

**Programa Nacional Estratégico
Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes**

Síntesis del Macroexpediente Científico

Etapas 3

**Parte del robustecimiento del diagnóstico
del daño toxicológico en México**

Comité Ejecutivo

Noviembre de 2023

Siglas

CC: Cromatina condensada.

Cd: Cadmio.

Co: Cobalto.

CO: Monóxido de Carbono.

CO₂: Dióxido de carbono.

COFEPRIS. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios.

Conacyt: Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología.

CNDH: Comisión Nacional de Derechos Humanos.

Cr: Cromo.

Cu: Cobre.

DR: Distrito de Riego.

EDAs: Enfermedad Diarreica Aguda.

Fe: Hierro.

GEM: Gas de mercurio elemental.

IMSS: Instituto Mexicano del Seguro Social.

ISSSTE: Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado.

Hm³: Hectómetro.

Mg: Magnesio.

Mg/kg: Microgramo por kilogramo.

Mn: Manganeseo.

MP: Micro plásticos.

Mo: Molibdeno.

Ni: Níquel.

NOM: Norma Oficial Mexicana.

ONG: Organización no gubernamental.

O₃: Ozono.

Pb: Plomo.

PM₁₀: Partículas atmosféricas menores a diez micras.

PpbV: Partes por billón en volumen.

RAMAG: Red Automática de Monitoreo del área Metropolitana de Guadalajara.

REACH: Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Productos Químicos [siglas en inglés].

Sb: Antimonio.

Se: Selenio.

SEMADET: Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial.

SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SO₂: Dióxido de azufre.

Sr: Estroncio.

Ti: Titanio.

$\mu_g L^{-1}$: Microgramos por litro.

Zn: Zinc.

Glosario

Aldrín. Plaguicida clorado, utilizado para controlar una variedad de insectos, se convierte en dieldrín, ambos son semi volátiles y se biodegradan lentamente. La exposición a esta sustancia se asocia a efectos hepáticos y neurológicos de acuerdo a las fichas técnicas de ATSDR.

Anomalía nuclear: Anomalías del ADN.

Anomalías nucleares: Conjunto de alteraciones en el núcleo de las células que se expresan en daños celulares de diversos tipos.

Apoptosis: Muerte celular programada.

Cariolisis: Degeneración celular que consiste en la disolución de la cromatina del núcleo en el jugo nuclear y termina diluida en el citoplasma.

Cariorrexis: Fragmentación del núcleo celular que deviene en el derramamiento de la cromatina en el citoplasma.

Clastogénico: Agente mutagénico que induce a la interrupción o rotura de cromosomas.

Congéneres de PCB: Tipos de bifenilos policlorados que difieren por la posición del bifenilo en la estructura atómica.

Contaminantes criterio: Aquellos contaminantes a los que se les ha establecido un límite máximo permisible de concentración en el aire con la finalidad de proteger la salud y asegurar el bienestar de la población, en México se incluyen en esta clasificación: NO₂, O₃, SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5} y Pb.

Cromatina anormalmente condensada (CC): Acomodo de la cromatina que reprime la expresión genética.

DDE: Diclorodifenildicloroetileno.

DDT: Diclorodifeniltricloroetano. Insecticida organoclorado. Desde el convenio de Estocolmo, su uso sólo es permitido para controlar enfermedades transmitidas por vector como la leishmaniasis y la malaria. Se asocia cáncer de hígado, diabetes tipo 2 y cáncer de endometrio, de acuerdo a las fichas técnicas de ATSDR.

HCH. Hexaclorocicloroexano. Esta sustancia tiene ocho formas, llamadas isómeros, por ejemplo, gamma HCH, alfa HCH o beta HCH. El más utilizado de estos es el gamma HCH, lindano, regulado en Estados Unidos desde la década de los setentas del siglo XX. La exposición ambiental y laboral a este químico se asocia a efectos negativos sobre el sistema neurológico, hepático, efectos sobre el desarrollo de los recién nacidos e infantes y también se le asocian efectos negativos sobre el sistema inmunológico de acuerdo con las fichas técnicas del ATSDR.

Heptacloro: Insecticida que frecuentemente ha sido identificado en peces comestibles, productos cárnicos y lácteos provenientes de animales expuestos.

IARC: Agencia Internacional para la investigación del cáncer [siglas en inglés].

Isómero: Compuesto que comparte la fórmula química con otro u otros, pero difiere la disposición de los átomos en el interior de la molécula.

Micronúcleo: Estructuras derivadas del núcleo de la célula, de tamaño menor que éste.

Núcleo picnótico: Condensación de la cromatina en el núcleo celular, lo que la lleva a la necrosis.

Skarn: Rocas que contienen minerales, los depósitos de skarn son económicamente valiosos.

Yema nuclear: Malformación celular que expresa una aberración cromosómica

Normas Oficiales Mexicanas

NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

NOM-001-SEMARNAT-2021, disposición legal emitida por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de México, con el fin de proteger, conservar y mejorar la calidad del agua.

NOM-020-SSA1-2014, que establece los valores límite permisibles de concentración de ozono en el aire ambiente para la protección de la salud humana; así como los criterios para su evaluación.

NOM-022-SSA1-2010, criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.

NOM-023-SSA1-1993, criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al Bióxido de Nitrógeno (No₂). Valor normado para la concentración de Bióxido de Nitrógeno (No₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.

NOM-025-SSA1-2014, que establece los valores límite permisibles de concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y los criterios para su evaluación, con la finalidad de proteger la salud de la población.

NOM-025-SSA-1993, que establece el valor permisible para la concentración de partículas menores de 10 micras en el aire ambiente.

NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de estos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece el procedimiento para identificar si un residuo es peligroso, el cual incluye los listados de los residuos peligrosos y las características que hacen que se consideren como tales.

NOM-053-ECOL-1993, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

NOM-083-SEMARNAT-2013, que establece las especificaciones de selección del sitio, el diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

NOM-127-SSA1-1994, que establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

NOM-156-SEMARNAT-2012, que especifica las condiciones mínimas que deben ser observadas para el establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire.

Contenido

Introducción	8
RESA El Salto, Jalisco	11
RESA Guanajuato	29
RESA Norte del Estado de México-Sur del Valle del Mezquital	36
RESA Puebla-Tlaxcala	45
RESA Istmo Veracruzano	56
Consideraciones finales sobre las investigaciones acopiadas en esta etapa	65

Introducción

Este documento es el resultado del trabajo realizado durante de 2023 enfocado en la búsqueda, selección, clasificación, análisis y reseña de documentos científicos que revelan los daños ambientales y a la salud humana derivados de la exposición a agentes tóxicos, principalmente en las Regiones de Emergencia Ambiental (RESA) que están siendo estudiadas por el Pronaces Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes, para incluirlos en el Macroexpediente Científico (etapa 3) como parte del robustecimiento del diagnóstico del daño toxicológico en México. En este sentido, el presente documento acopia las investigaciones científicas de tres tipos: 1) las que han identificado sustancias con potencial tóxico en agua, suelo y aire; 2) las que asocian la exposición ambiental a sustancias tóxicas con algunas enfermedades; 3) Ensayos de degradación de algunos contaminantes previamente identificados en las matrices ambientales.

La mayor parte de los estudios evalúan las concentraciones identificadas con normas oficiales mexicanas que establecen los límites de esas sustancias en las matrices estudiadas. En los casos en los que no existen, se las compara con algunos lineamientos internacionales.

La mayor parte de estudios han sido diseñados con muestras pequeñas, presentan resultados de monitoreos puntuales realizados en las denominadas Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental: El Salto, Jalisco; Guanajuato; El Valle del Mezquital Norte; Puebla-Tlaxcala; y el Istmo Veracruzano en el período de 1999 a 2022.

Para esta síntesis se recuperaron investigaciones publicadas en revistas arbitradas, así como tesis y artículos de revisión, por lo que contiene documentos de diversas calidades. Algunos aportes residen en los resultados del análisis de muestras de suelo, aire y agua, por lo que ofrecen un panorama puntual de los contaminantes en estas matrices, mientras que otras investigaciones aportan información territorial relevante para formular hipótesis de la dispersión de las sustancias tóxicas identificadas.

