontaminación de suelos como las técnicas de biorremediación y fitorremediación, siendo una solución natural para tratar los contaminantes del suelo al crear una interacción entre plantas, microorganismos y tóxicos (Hou *et al.*, 2020). Otra de las técnicas utilizadas es la electrorremediación, utilizada para remover metales y metaloides como As, Cd, Cr, Hg, Mn, Pb y Zn, con un alcance eficiente de remoción muy cerca del 100 % (De la Rosa-Pérez, Teutli-León & Ramírez-Islas, 2007). Al mismo tiempo, se han adoptado diversas opciones de manejo agrícola como: la rotación de cultivos, uso de maquinaria menos pesada y una reducción o suspensión del uso de productos químicos (Granados-Sánchez *et al.*, 2013).

CONCLUSIONES

Los efectos negativos de la agricultura al medio ambiente son cada vez más evidentes. A nivel mundial existe una pérdida de los recursos naturales como el suelo fértil, la disponibilidad del agua y, por el contrario, existe un aumento de la presencia de residuos poco degradables, debido al crecimiento demográfico y al desarrollo industrial. Es necesario optimizar las técnicas agrícolas y sus políticas para mejorar y conservar la salud y el medio ambiente. Una de los mayores problemas es el riego con aguas residuales y el uso de elementos químicos para favorecer el crecimiento de los cultivos, lo que resulta en un aumento de la toxicidad del suelo y un riesgo para la población consumidora de cultivos contaminados. Por ello, es importante el desarrollo de estudios predictivos sobre el manejo de los recursos naturales para tomar las medidas que ayuden a la conservación del equilibrio de los ecosistemas. La implementación de planes estratégicos y las técnicas de remediación y descontaminación

del suelo son parte de la solución a este problema. Sin embargo, aún existe la expansión de superficies agrícolas en búsqueda de suelos fértiles, limitando el alcance de los objetivos y técnicas de remediación planteados.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para la realización de los estudios de doctorado de Leticia de Jesús Velázquez Chávez.

REFERENCIAS

- Abdel-Satar, A. M., Al-khabbas, M. H., Alahmad, W. R., Yousef, W. M., Alsomadi, R. H., & Iqbal, T. (2017). Quality assessment of groundwater and agricultural soil in Hail region, Saudi Arabia. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, **43**(1), 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2016.12.004>
- Adeyinka, G. C., Moodley, B., Birungi, G. & Ndungu, P. (2019). Evaluation of organochlorinated pesticide (OCP) residues in soil, sediment, and water from the Msunduzi River in South Africa. *Environmental Earth Sciences*, **78**(6), 223. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8227-y>
- Aharonov-Nadborny, R., Tsechansky, L., Raviv, M. & Graber, E. R. (2017). Impact of spreading olive mill wastewater on agricultural soils for leaching of metal micronutrients and cations. *Chemosphere*, **179**(2017), 213-221. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.093>
- Ahmed, M., Matsumoto, M., Ozaki, A., Thinh, N. V. & Kurosawa, K. (2019). Heavy metal contamination of irrigation water, soil, and vegetables and the difference between dry and wet seasons near a multi-industry zone. *Water*, **11**(3), 1-12. <https://doi.org/10.3390/w11030583>
- Andrade, F. H. (2016). Los desafíos de la agricultura (1ª edición). Argentina: Ed. IPNI Latinoamérica-Cono Sur. 136p. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_los_desafios_de_la_agricultura_fandrade.pdf
- Angelovičová, L. & Fazekašová, D. (2014). Contamination of the Soil and Water Environment by Heavy Metals in the Former Mining Area of Rudňany (Slovakia). *Soil and Water Resources*, **2014**(1), 18–24. <https://doi.org/10.17221/24/2013-SWR>
- Aquastat (2018). Sistema de Información de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html> (Consultado el 12 de febrero de 2022).
- Armenteras, D. & Rodríguez, N. (2014). Dinámicas y causas de deforestación en bosques de latino américa: una revisión desde 1990. *Colombia Forestal*, **17**(2), 233-246. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a07>
- Azizullah, A., Nasir, M., Khattak, K., Richter, P. & Häder, D. (2011). Water pollution in Pakistan and its impact on public health — A review. *Environment International*, **37**(2), 479-497. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.10.007>
- Azpilcueta Pérez, M. E., Pedroza Sandoval, A., Sánchez Cohen, I., Salcedo Jacobo, M. R. & Trejo Calzada, R. (2017). Calidad química del agua en un Área agrícola de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en la comarca lagunera, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, **33**(1), 75–83. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.07>
- Bai, J., Zhao, Q., Wang, W., Wang, X., Jia, J., Cui, B. & Liu, X. (2019). Arsenic and heavy metals pollution along a salinity gradient in drained coastal wetland soils: Depth distributions, sources, and toxic risks. *Ecological Indicators*, **96**(August 2018), 91-98. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.026>
- Barsova, N., Yakimenko, O., Tolpeshta, I. & Motuzova, G. (2019). Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in the Russian Federation. *Environmental Pollution*, **249**(2019), 200-207. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020>
- Bhuiyan, M. A. H., Dampare, S. B., Islam, M. A. & Suzuki, S. (2015). Source apportionment and pollution evaluation of heavy metals in water and sediments of Buriganga River, Bangladesh, using multivariate analysis and pollution evaluation indices. *Environmental Monitoring and Assessment*, **187**(4075), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4075-0>
- Castelán-Vega, R., Tamariz-Flores, J. V., Ramírez-García, A. L., Handal-Silva, A. & García-Suastegui, W. A. (2019). Susceptibilidad ambiental a la desertificación en la microcuenca del río Azumiatla, Puebla, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, **6**(16), 91-101. <https://doi.org/10.19136/era.a6n16.1886>
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [CONACYT]. (2021). Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES). [En línea]. Disponible en: <https://conacyt.mx/que-son-los-pronaces/> (Consultado el 15 de abril de 2022).
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2018). Atlas del agua en México. Conagua. [En línea]. Disponible en: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf (Consultado el 21 de febrero de 2022).
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2019). Estadísticas del Agua en México 2019. Conagua. [En línea]. Disponible en: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf (Consultado el 20 de julio de 2022).
- Covarrubias, S. A & Peña-Cabriales, J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, **33** (Especial Biotecnología e Ingeniería Ambiental), 7-21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>
- Cui, S., Hough, R., Yates, K., Osprey, M., Kerr, C., Cooper, P., Coull, M. & Zhang, Z. (2020). Effects of season and sediment-water exchange processes on the partitioning of pesticides in the catchment environment: Implications for pesticides monitoring. *Science of the Total Environment*, **698**(134228), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.134228>

- scitotenv.2019.134228
- Deknock, A., Troyer, N., Houbraken, M., Dominguez-Granda, L., Nolivos, I., Echelpoel, W. V., Eurie, M.A., Spanoghe, P. & Goethals, P. (2019). Distribution of agricultural pesticides in the freshwater environment of the Guayas River basin (Ecuador). *Science of the Total Environment*, **646**(2019), 996-1008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.185>
- De la Rosa-Pérez, D. A., Teutli-León, M. M. M. & Ramírez-Islas, M. E. (2007). Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, **23**(3), 129–138.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2016). El estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. Roma. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i5588s/i5588s.pdf> (Consultado el 20 de octubre de 2021).
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2018). El estado de los mercados de productos básicos agrícolas 2018. El comercio agrícola, el cambio climático y la seguridad alimentaria. Roma. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i9542Es/i9542es.pdf> (Consultado el 22 de febrero de 2021).
- García-Gutiérrez, C. & Rodríguez-Meza, G. D. (2012). Problemática y riesgo ambiental por el uso de plaguicidas en Sinaloa. *Ra Ximhai*, **8**(3b), 1-10. Recuperado de: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rxm/article/view/53787/47884>
- Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M. A., Vázquez-Alarcón, A. & Ruiz-Puga, P. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, **19**(1), 45-66. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.10.077>
- Gyamfi, E., Appiah-Adjei, E. K. & Amaning-Adjei, K. (2019). Potential heavy metal pollution of soil and water resources from artisanal mining in Kokoteasua, Ghana. *Groundwater for Sustainable Development*, **8**(2019), 450-456. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.01.007>
- Hasan, K., Shahriar, A. & Ullah, K. (2019). Water pollution in Bangladesh and its impact on public health. *Heliyon*, **5**(June), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02145>