Consolidación del Pronaces Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes 2023

La mayor parte de las investigaciones aquí sintetizadas son resultado de campañas de muestreo de la calidad del agua de ríos, lagunas o arroyos; así como de calidad del aire o de muestras de suelos agrícolas y sedimentos de los ríos; los análisis de laboratorio fueron a menudo realizados en universidades públicas y otros, como los realizados por la Organización No Gubernamental Greenpeace en el Istmo, los cuales fueron realizados en laboratorios extranjeros acreditados internacionalmente.

Mientras que los estudios para identificar contaminantes tóxicos en agua suelo y aire ocupan la mayor parte de la investigación en México, estudios de salud del tipo dosis-respuesta son incipientes, excepto en algunas regiones del norte que, de momento, no se encuentran entre las primeras investigadas por el Pronaces, pertenecientes al eje Neovolcánico.

Esta síntesis ofrece elementos para conocer la exposición a sustancias tóxicas en las RESA y al mismo tiempo, aporta elementos para evaluar la brecha entre las sustancias comercializadas en todo el país, listadas en el Inventario Nacional de Sustancias Químicas, que en su edición de (2021) identificó 5,852, mientras que en los estudios revisados en esta edición del Macroexpediente, el análisis más completo fue uno de calidad del aire realizado por el INECC en la zona metropolitana de Guadalajara, el cual identificó 97 sustancias, y en el suelo se han identificado en promedio 10 sustancias.

La investigación de cada región se presenta en un apartado y al final del mismo se ofrecen algunas consideraciones sobre el estado del arte y los resultados de los análisis de suelos, agua, aire y salud ambiental. En su conjunto, la síntesis contribuye a establecer un conjunto de georreferencias con las concentraciones puntuales de las sustancias identificadas y aunque son muestreos únicos de pequeña escala, aportan información importante sobre la exposición ambiental a dichas sustancias.

Consolidación del Pronaces Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes 2023

Más allá de los resultados puntuales en cada región y en cada matriz ambiental, el Macroexpediente contribuye a documentar la afectación tanto en aire como agua, suelo y sedimentos, así que los resultados deberían ser evaluados en su conjunto. La evidencia encontrada da cuenta de las múltiples afectaciones al ambiente de estas regiones.

Ello contribuye a la caracterización de las mismas como Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental, que además de estar afectadas por la contaminación, albergan actividades económicas de larga data, ejemplo de ello es la actividad minera en Guanajuato, cuyo horizonte temporal de contaminación es de siglos, pues los contaminantes que se produjeron siguen liberándose en la actualidad.

Algo similar cabe esperar de los contaminantes que se liberan actualmente, pues algunos de ellos, como los pesticidas, son persistentes y es de esperarse que permanezcan mucho tiempo en el ambiente, y que su potencial tóxico se potencie por su mezcla con otras sustancias.

Es de esperarse también que las actividades productivas y la producción de residuos urbanos continúe e incluso crezca en estas regiones, por lo que se vuelve imprescindible contar con normatividad actualizada para regular la contaminación.

Entre los procesos contaminantes que confluyen en estas RESA se encuentran los agroindustriales, urbanos e industriales. Otras fuentes importantes de contaminación documentadas en esta síntesis son los accidentes industriales, particularmente los ligados a hidrocarburos, así como las descargas clandestinas de residuos industriales y los rellenos sanitarios.

Los materiales recabados durante la etapa 3 de integración del Macroexpediente Científico pueden consultarse dirigiéndose a:

<https://mega.nz/folder/oGV2GCIC#NmEnbCMfPbF7rzjZ28R9ZQ>

RESA El Salto, Jalisco

Las investigaciones científicas sobre esta región ofrecen evidencia científica sobre la problemática de contaminación ambiental en la zona metropolitana de Guadalajara (ZMG), integrada por ocho municipios San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Zapopan, Tlajomulco de Zúñiga, El Salto, Juanacatlán, Ixtlahuacán de los Membrillos y Guadalajara, además de los municipios de Ocotlán, Poncitlán y Zapotlán del Rey. En su conjunto, estos 11 municipios conforman la RESA y en ellos confluye una intensa densidad poblacional, agroindustrial e industrial ligadas a la contaminación de la región.

Los documentos reunidos en esta etapa abordan las problemáticas de contaminación de los cuerpos de agua superficial como el río Santiago, el Lago Chapala y el de Cajititlán, en los que se tomaron muestras de agua para su análisis e identificación de contaminantes de riesgo para la salud como metales pesados y plaguicidas.

Los análisis de calidad del aire están presentes en esta etapa; la calidad de estos es diversa, mientras algunos cuantifican partículas suspendidas, otros las analizan para identificar su composición.

Otra temática presente es la exposición ambiental de la población materno-infantil a plaguicidas, y de la población general a organismos patógenos asociados a padecimientos respiratorios. Por último, también se analizaron las tasas de mortalidad por causas específicas en la región y se compararon con las medias estatales.

Contaminación de los cuerpos de agua superficial

El río Santiago ha sido durante décadas receptor de aguas residuales industriales y es el más estudiado de la región, sin embargo, en los estudios acopiados en esta etapa se presentan los resultados de muestreos singulares sobre el río verde, la presa Arcediano y el lago de Cajititlán.

El río Santiago atraviesa los municipios de El Salto y Juanacatlán, los más densamente industrializados de la región, además de Ixtlahuacán de los Membrillos y Ocotlán y Poncitlán.

La presencia de metales pesados como cromo, cobre, zinc, manganeso, níquel, hierro, aluminio y, en menor medida, óxidos de manganeso, fueron identificados en los sedimentos de cinco estaciones de muestreo a lo largo del río Santiago en su confluencia con el río Verde, en la presa Arcediano, y en las localidades de Colimilla, Matatlán y Zapotlanejo. La producción de mezclas se propicia por las características fisicoquímicas del río como turbidez, demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DBQ), sólidos suspendidos totales (SST) y la concentración de nitritos y nitratos (Hansen y González-Márquez, 2010; McCulligh-DeBlasi, Páez-Vieyra y Moya-García, 2007; Rodríguez-Pérez, 2007). Diversos autores plantean la alta exposición ambiental a los contaminantes del río, particularmente de las poblaciones ribereñas de los municipios de Juanacatlán y El Salto, pues el 90% de sus habitantes viven en un radio de 5 km del río (Montes-Rubio et al., 2021).

Estudios de Salud

Los estudios de salud se orientaron al análisis de las tasas de mortalidad municipal, a la asociación entre contaminación atmosférica y enfermedades respiratorias y a la asimilación de plaguicidas por parte de grupos de población específicos.

Los datos de mortalidad en los municipios de El Salto y Juanacatlán permitieron concluir que en ellos se concentraron muertes por diversas causas: se documentaron altas tasas de mortalidad específica entre 1998 y 2010 por enfermedades infecciosas de tipo intestinal, hipertensivas y crónicas de las vías respiratorias superiores. Mientras que en Juanacatlán la mortalidad a causa de diarreas y gastroenteritis de presunto origen infeccioso, enfermedad renal hipertensiva, estado asmático e insuficiencia renal no especificada fueron superiores a la media estatal entre 2007 y 2010, en el municipio de El Salto se observó un incremento en las tasas de mortalidad a causa de enfermedad renal hipertensiva, insuficiencia renal crónica e insuficiencia renal no especificada. Tanto en El Salto como en Juanacatlán, las tasas de mortalidad por tumores malignos del sistema digestivo, leucemia linfóide, malformaciones congénitas y cáncer de mama superaron la media estatal, para los autores, estas patologías se asocian a diversos eventos como el incendio del basurero Los Laureles en 2006, próximo a estos dos municipios que habría generado dioxinas y furanos pues el incendio tuvo una duración de 6 días. (Montes-Rubio, 2021: 1225).