- Hernández-Ramírez, A. G., Martínez-Tavera, E., Rodríguez-Espinosa, P. F., Mendoza-Pérez, J. A., Tabla-Hernández, J., Escobedo-Urías, D. C., Jonathan, M. P. & Sujitha, S. B. (2019). Detection, provenance and associated environmental risks of water quality pollutants during anomaly events in River Atoyac, Central Mexico: A real-time monitoring approach. *Science of the Total Environment*, **669**(2019), 1019-1032. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.138>
- Hou, D., O'Connor, D., Igalavithana, A. D., Alessi, D. S., Luo, J., Tsang, D. C. W., Sparks, D. L., Yamauchi, Y., Rinklebe, J. & Ok, Y. (2020). Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nature Reviews Earth and Environment*, **1**(7), 366–381. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y>
- Hu, B., Shao, S., Fu, Z., Li, Y., Ni, H., Chen, S., Zhou, Y., Jin, B. & Shi, Z. (2019). Identifying heavy metal pollution hot spots in soil-rice systems: A case study in South of Yangtze River Delta, China. *Science of the Total Environment*, **658**, 614-625. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.150>
- Hua, K., Xiao, J., Li, S. & Li, Z. (2020). Analysis of hydrochemical characteristics and their controlling factors in the Fen River of China. *Sustainable Cities and Society*, **52**(July 2019), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101827>
- Hvězďová, M., Kosubová, P., Kosikova, M., Scherr, K. E., Šimek, Z., Brodsky, L., Sudoma, M., Škulcova, L., Sanka, M., Svobodová, M., Krkoskova, L., Vasickova, J., Neuwirthová, N., Bielska, L. & Hofman, J. (2018). Currently and recently used pesticides in Central European arable soils. *Science of the Total Environment*, **614**, 361-370. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.049>
- Islam, M. R., Das, N. G., Barua, P., Hossain, M. B., Venkatramanan, S. & Chung, S. Y. (2017). Environmental assessment of water and soil contamination in Rajakhali Canal of Karnaphuli River (Bangladesh) impacted by anthropogenic influences: a preliminary case study. *Applied Water Science*, **7**(2), 997-1010. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0310-2>
- Jawad, M., Arslan, M., Siddique, M., Ali, S., Tahseen, R. & Afzal, M. (2019). Potentialities of floating wetlands for the treatment of polluted water of polluted water of river Ravi, Pakistan. *Ecological Engineering*, **133**, 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.022>
- Jiao, S., Zhang, M., Wang, Y., Liu, J. & Li, Y. (2014). Variation of soil nutrients and particle size under different vegetation types in the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, **34**(3), 148-153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.022>
- Jin, S., Bluemling, B. & Mol, A. P. J. (2014). Information, trust and pesticide overuse: Interactions between retailers and cotton farmers in China. *Wageningen Journal of Life Sciences*, **72**, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2014.10.003>
- Kong, X., Cao, J. & Tang, R. (2014). Pollution of intensively managed greenhouse soils by nutrients and heavy metals in the Yellow River Irrigation Region, Northwest China. *Environmental Monitoring and Assessment*, **186**(2014), 7719-7731. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3962-8>
- Landeros-Sánchez, C., Moreno-Seceña, J. C., Nikolskii-Gavrilov, I. & Bakhlaeva-Egorova, O. (2011). Impacto de la agricultura sobre la biodiversidad. En Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (Ed.), *La biodiversidad en Veracruz: estudio de estado volumen I* (pp. 477-491). [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/280319743_Impacto_de_la_agricultura_sobre_la_biodiversidad (Consultado el 20 de febrero de 2021).

- Li, L., Wu, J., Lu, J., Min, X., Xu, J. & Yang, L. (2018). Distribution, pollution, bioaccumulation, and ecological risks of trace elements in soils of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **166**(July), 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.110>
- Llamas-Covarrubias, B. A. (2019). La Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, sus avances y retos en México. *Comisión Estatal de Derechos Humanos Jalisco*, **11**(Septiembre-Diciembre), 108–123. ISSN: 2448-8518
- López-Pérez, M. E., Del Rincón-Castro, M. C., Muñoz-Torres, C., Ruiz-Aguilar, G. M. L., Solís-Valdez, S. & Zanon, G. A. (2018). Evaluación de la contaminación por elementos traza en suelos agrícolas del suroeste de Guanajuato, México. *Acta Universitaria*, **27**(6), 10–21. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1386>
- Lu, Y., Song, S., Wang, R., Liu, Z., Meng, J., Sweetman, A. J., Jenkins, A., Ferrier, R.C., Li, H., Luo, W. & Wang, T. (2015). Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. *Environment International*, **77**, 5-15. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.12.010>
- Mahmoud, E. K. & Ghoneim, A. M. (2016). Effect of polluted water on soil and plant contamination by heavy metals in El-Mahla El-Kobra, Egypt. *Solid Earth*, **7**(2), 703-711. <https://doi.org/10.5194/se-7-703-2016>
- Manoj, S., Thirumurugan, M. & Elango, L. (2017). An integrated approach for assessment of groundwater quality in and around uranium mineralized zone, Gogi region, Karnataka, India. *Arabian Journal of Geosciences*, **10**(24), 557. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3321-5>
- Martínez-Mera, E. A., Torregroza-Espinosa, A. C., Crissien-Borrero, T.J., Marrugo-Negrete, J. L. & González-Márquez, L. C. (2019). Evaluation of contaminants in agricultural soils in an Irrigation District in Colombia. *Heliyon*, **5**(8), e02217. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02217>
- Melgarejo, P., Romagosa, I. & Duran, N. (2014). Biotecnología agrícola. *Arbor*, **190**(768), 1-13. <https://doi.org/10.3989/arbor.2014.768n4006>
- Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf (Consultado el 15 de abril de 2022).