Este evento puntual de contaminación del aire en Tonalá se suma a la permanente emisión de gases en ese mismo basurero y a la cotidiana contaminación atmosférica en la zona metropolitana de Guadalajara, la cual se asoció al desarrollo de infecciones agudas de las vías respiratorias en niños menores de cinco años del área urbana de Guadalajara, esto ha sido documentado mediante el análisis de datos colectados en 65 unidades de atención médica del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE) y 34 centros de salud urbano de la Secretaría de Salud de Jalisco. El estudio confirmó una correlación positiva entre visitas al hospital por infecciones respiratorias agudas y ozono, así como dióxido de carbono y de nitrógeno (Ramírez-Sánchez et al., 2006).

Los efectos de la contaminación atmosférica en la población infantil de la capital fueron confirmados por Torres-González et. al.,(2014) mediante un análisis de la salud pulmonar de 71 estudiantes de educación primaria de una escuela ubicada a 300 metros del cauce del río Santiago en la cabecera municipal, y confirmó que el 30% padecían enfermedad restrictiva pulmonar, el estudio también identificó en las partículas atmosféricas la presencia de bacterias patógenas para el sistema respiratorio como *Streptococcus pneumoneae*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoneae* y *Pseudomona aeroginosa*. (Ibid). Estos eventos de salud pública son similares a los reportados por Hernández-Raygoza et al. (2020), que identificaron deficiencias en la función pulmonar de 302 adolescentes expuestos a contaminantes del aire en la zona metropolitana de Guadalajara. Los resultados de la medición de su capacidad vital forzada (FVC) confirmaron anormalidad de la función pulmonar en aquellos individuos que vivían en zonas en las que se identificaron concentraciones elevadas de PM10 y Ozono (Hernández-Raygoza et al., 2020).

Otros elementos que componen las partículas atmosféricas y que se encuentran en forma simple o en compuestos en el aire de esta región son los metales pesados, respecto de los cuales, diversos estudios han señalado que la exposición crónica a éstos induce daños celulares como estrés oxidativo, fallas en la replicación y reparación del ADN, así como cambios en la expresión de genes involucrados en el ciclo metabólico e incluso apoptosis.

Debido a su potencial clastogénico, inducen un aumento en la frecuencia de micronúcleos (MN)¹ y otras anomalías nucleares (NA) como yemas nucleares (NBUD), células binucleadas (BN), núcleos picnóticos (PN), cariorrexis (KX), cariólisis (KL) y cromatina anormalmente condensada (CC). En las proximidades del río Santiago se han verificado este tipo de daños celulares en muestras tomadas a un grupo de población ambientalmente expuesta: (Gómez-Meda et al, 2017), evaluaron la presencia de micronúcleos y anomalías nucleares en células de la

¹ Las siguientes siglas se refieren a mutaciones génicas por sus siglas en idioma inglés.

mucosa bucal de 150 participantes que habitaban en poblaciones de 4 municipios aledaños al río Santiago: El Salto, Juanacatlán, Ocotlán y Paso de Guadalupe, así como de su afluente, el río Zula, en la localidad de La Barca. El estudio comparó la presencia y tipo de daños citotóxicos de la población expuesta con la calidad celular de población no expuesta. Estos resultados confirman el potencial citotóxico de los metales pesados identificados en el caudal del río Santiago, sin embargo, concluyen que no pueden ser evaluados los efectos de las mezclas producidas por dos o más contaminantes presentes en el caudal del río. (Gómez-Meda et al., 2017).

Respecto de contaminantes frecuentemente asociados con daños a la salud se encuentran los generalmente monitoreados como PM₁₀, PM_{2.5} ozono, y dióxido de nitrógeno, ligados también a daños citotóxicos y genotóxicos. Estos contaminantes y los daños referidos han sido confirmados en un estudio realizado en 80 jóvenes residentes en tres zonas altamente contaminadas de Jalisco: Tlaquepaque, Miravalle y las Pintas. En las tres zonas los jóvenes estuvieron expuestos a altos niveles de contaminación atmosférica y se verificaron distintos grados y tipos de citotoxicidad así como marcadores tempranos y tardíos de muerte celular (CC, KX, PN, y K y daño genotóxico) (González-Santiago et al., 2021).

Los riesgos para la salud asociados a contaminantes atmosféricos específicos y generalmente monitoreados como monóxido de carbono, dióxido de carbono y azufre han sido confirmados en los estudios piloto acopiados en esta etapa del Macroexpediente. Estos estudios realizados entre 2008 y 2021 permiten confirmar los potenciales riesgos para la salud por estos contaminantes durante la última década. Todos los análisis se realizaron en muestras pequeñas que no excedieron los 94 individuos analizados, todavía resultan incipientes los estudios que proyectan la dispersión y efectos espacio-temporales de los contaminantes y los efectos de sus mezclas.

Contaminación atmosférica

En los últimos años se ha incrementado el número de empresas industriales en la ZMG, lo que ha producido el incremento de la emisión de gases industriales al aire, por lo que a partir de 1993, la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (Semadet), puso en marcha la Red Automática de Monitoreo del área Metropolitana de Guadalajara (Ramag), que opera 9 estaciones ubicadas en Guadalajara, Tlaquepaque, Tonalá, El Salto y Zapopan (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Inecc, 2015).

Con esta red de monitores, el Inecc realizó un estudio para identificar los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) en el aire de la ZMG en cinco sitios: Centro y Oblatos (Guadalajara), Loma Dorada (Tonalá), Las Águilas (Zapopán) y Las Pintas (El Salto), con el objetivo de determinar las especies de contaminantes orgánicos y la concentración de estos. De los 97 compuestos identificados, el cloroformo, tetracloruro de carbono, 1,2-dibromoetano y benceno excedieron los límites criterio de 24 horas de calidad ambiental según los estándares internacionales canadienses (Ambient Air Quality Criteria: AAQCs, 2012).

Los valores reportados para el cloroformo en las cuatro zonas reportaron valores superiores al valor criterio (0.19 ppbV), en el sitio Las Águilas la concentración fue de 1.36 ppbV, 0.73 ppbV en Las Pintas, 0.63 ppbV en Oblatos y 0.54 ppbV en el Centro.

En cinco estaciones se excedió el valor criterio (0.35 ppbV) de tetracloruro de carbono 2.07 ppbV en Loma Dorada, 1.95 ppbV en Las Águilas, 2.17 ppbV en Las Pintas, 1.95 ppbV en Oblatos y 2.29 ppbV en el Centro.

Respecto de la concentración de 1,2-dibromoetano se excedió el valor criterio de 0.37 ppbV en tres sitios con 0.76 ppbV en Las Pintas, 0.63 ppbV en Oblatos y 0.82 ppbV en el Centro.

Las concentraciones de benceno se compararon con las establecidas por la normativa canadiense, los Ambient Air Quality Criteria (AAQCs) que es de 0.68 ppbV. Este límite se excedió en los cinco sitios: Loma Dorada, 3.07 ppbV, Las Águilas, 2.83 ppbV, Las Pintas 2.68 ppbV, Oblatos 2.93 ppbV y en el Centro 3.00 ppbV.

Los datos obtenidos en este estudio indican que la contaminación con COV en los cinco sitios estudiados, provienen principalmente de las emisiones vehiculares e industriales (Inecc, 2015). La identificación de estos compuestos en la atmósfera es de gran relevancia porque da cuenta del riesgo mutagénico y cancerígeno al que está expuesta la población de la RESA.

Otros estudios confirman las altas concentraciones de partículas atmosféricas en la ZMG (Saldarriaga-Noreña et al., 2009 y 2011), analizó las concentraciones de éstas en el Centro y Sur de la ciudad de Guadalajara, ambas regiones evidenciaron la concentración de emisiones provenientes de las actividades industrial y vehicular. La concentración media anual de $PM_{2.5}$ fue de 44.1 mg/m^3 para el Centro y 52.8 mg/m^3 para Miravalle, mientras que los promedios anuales de $PM_{2.5}$ en Centro y Miravalle fueron 2.9 y 3.5 veces superiores, respectivamente, superiores al máximo permitido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-025-SSA-1993) para el período de un año.

Entre los elementos que componen las partículas se encuentran Ca, Fe, Zn, Mg y Pb. El sitio Miravalle próximo a una zona industrial presentó concentraciones anuales de Ca mayores a 1,013.9 ng/m^3 , 74.9 ng/m^3 de Pb, 28.2 ng/m^3 de Cu, 9.4 ng/m^3 de Cr, 6.3 ng/m^3 de Sr, 4.4 ng/m^3 de Ni, 1.0 ng/m^3 de Mo, 628.0 ng/m^3 de Fe, 23.7 ng/m^3 de Mn y 4.6 ng/m^3 de Sb. Para estos contaminantes no existe normatividad aplicable, pese a que la OMS ha reportado que 3.7 millones de muertes se asocian a la contaminación atmosférica en todo el mundo (WHO, 2014).

Respecto a las posibles fuentes de los elementos más abundantes que se identificaron, el estudio infiere que el Fe, Mg, Zn y Pb provienen tanto de fuentes naturales y antropogénicas, mientras que elementos como el Cu, Cr, Mo, Ni, Pb, Zn, Sb, Cu, Pb y Zn provienen la quema de biomasa, y otros, como As, Cd, Cu, Ni y Zn están asociados a procesos metalúrgicos. Una parte de las emisiones Pb, Fe, Cu, Zn, Ni y Cd, provienen de la quema de gasolina o diésel mientras que la abrasión de los neumáticos produce Zn.

Los resultados reportados en estos estudios son de suma importancia, ya que la exposición a partículas finas y ultrafinas de metales pesados tiene un impacto importante sobre la salud humana, ya que, por su tamaño, penetran fácilmente en el tracto respiratorio, llegando a la región alveolar de los pulmones, generando una serie de complicaciones a la salud (Saldarriaga-Noreña et al., 2009 y 2011).

Los metales mencionados forman fácilmente mezclas o aleaciones con otros metales y los reportes de su presencia en la región datan al menos de una década, desde 2011 (Hernández-Mena, 2011) caracterizó la composición de partículas atmosféricas menores a 2.5 micras ($PM_{2.5}$); las muestras se tomaron entre enero y junio del 2008, y en ellas se identificaron elementos como Pb, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Sb, Se, Sr, Ti, Zn. El autor infirió que los elementos Si, Al, Fe, Ca y K provienen principalmente de fuentes geológicas, mientras que los elementos Zn, Pb, Cu y Ni provienen principalmente de fuentes antropogénicas, además de que la re-suspensión de partículas de origen geológico por el tráfico vehicular y el viento también contribuyen a la composición elemental de PM en la ciudad (Hernández-Mena et al., 2011).

En esta etapa se recabó un estudio que sugiere un patrón de distribución espacio-temporal de los contaminantes atmosféricos, monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), partículas menores a 10 micras (PM_{10}) y ozono (O_3) durante el periodo 2000 al 2005, en el Área Urbana de Guadalajara (Ramírez-Sánchez et al., 2016). Los agentes contaminantes con las concentraciones más altas fueron PM_{10} con 265,42 g/m^3 ; Ozono con 0,11 ppm; dióxido de nitrógeno con 0,11 ppm; monóxido de carbono con (9,17 ppm) y dióxido

de azufre con 0,05 ppm. Los resultados permitieron confirmar que 93 de 199 días del año se excedieron las concentraciones de estos contaminantes establecidas en las normas de calidad del aire (Sánchez, et al, 2009).

En el extremo sureste de la ZMG se encuentran los municipios de El Salto y Juanacatlán que se caracterizan por el paso del río Santiago y por alojar el corredor industrial El Salto-Ocotlán, en el que se asientan cerca del 90% de las empresas industriales de los sectores automotriz, alimenticio, electrónico, metalmeccánico, farmacéutico, textil, metalúrgico, y de la química básica de la entidad.

Sobre esta base, se evaluó la concentración de ácido sulfhídrico (H_2S) en el periodo del 2004 al 2005 en esta zona, ésta osciló entre 2 y 7 ppm, lo que puede deberse a la mezcla de efluentes industriales y materia orgánica en el río. Este compuesto tiene efectos adversos sobre la concentración mental y sobre el sistema nervioso central; entre las manifestaciones más comunes por exposición a ella se cuentan: fatiga, ansiedad e incluso la disminución de la capacidad física y psicológica de la población expuesta. Complementariamente, la investigación realizó una encuesta sobre percepción de olor y malestar de la población infantil que habitó los municipios de Juanacatlán y El Salto; de 161 incluidos en el estudio, la totalidad de ellos ha tenido padecimientos respiratorios, de la piel y otros numéricamente menos significativos, de acuerdo con sus tutores, de éstos, el 31% atribuyó los malestares a la proximidad con el río. (Gallardo-Valdez, 2005; González-Martínez, 2009).

Contaminación asociada a la producción agroindustrial

La región cuenta también con una importante extensión dedicada a la agricultura. El principal efecto negativo de esta actividad es la dispersión de agroquímicos, que se han asociado con diversos daños a la salud humana como malformaciones congénitas, hepatitis, discapacidad mental, y varios tipos de cáncer como leucemia, cáncer de piel, cáncer de mama y tumores cerebrales, así como un elevado riesgo de sarcoma de tejidos blandos (Guzmán-Plazola et al., 2016). Entre los efectos adversos sobre el medio ambiente se encuentran la pérdida de fertilidad de suelo, su bioacumulación en algunos organismos vivos, y su biotransferencia, posibilitada por su elevada liposolubilidad y su resistencia a la descomposición ante agentes físicos, químicos y biológicos.

Estos compuestos escasamente se biotransforman en los organismos animales, y en los casos en los que se degradan, sus metabolitos suelen conservar su actividad tóxica, como lo confirma un estudio realizado en la región (Martínez-Severiano, P. et al., 2007) en el que se cuantificaron las concentraciones de residuos de plaguicidas en 60 muestras de leche de madres que amamantaban a sus hijos y habitaban en la zona metropolitana de Guadalajara. El 31.6% de las muestras presentaba Alfa+ Beta HCH, el 6.66% gamma-HCH el 18.33% Aldrin+Dieldrin, 21.66% heptacloro epóxido+ Heptacloro, 37% DDT y 100% DDE. (Castañeda-Flores, Real-Navarro, y Noa-Pérez 2006; Martínez-Severiano, et. al., 2007). La determinación de plaguicidas en la leche materna reviste en la actualidad particular importancia pues evidencia la exposición de los lactantes, lo que puede determinar en parte su desarrollo y salud renal futuros.

La presencia de plaguicidas en la leche materna ha sido también confirmada en un estudio realizado en 94 mujeres embarazadas que habitaban en la riberas del lago Chapala en las localidades de Jocotepec, el Molino y Chapala; en la leche se identificaron HCH (García-Ramírez, 2015). Estos hallazgos confirman los reportados por Lozano-Kasten et al., en el 2012, que aislaron plaguicidas en la sangre de 34 mujeres embarazadas también de la comunidad de Chapala. Los

resultados reportados en estos dos estudios confirman la exposición de mujeres embarazadas y lactantes a plaguicidas organoclorados, y por tanto un posible riesgo a la salud de la población materno-infantil (Lozano- Kasten et al., 2012).

La actividad agroindustrial y urbana son fuentes de contaminación también del lago Cajititlán, cuya una extensión aproximada es de 201.8 Km², y se ubica en el municipio de Tlajomulco de Zuñiga. Este lago recibe residuos de fertilizantes procedentes de la agricultura y aproximadamente 2,3 Hm³ al año de aguas residuales mal tratadas de tres plantas tratadoras municipales (Gradilla-Hernández et al., 2020). El estudio registró las variaciones espaciales y temporales de la calidad del agua en el período 2009 al 2018 a partir de la medición de 13 parámetros de calidad; entre los excesos más importantes se encontró una concentración de SDS de 582mg/dL, PH de 9.9.