- Neri-Guzmán, J. C. & Medina-Ortega, M. A. (2019). Cultivos alternativos como un mecanismo para el desarrollo de zonas áridas, el caso de la jojoba en el Altiplano potosino. En *Realidad, Datos y Espacio, Revista Internacional de Estadística y Geografía*, **10**(1), 44-63.
- NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004. Que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- Ortiz, R. (2012). La adopción de la biotecnología moderna y su compatibilidad con una agricultura sustentable. *IDESIA (Chile)*, **30**(3), 3-10. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292012000300001>
- Pérez-López, M. E., Sanchez-Martinez, M. G., Vicencio, M. G. & Teutli, M. (2013). Eutrophication levels through San Pedro-Mezquital River Basin. *Journal of Environmental Protection*, **2**, 45-50. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.411A006>
- Rodríguez-Téllez, E., Domínguez-Calleros, P. A., Pompa-García, M., Quiroz-Arratia, J. A. & Pérez-López, M. E. (2012). Quality of the riparian forest of El Tunal River, Durango, Mexico; through the application of the QBR index. *Gayana Botánica*, **69**(1), 147-151. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432012000100014>
- Romero, A., Ruiz, J. D. & Espinosa, M. (2013). Erosión y degradación de los suelos en el mundo, México y España. En Andrade, E., Belmonte, F y Romero, A. (Ed.), *Erosión y degradación de suelos en ambientes semiáridos. Regiones norte y altiplano de Tamaulipas (México)* (pp. 15-42). México: Editum Miradas.
- Ruelas-Inzunza, J., Green-Ruiz, C., Zavala-Nevárez, M., & Soto-Jiménez, M. (2011). Biomonitoring of Cd, Cr, Hg and Pb in the Baluarte River basin associated to a mining area (NW Mexico). *Science of the Total Environment*, **409**(18), 3527-3536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.035>
- Rügner, H., Schwientek, M., Milacic, R., Zuliani, T., Vidmar, J., Paunovi, M., Laschou, S., Kalogianni, E., Skoulikidis, N. T., Diamantini, E., Majone, B., Bellin, A., Chiogna, G., Martinez, E., López, M., Díaz-Cruz, M. S. & Grathwohl, P. (2019). Particle bound pollutants in rivers: Results from suspended sediment sampling in Globaqua River Basins. *Science of the Total Environment*, **647**, 645-652. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.027>
- Sánchez, H., Bolívar-Anillo, H. J., Soto-Varela, Z. E., Aranguren, Y., Pichón, C., Villate, D. A. & Anfuso, G. (2019). Microbiological water quality and sources of contamination along the coast of the Department of Atlántico (Caribbean Sea of Colombia). Preliminary results. *Marine Pollution Bulletin*, **142**, 303-308. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.054>
- Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco, J. G., Carrillo, L. & González, R. A. (2016). Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, **7**(4), 75-96. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/3535/353549828005.pdf>
- Santillán-Fernández, A., Salinas-Moreno, Y., Valdez-Lazalde, J. R., Carmona-Arellano, M. A., Vera-López, J. E. & Pereira-Lorenzo, S. (2021). Relationship between maize seed productivity in Mexico between 1983 and 2018 with the adoption of genetically modified maize and the resilience of local races. *Agriculture*, **11**(8), 1-15. <https://doi.org/10.3390/agriculture11080737>

- Sarabia Meléndez, I. F., Cisneros Almazán, R., Aceves De Alba, J., Durán García, H. M. & Castro Larragoitia, J. (2011). Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del valle de San Luis Potosí, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, **27**(2), 103–113.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2018). Segundo informe del estado del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. [En línea]. Disponible en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html> (Consultado el 10 de febrero de 2021).
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2019). Indicadores de calidad del agua [En línea]. Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_01%26IBIC_user=dgeia_mce%26IBIC_pass=dgeia_mce (Consultado el 20 de julio de 2022).