Entre los hallazgos más importantes de otro estudio se encuentra la alta alcalinidad del agua, con un pH de hasta 9.9, elevadas concentraciones de solidos totales disueltos 582mg/dL, y de nitritos, nitratos y amoniaco. El análisis de sedimentos en 11 sitios de monitoreo en la zona permitió identificar elementos como Al, Fe, Mn, Zn, Cu, y Cr. Los metales más abundantes fueron Al (49.845,45 ± 9123,13 mg/kg), Fe (31.800,00 ± 3991,27 mg/kg) y Mn (416,04 ± 123,62 mg/kg) los valores más altos. (de Anda et al., 2019).

El uso de plaguicidas en el estado de Jalisco, particularmente en la región Costa Sur y Sierra de Amula, aporta residuos potencialmente peligrosos de origen industrial (residuos líquidos y aerosoles del procesamiento de la caña de azúcar y aceites residuales principalmente) y agrícola (pesticidas de amplio espectro y envases de agroquímicos), los cuales se han acumulado desde hace más de 25 años por efecto de las actividades agrícolas que se desarrollan en la región principalmente en los municipios de El Limón, El Grullo y Autlán de Navarro, reportándose en este último, un aumento de intoxicaciones por plaguicidas. Según los reportes del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), en Jalisco se han registrado 31.257 casos de intoxicaciones agudas por plaguicidas, mientras el

promedio anual nacional fue de 3.126, durante el periodo 2004-2011, en Autlán de Navarro se reportaron 459 casos de intoxicación aguda para el mismo período (Ibid).

En una encuesta realizada a agricultores del municipio, 19 de 24 ejidatarios manifestaron malestares que asocian al uso de plaguicidas. Entre los mayormente empleados declararon Lannate (Metomilo: S-Metil-N- metilcarbamoil oxi - tioacetamidato), Tamarón (Metamidofos: O, S-Dimetil fosforoamidotioato) y Furadán (Carbofuran: 2, 3-dihidro-2, 2-dimetil-7-benzofuranil-metil carbamato).

La región de La Ciénega en Jalisco, conformada por 9 municipios (Atotonilco el Alto, Ayotlán, Degollado, Jamay, La Barca, Ocotlán, Poncitlán, Tototlán y Zapotlán del Rey) se ubica en la región hidrológica Lerma-Santiago en la cuenca Lerma-Chapala. Esta zona es un referente agrícola importante para la producción de maíz, sorgo y trigo, entre otros granos, por lo que el uso de plaguicidas para el control de plagas es elevado. Salazar- Flores et al., (2020) evaluaron el riesgo laboral asociado al uso de plaguicidas en 113 habitantes laboralmente expuestos en la región en el periodo 2017-2018. Los plaguicidas más utilizados fueron terbufos (18.7%), carbofuran (21.4%), fipronil (8.2%), α -cipermetrina (3.6%) glifosato tipo herbicida (8.5%) y paraquat (19.02%) y en menor porcentaje, se reportaron otros plaguicidas todos ellos con un tiempo de exposición ocupacional promedio de 35.3 años.

En los participantes voluntarios del estudio se identificaron marcadores de estrés oxidativo (glutación reducido GSH, glutación oxidado GSSG, grupos carbonilo, metabolitos del óxido nítrico y peróxidos lipídicos) y la alteración de la fluidez de la membrana mitocondrial. También se encontró una correlación positiva entre la exposición a plaguicidas organofosforados y carbamatos y el aumento en la lipoperoxidación y alta fluidez de la membrana mitocondrial, así como una disminución en la concentración de GSH y GSSG. Estos datos son de gran importancia, ya que pueden explicar el aumento de la oxidación celular y por lo tanto, representan un factor de riesgo en el aumento de enfermedades neurodegenerativas y cáncer en los pobladores de la Ciénega (Salazar-Flores et al. 2020).

Por último, en el ejido de Nextipac, perteneciente al municipio de Zapopan, Jalisco, en el que se cultiva maíz se realizaron análisis a 25 voluntarios varones expuestos principalmente a clorpirifos, terbufos, metamidofos, atrazina, carbofuran y toxafeno, después del análisis de laboratorio se confirmaron alteraciones en las concentraciones de sus parámetros hematológicos (eritrocitos, hematocrito y hemoglobina), hepáticos (bilirrubina directa, fosfatasa alcalina, transaminasa glutámico oxalacética y transaminasa glutámica pirúvica) (Payán- Rentería, 2009).

Consideraciones

Es recomendable que en la ZMG se desarrollen las capacidades para monitorear compuestos orgánicos volátiles atmosféricos a largo plazo, así como ampliar la cobertura de la Red hacia los corredores industriales, implementando un inventario de emisiones de hidrocarburos tóxicos, así como la utilización de reactivos que permita identificar las principales fuentes de emisión.

Pese a que las concentraciones de algunos contaminantes se mantienen por debajo de las normas oficiales mexicanas, contaminantes como el monóxido de carbono y el dióxido de nitrógeno sobrepasan dichos límites e inciden negativamente en la salud de la población infantil del área urbana de Guadalajara. Aunque las concentraciones promedio no rebasan la normatividad establecida, sí lo hacen los máximos registrados; esto permite concluir que si bien en la mayor parte del día no hay una exposición potencial de riesgo para la población a los contaminantes, sí existe exposición potencial para la población al aire contaminado con concentraciones fuera de la norma durante algunas horas de ciertos días, lo cual puede influir de manera significativa en el incremento de infecciones agudas de las vías respiratorias superiores.

Así mismo debido al uso indiscriminado de plaguicidas utilizado en diversas zonas de Jalisco, y la presencia de estos en diversas matrices biológicas, como la leche materna, es importante sistematizar la investigación de su transferencia y bioacumulabilidad.

Además, como se ha descrito en este documento, la mayoría de estos contaminantes se ha asociado a una serie de afecciones a la salud humana, por lo que es importante generar políticas públicas, para disminuir los valores normativos, así como implementar medidas de salud, en materia de prevención, intervención y seguimiento.

Referencias

- de Anda, J., Gradilla-Hernández, M. S., Díaz-Torres, O., de Jesús Díaz-Torres, J., & de la Torre-Castro, L. M. (2019). Assessment of heavy metals in the surface sediments and sediment-water interface of Lake Cajititlán, Mexico. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-13.
- Castañeda Flores, José de Jesús, Mario Real Navarro, y Mario Noa Pérez. (2006). Monitoreo de Plaguicidas Organoclorados En Leche Materna de La Zona Metropolitana de Guadalajara. *Avance en la Investigación Científica en el departamento de salud pública, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias CUCBA*.
- Gallardo Valdez Juan. (2005). Estudio Ambiental de Ácido Sulfhídrico Como Contaminante Del Aire En Las Comunidades de Juanacatlán y El Salto Jalisco, 2004-2005. *Universidad de Guadalajara*.
- García Ramírez, Diana Citlalli. (2015). Efecto de La Exposición Materno Infantil al Plaguicida Hexaclorociclohexano y su Relación Con Obesidad Infantil (2 a 5 Años) En Chapala, Jocotepec y El Molino, Jalisco, México. 2014-2015. *Maestría en Ciencias de la Salud Ambiental, Universidad de Guadalajara*.
- Gómez-Meda, B. C., G. M. Zúñiga-González, L. V. Sánchez-Orozco, A. L. Zamora-Perez, J. P. Rojas-Ramírez, A. D. Rocha-Muñoz, A. A. Sobrevilla-Navarro, M. A. Arellano-

Avelar, A. A. Guerrero-de León, J. S. Armendáriz-Borunda, and M. G. Sánchez-Parada. (2017). Buccal Micronucleus Cytome Assay of Populations under Chronic Heavy Metal and Other Metal Exposure along the Santiago River, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment* 189(10). doi: 10.1007/s10661-017-6237-3.

González Martínez, Paulina, y Eduardo Hernández. (2009). Impactos de La Contaminación Del Río Santiago En El Bienestar de Los Habitantes de El Salto, Jalisco. *Espacio Abierto, Cuaderno Venezolano de Sociología*, 18(4):709–29.

González-Santiago, Ana Elizabeth, Guillermo Moisés Zúñiga-González, Belinda Claudia Gómez-Meda, Francisco Javier Gutiérrez-Corral, Ana Lourdes Zamora-Perez, and María Guadalupe Sánchez-Parada. (2021). Cytogenotoxicity Evaluation of Young Adults Exposed to High Levels of Air Pollution in a Mexican Metropolitan Zone Using Buccal Micronucleus Cytome Assay. *BioMed Research International* 2021. doi: 10.1155/2021/6630861.

Gradilla-Hernández, Misael Sebastián, José de Anda, Alejandro Garcia-Gonzalez, Demetrio Meza-Rodríguez, Carlos Yebra Montes, and Yocanxóchitl Perfecto-Avalos. (2020). Multivariate Water Quality Analysis of Lake Cajititlán, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1). doi: 10.1007/s10661-019-7972-4.

Guzmán-Plazola, Paulina, Rubén Darío Guevara-Gutiérrez, José Luis Olguín-López, and Oscar Raúl Mancilla-Villa. (2016). Perspectiva Campesina, Intoxicaciones Por Plaguicidas y Uso de Agroquímicos. *IDESIA*, 34.

Hansen, Anne M., and Luis C. González-Márquez. (2010). Scenarios of Metal Concentrations in the Arcediano Dam (State of Jalisco, Mexico). *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 45, 99–106

Hernández-Mena, Leonel, Mario Murillo-Tovar, Martín Ramírez-Muñiz, Edith Colunga-Urbina, Iliana De La Garza-Rodríguez, and Hugo Saldarriaga-Noreña. (2011). Enrichment Factor and Profiles of Elemental Composition of PM 2.5 in the City of Guadalajara, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 87(5), 545–49. doi: 10.1007/s00128-011-0369-x.

Hernandez-Raygoza, Roberto, Alberto Tlacuilo-Parra, Valery Melnikov, Oliver Mendoza-Cano, and Alberto Tlacuilo Parra. (2020). Lung Function in Adolescents Exposed to Environmental Contamination and Brickworks in Guadalajara, Mexico. *Indian Pediatrics*, 57, 1139-1142. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13312-020-2069-2>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC, SEMARNAT. (2015). Evaluación de Compuestos Orgánicos Volátiles En La Zona Metropolitana de Guadalajara.

Lozano Kasten, Felipe, Ana Karina García Suarez, Luis Fernando Padilla Segundo, Genoveva Rizo Curiel, Enrique Cifuentes, and Leonardo Trasande. (2012). Exposición Involuntaria de Mujeres Embarazadas al Plaguicida Hexaclorociclohexano (HCH) En Chapala, México 2011-2012. *Waxapa* 2(7).

McCulligh DeBlasi, Cindy, Juan Carlos Páez Vieyra, and Gerardo Moya García. (2007). “Mártires Del Río Santiago.” *Instituto Mexicano Para El Desarrollo Comunitario, A.C.*.

Montes Rubio, Perla Yuridia, Nadia Aguilar Castro, Rosangela Ávila Dominguez, Pedro Macbani Olvera, Miguel Raygoza Anaya, Beatriz Garnica Guerrero, Josefina Reynoso Vázquez, and Jesús Carlos Ruvalcaba Ledezma. (2021). Contaminación Del Río Santiago: Un Problema Epidemiológico Ambiental Persistente de Salud Pública En Jalisco, México. *Journal of Negative and No Positive Results* 6(9): 1222–36.

Patricio Martínez, Severiano. (2007). Monitoreo de Plaguicidas Organoclorados En Leche Materna de La Zona Metropolitana de Guadalajara.” *Universidad de Guadalajara. CUCBA*

Payán Rentería, Rolando Armando. (2009). Evaluación Del Riesgo a La Salud Por Exposición Crónica a Plaguicidas En Trabajadores Agrícolas de Nextipac, Jalisco. Universidad de Guadalajara, Zapopan Jalisco.

Ramírez Sánchez, Hermes Ulises, María Dolores Andrade García, Miguel Ernesto González Castañeda, and Alfredo de Jesús Celis de la Rosa. (2006). Contaminantes Atmosféricos y Su Correlación Con Infecciones Agudas de Las Vías Respiratorias En Niños de Guadalajara, Jalisco. *Salud Pública de México* 48.

Rodríguez Pérez, Beatriz. (2007). Contaminación Por Nitritos y Nitratos En Pozos de Puente Grande y El Salto, Jalisco, México. *Universidad de Guadalajara*.

Salazar-Flores, Joel, Fermín P. Pacheco-Moisés, Genaro G. Ortiz, Juan H. Torres-Jasso, Odette Romero-Rentería, Ana L. Briones-Torres, and Erandis D. Torres-Sánchez. (2020). Occupational Exposure to Organophosphorus and Carbamates in Farmers in La Cienega, Jalisco, Mexico: Oxidative Stress and Membrane Fluidity Markers. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology* 15(1). doi: 10.1186/s12995-020-00283-y.

Saldarriaga-Noreña, Hugo, Leonel Hernández-Mena, Mario Murillo-Tovar, Alberto López-López, and Martín Ramírez-Muñiz. (2011). Elemental Contribution to the Mass of PM 2.5 in Guadalajara City, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 86(5):490–94. doi: 10.1007/s00128-011-0240-0.

Saldarriaga-Noreña, Hugo, Leonel Hernández-Mena, Martín Ramírez-Muñiz, Patricia Carbajal-Romero, Ricardo Cosío-Ramírez, and Benjamín Esquivel-Hernández.

(2009). Characterization of Trace Metals of Risk to Human Health in Airborne Particulate Matter (PM_{2.5}) at Two Sites in Guadalajara, Mexico. *Journal of Environmental Monitoring* 11(4):887–94. doi: 10.1039/b815747b.

Sánchez, Hermes U. Ramírez, María D. Andrade García, Rubén Bejaran, Mario E. García Guadalupe, Antonio Wallo Vázquez, Ana C. Pompa Toledano, and Odila de la Torre Villasenor. (2009). The Spatial-Temporal Distribution of the Atmospheric Polluting Agents during the Period 2000-2005 in the Urban Area of Guadalajara, Jalisco, Mexico. *Journal of Hazardous Materials* 165(1–3):1128–41. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.127.

Torres González G, Javier García Velasco, Felipe Lozano Kasten, Josefina Casas Solis, Alejandro Aarón, Peregrina Lucano, Martha Georgina, and Orozco Medina. (2014). Air Quality and Its Effects on Child Health of a Metropolitan City in Jalisco, Mexico.

WHO (2014). Burden of Disease From the Joint Effects of Household and Ambient Air Pollution for 2012. <https://www.ccacoalition.org/resources/world-health-organization-burden-disease-joint-effects-household-and-ambient-air>

RESA Guanajuato

La así denominada Cuenca de la Independencia o Cuenca del río La Laja se caracteriza por el déficit hídrico y por la presencia de flúor y arsénico en sus aguas, que Ortega (2001) ha atribuido a la sobreexplotación del acuífero y a la extracción de aguas fósiles, que naturalmente están enriquecidas con estos elementos. Autores referidos en ediciones anteriores del Macroexpediente han alertado del enriquecimiento con estos y otros elementos nocivos para la salud.

En esta entrega del macro expediente se acopiaron investigaciones que amplían el panorama territorial de las RESA a zonas aledañas en las que se confirma la expansión de algunos procesos de contaminación de los recursos hídricos.

Los estudios acopiados en esta etapa confirman la presencia de Arsénico y Flúor en los municipios limítrofes con Michoacán y Querétaro (Acámbaro y Jerécuaro) con metales de larga liberación, utilizados hace décadas en la extracción minera.