- Serre, N. & Karuppanan, S. (2018). Groundwater quality assessment using water quality index and GIS technique in Modjo River Basin, central Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, **147**, 300-311. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.06.034>
- Silva, V., Mol, H. G. J., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C. J. & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils – A hidden reality unfolded. *Science of the Total Environment*, **653**, 1532-1545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.441>
- Su, S., Li, D., Zhang, Q., Xiao, R., Huang, F. & Wu, J. (2010). Temporal trend and source apportionment of water pollution in different functional zones of Qiantang River, China. *Water Research*, **45**(4), 1781–1795. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.11.030>
- Sun, S., Sidhu, V., Rong, Y. & Zheng, Y. (2018). Pesticide Pollution in Agricultural Soils and Sustainable Remediation Methods: A Review. *Current Pollution Reports*, **4**(3), 240-250. <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0092-x>
- Talabi, A. O. & Kayode, T. J. (2019). Groundwater Pollution and Remediation. *Journal of Water Resource and Protection*, **11**, 1-19. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.111001>
- The United States Environmental Protection Agency. (2004). Guidelines for water reuse. U.S. Agency for International Development. [En línea]. Disponible en: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/30006MKD.pdf (Consultado el 4 de abril de 2022).
- Valles-Aragón, M. C., Ojeda-Barrios, D. L., Guerrero-Prieto, V. M., Prieto-Amparan, J. A. & Sánchez-Chávez, E. (2017). Calidad del agua para riego en una zona nogalera del estado de chihuahua. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, **33**(1), 85–97. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.08>
- Villalba-Atondo, A. I., Castillo-Alarcón, J. M., Gómez-Álvarez, A., Pérez-Villalba, A. M., Nubes-Ortiz, G., Villalba-Urquidy, S. & Salcido-Esquer, A. (2013). Contaminación del agua y suelo en el ecosistema río Agua Prieta, Sonora, México. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, **15**(1), 3-11. <https://doi.org/10.18633/bt.v15i1.129>
- WHO, World Health Organization. (2008). Guidelines for drinking-water quality. Incorporating the first and second addenda, en Recommendations (3a ed.). [En línea]. Disponible en: http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/204411/9789241547611_eng.pdf (Consultado el 14 de noviembre de 2020).
- Wijesiri, B., Liu, A., Deilami, K., He, B., Hong, N. & Yang, B. (2019). Nutrients and metals interactions between water and sediment phases: An urban river case study. *Environmental Pollution*, **251**, 354-362. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.018>
- Wong, F., Alegria, H. A. & Bidleman, T. F. (2010). Organochlorine pesticides in soils of Mexico and the potential for soil – air exchange. *Environmental Pollution*, **158**(3), 749-755. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.10.013>
- Yang, S., Zhou, D., Yu, H., Wei, R. & Pan, B. (2013). Distribution and speciation of metals (Cu, Zn, Cd, and Pb) in agricultural and non-agricultural soils near a stream upriver from the Pearl River, China. *Environmental Pollution*, **177**, 64-70. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.044>
- Yang, Y., Meng, Z. & Jiao, W. (2018). Hydrological and pollution processes in a mining area of Fenhe River Basin in China. *Environmental Pollution*, **234**(3), 743-750. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.018>
- Yuan, Z., Luo, T., Liu, X., Hua, H., Zhuang, Y. & Zhang, X. (2019). Tracing anthropogenic cadmium emissions: From sources to pollution. *Science of the Total Environment*, **676**, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.250>
- Zeng, S., Ma, J., Yang, Y., Zhang, S., Liu, G. & Chen, F. (2019). Spatial assessment of farmland soil pollution and its potential human health risks in China. *Science of the Total Environment*, **687**, 642-653. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.291>
- Zhang, J., Li, H., Zhou, Y., Dou, L. & Cai, L. (2018). Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: A case study in the Pearl River Delta, South China. *Environmental Pollution*, **235**, 710-719. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.106>
- Zheng, Q., Ma, T., Wang, Y., Yan, Y., Liu, L., & Liu, L. (2017). Hydrochemical characteristics and quality assessment of shallow groundwater in Xincai River Basin, Northern China. *Procedia Earth and Planetary Science*, **17**, 368-371. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1289-x>
- Zhou, J., Feng, K., Pei, Z. & Lu, M. (2016). Pollution assessment and spatial variation of soil heavy metals in Lixia River Region of Eastern China. *Journal of Soils and Sediments*, **16**(3), 748-755. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1289-x>
- Zhuang, Q., Li, G. & Liu, Z. (2018). Distribution, source, and pollution level of heavy metals in river sediments from South China. *Catena*, **170**(June), 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.037>