Además de haber sido un estado de importante actividad minera, se encuentra entre los principales exportadores de productos agrícolas del país, por lo que se realiza también la aplicación intensiva de plaguicidas.

Los estudios contenidos en esta entrega amplían el rango geográfico hacia el centro del estado y hacia la ciudad de Guanajuato.

Metales pesados en las aguas subterráneas y superficiales

La presencia de metales como arsénico en los límites con Michoacán y Querétaro se ha confirmado desde 2013 en un estudio piloto que muestreó agua de uso y consumo humano de seis pozos para evaluar los resultados en referencia a la NOM-127-SSA-1994. En los pozos analizados en las localidades de Cútaró, Palo Blanco, Jaripeo, La Merced, Cazuelejas y Abejitas en los municipios de Acámbaro

y Jerécuaro, Guanajuato, se identificaron flúor y arsénico. Las mayores concentraciones de estos elementos se aislaron en los pozos de Cazuelejas, cuya concentración de flúor fue de 0.9 a 21.2 mg/L, y Cútaró, donde se registró la mayor concentración de arsénico, de <0.001 a 0.083 mg/L.

Asimismo, se ha investigado la calidad del agua de un sistema alternativo para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Guanajuato, conocido como pozos Puenteillas, y de la presa La Purísima y su principal afluente, el río Guanajuato. Debido a la cercanía de algunos de los pozos a la presa, los resultados obtenidos sugieren el riesgo de migración de contaminantes desde la presa hacia el acuífero que abastece de agua a dichos pozos, en los cuales se detectó la presencia de fósforo total en cantidades que sobrepasan alrededor de 20 veces el límite máximo permisible para considerar el agua como potable (Cano-Rodríguez et. al., 2000).

A pesar de no haber identificado metales en los pozos, sí se encontró en el agua y sedimento tanto del río como de la presa. En la presa, los límites de metales detectados sobrepasaron el límite máximo permisible para considerar el agua apta para la protección de la vida acuática, en 25, 30, 80 y 180 veces para el As, Pb, Hg y Se, respectivamente; mientras que el punto de confluencia del río Guanajuato con la presa, sólo el As se detectó en mayor concentración a las antes mencionadas. El Cr sólo se detectó en los sedimentos.

Metales pesados en la atmósfera

La calidad del aire se ve afectada por la concentración, generalmente elevada de mercurio elemental gaseoso en Guanajuato, México. De acuerdo con Loria et. al. (2022), la presencia de este metal se asocia a la refinación de plata por amalgamación de mercurio, aún siglos después de que ocurrió el proceso.

Entre los aportes de mercurio al ambiente se encuentra la lenta liberación del acumulado durante la explotación de plata (Ag) realizada entre los siglos XVI y XIX, el mercurio proveniente de estos procesos fue capturado en forma de calomelanos (Hg_2Cl_2) y permaneció en el entorno local por siglos.

Así, el mercurio utilizado hace siglos en el Distrito Minero de Guanajuato en México continúa elevando las concentraciones actuales de gas de mercurio elemental (GEM) en toda la región. El GEM osciló entre 8 y 454 ng m^{-3} , superando el promedio del hemisferio norte ($\sim 1,4 \text{ ng m}^{-3}$) en hasta dos órdenes de magnitud. Concentraciones mucho más altas, hasta 44.700 ng m^{-3} , se encontraron en el aire intersticial de desechos minerales reprocesados, sedimentos y suelos. De acuerdo con este grupo de científicos, los elevados valores actuales de GEM se deben, al menos en parte, a la desproporción del calomelano heredado, y esto lo confirma el hallazgo de Hg en los desechos mineros reprocesados.

Contaminación de las aguas superficiales con metales y micro plásticos

Al flúor y arsénico se suma la contaminación con microplásticos (MP), definidos como polímeros sintéticos con un tamaño menor a los 5 mm. (Elizarraraz-Cabrera et al., 2022), identificaron microplásticos tres zonas de la Cuenca del río Guanajuato, dependiendo de la altitud y ubicación:

- Cuenca baja (< 1900 m s.n.m.).
- Cuenca media (1900-2200 m s.n.m.).
- Cuenca alta (2201-2500 m s.n.m.).

En la cuenca alta se realizaron muestreos de agua superficial en Rancho en la Sierra de Santa Rosa y dos sitios en el Área Natural Protegida de Las Palomas. En la cuenca media se tomaron muestras en la presa de Los Santos, Presa de la Olla y Presa de la Soledad. Y en la cuenca baja se colectaron muestras en cuatro sitios: Molineros, Capulín, Chapin y Trinidad. En las tres cuencas se aislaron y caracterizaron un total de 1,370 MP.

La cuenca media fue la que presentó la mayor abundancia de MPs con 624 (45.5%), seguida de la cuenca alta con 470 MP (34.3%), y finalmente, la cuenca baja con 276 MP (20.15%). Además, en los sitios de estudio de cada una de las cuencas se observaron diferencias en las abundancias de MP: en la cuenca media, el sitio con mayor cantidad de MP fue la presa de la Soledad con 337 MP. Mientras que, en la cuenca alta fue el sitio Palomas 2, y en la cuenca baja fue en el sitio denominado como Capulín. No se identificó diferencia significativa en el tamaño de los MP encontrados en las tres cuencas ($p > 0.05$); tampoco una asociación entre la altitud de la cuenca y la abundancia de MP ($p > 0.05$).

Siguiendo con la revisión de trabajos que estudian la contaminación de agua por metaloides, (Ramos-Arroyo et al., 2017) realizaron el estudio **Liberación de arsénico a partir de desechos mineros derivados de depósitos de skarn en Sierra Madre Oriental, México.**² En este trabajo, los investigadores se enfocan en la evaluación de la magnitud de la liberación de arsénico al río Xichú a partir de desechos mineros en la mina La Aurora, ubicada en la Sierra Madre Oriental en el estado de Guanajuato, México. Se depositaron aproximadamente 1 millón de toneladas de relaves ricos en azufre en las orillas del río luego de la extracción y procesamiento de yacimientos de tipo mineral skarn. Se recogieron un total de 47 muestras de agua y se analizaron en campo mediante espectroscopia de absorción atómica. En todas las muestras se encontraron As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn producto de oxidación de sulfuros en desechos mineros. Identificaron que se produce liberación localizada y continua de lixiviados, con cantidades muy elevadas de arsénico en solución y asociados a partículas suspendidas. Consideran que el nivel de afectación está controlado por las condiciones estacionales. Sin embargo, es posible encontrar Mn en todas las muestras analizadas y parece que el arsénico liberado de los desechos mineros afecta a una gran superficie. La formación *in situ* de óxidos y oxihidróxidos favorece la retención de arsénico.

² Título original: *Arsenic liberation from mine wastes derived of skarn deposits at Sierra Madre Oriental, México.*

Además, se identificó que todas las muestras analizadas contienen arsénico en niveles por encima del límite de detección y en algunas muestras a niveles muy altos (concentraciones de hasta 2.000 mg/L). El 16% de las muestras superó el límite máximo permisible de concentraciones de arsénico en agua según la norma mexicana (0.025 mg/L) mientras que el 8% de las muestras superan una concentración de 1,0 mg/L de arsénico. El lixiviado que proviene de los relaves mineros evidentemente afecta a la cuenca del río Xichú liberando elementos potencialmente tóxicos al medio ambiente. Los autores calculan que el arsénico liberado anualmente, con base en lluvia anual y la evaluación del volumen de lixiviados, es de al menos 2,000 g de arsénico en fase acuosa.

García y Zanor (2017) realizaron el estudio **Evaluación de la contaminación por elementos traza en sedimentos de La presa La Purísima (Guanajuato)**. Para ello, se tomaron muestras de sedimentos en 12 sitios y se efectuaron análisis de parámetros *in-situ* en agua (temperatura, pH y profundidad del disco de Secchi).

Las determinaciones en los sedimentos incluyeron materia orgánica y concentraciones totales de elementos traza (Zn, Pb, Cu y As). Las investigadoras también calcularon el Índice de Geoacumulación (Igeo) para analizar las posibles fuentes de aporte. Irónicamente, La Purísima mostró contenidos de materia orgánica entre 7.65 a 13.33%, lo cual puede deberse a descargas de aguas residuales; y concentraciones de Zn: 46.28-88.84, Pb: 12.28-33.24, Cu: 9.87-51.64 y As: 7.18-16.75 (mg/kg), los contenidos máximos en los bordes. Según el Igeo, las clases resultaron no contaminadas (Zn, Pb y Cu) a moderadamente contaminadas (As). Las autoras concluyeron que, dado que todos los elementos en cierta concentración son tóxicos debido a su persistencia, bioacumulación y la posibilidad de incorporarse a la cadena trófica, sus hallazgos alertan sobre la urgente necesidad de un eficiente tratamiento de las aguas residuales que se descargan a la presa, pues con base en el Igeo, existe una acumulación en los sedimentos del elemento Pb y principalmente, del As por fuentes antrópicas, indicando un riesgo potencial para la vida acuática y la salud humana.

Contaminación asociada a la actividad agroindustrial

Además de la actividad minera, otra de las principales fuentes de contaminación del agua superficial en Guanajuato es la agroindustria. El libro Agricultura y Contaminación del Agua, (Pérez y Aguilar, 2012), presenta los resultados de una investigación en el Distrito de Riego (DR011) en la Cuenca Alta del río Lerma, en Guanajuato, durante el segundo semestre de 2008. Esta investigación contó con el apoyo de las autoridades de siete de los 11 módulos del DR011 donde se aplicó una encuesta a 145 usuarios y se realizaron entrevistas a funcionarios de diversas dependencias del gobierno estatal y federal, con atribuciones en el sector agrícola y ambiental. En el trabajo se presentan los resultados de los agricultores que se dedican a los cuatro cultivos más importantes del DR011: maíz, sorgo, trigo y cebada. En esta investigación se analizan dos tipos de plaguicidas: insecticidas y herbicidas, y fertilizantes químicos.

Referencias

- Cano Rodríguez, I. y Vallejo, F. G. y Méndez, V. R. y Barbosa, P. M. y Rodríguez, E. R. y Alvarado, A. A., (2000). Determinación de contaminantes en la presa La Purísima y su efecto en el sistema de pozos Puenteceillas de Guanajuato. *IWMI Books, Reports*, H026625, *International Water Management Institute*. [H_26502.pdf \(iwmi.org\)](https://www.iwmi.org)
- Elizarraraz Cabrera, J., Juárez Villalobos, L. D., Manson Arroyo, E., Rivera Ortiz, M. F., Olmos Cruz, R. K., Popoca Guzmán, C. I., y Huchin Mian, J. P. (2022). Contaminación por microplásticos en agua superficial de la Cuenca del Río Guanajuato. *Jóvenes en la Ciencia*, 16. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3601>
- García, M. E. y Zanor, G.A. (2017). Evaluación de la contaminación por elementos traza en sedimentos de la presa La Purísima (Guanajuato). *Jóvenes en la Ciencia*. 2(1), 475-

479. <http://www.repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/3452/1/Evaluaci%C3%B3n%20De%20La%20Contaminaci%C3%B3n%20Por%20Elementos%20Traza%20En%20Sedimentos%20De%20La%20Presa%20La%20Pur%C3%ADsima%20%28Guanajuato%29.pdf>

Loria, A., Ramos-Arroyo, Y. R., Rocha, D., Cruz-Jiménez, G., Razo-Soto, I., Alfaro de la Torre, M.C., Armstrong, D., Guerrero, S. y Wang, F. (2022). Widespread elevated concentrations of gaseous elemental mercury in Guanajuato, Mexico, centuries after historical silver refining by mercury amalgamation. *Science of the Total Environment*, 843. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157093>

Ramos-Arroyo Y., Guerrero-Aguilar, A., Cano-Rodríguez, I., Gutiérrez-Valtierra, M. y Miranda, R. (2017). Arsenic liberation from mine wastes derived of skarn deposits at Sierra Madre Oriental, México. *Science Direct*. 15th Water-Rock Interaction International Symposium, WRI-15. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2017.01.058>
[Arsenic Liberation from Mine Wastes Derived of Skarn Deposits at Sierra Madre Oriental, México - ScienceDirect](#)

Sol-Benítez, A. (2013). Evaluación de la calidad del agua potable en Acámbaro y Jerécuaro, Guanajuato. Tesis de maestría. *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. [FIQ-M-2013-0389.pdf \(umich.mx\)](#)

Pérez-Espejo, R. (coord.) y Aguilar-Ibarra, A. (corresponsable del proyecto). (2012). *Agricultura y contaminación del agua*. Primera edición. Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM. [Agricultura-y-contaminacion-del-agua.pdf](#)

Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (2019). Situación hídrica y disponibilidad en el Estado de Guanajuato.

http://jumapac.com/documentos/FORO%20ESTUDIANTIL/FUENTES%20DE%20CONSUMO%20LTA/situacion_agua_gto_extensa.pdf

Wester, P., Hoogesteger, J. y Vincent, L. (2009). Local IWRM organizations for groundwater regulation: The experiences of the Aquifer Management Councils (COTAS) in Guanajuato, Mexico. *Natural Resources Forum*, 33, 29–38.

RESA Norte del Estado de México-Sur del Valle del Mezquital

La RESA Norte del Estado de México-Sur Valle del Mezquital concentra complejos industriales altamente contaminantes y forma parte del área en la que se dispersan las sustancias tóxicas ligadas al Valle de México. Por una parte, la región industrial del Norte del estado de México, así como el corredor industrial de Tula, conforman las principales fuentes de emisiones atmosféricas que contaminan el aire de la región sur del Valle de México, debido en gran medida a los patrones de viento que llevan una dirección de norte a sur, desde las fuentes contaminantes de tipo industrial de Hidalgo y hacia la Ciudad de México (Amador-Muñoz et al., 2022).

Por otra parte, las aguas residuales de la Ciudad de México viajan desde el emisor central y el gran canal hasta ser depositadas en la Presa Endhó, en el Valle del Mezquital, Hidalgo, el cual constituye el sistema de irrigación con aguas residuales más grande de América Latina (Garduño-Jiménez et al., 2023). En este sentido, tanto los patrones de emisiones, como de descargas de sustancias tóxicas, generan una dinámica de dispersión de contaminantes entre la Ciudad de México, el Estado de México e Hidalgo, tanto por causas naturales, como los patrones de viento, hasta causas antrópicas como la gestión de las aguas residuales.

El escenario toxicológico generado por este mosaico de procesos contaminantes ha llevado a algunos investigadores a describir a la región como la más contaminada de México. Díaz-Quiñones (2023), menciona en la editorial de la revista “Mexican Journal of Medical Research ICSa” que el nivel de contaminación de la cuenca de Tula es tal, que se le puede considerar una zona inhabitable.

La literatura científica revisada en el presente informe fue publicada en los últimos cinco años e incluye análisis de contaminantes en las matrices agua y aire, así como un estudio de salud. Los estudios eco toxicológicos o de análisis de riesgo, se llevaron a cabo a la par de los análisis en agua y son los únicos que se suman al acervo bibliográfico del presente informe en los que se analizan los efectos de las sustancias caracterizadas o el nivel de riesgo asociado a la exposición en poblaciones humanas.

Contaminación atmosférica

Los análisis de contaminantes atmosféricos que se han llevado a cabo en la Zona Metropolitana del Valle de México han mostrado que la zona industrial de Tula forma parte de las principales fuentes de emisión de $PM_{2.5}$, probablemente provenientes de la Refinería Miguel Hidalgo en Tula, cuyos patrones de viento de norte a sur, característicos de la zona, llevan los contaminantes hacia la ciudad de México (Amador-Muñoz et al., 2022).

El trabajo de Hernández-López et al. (2023), destaca la importancia de la caracterización de las sustancias $PM_{2.5}$ como base fundamental para la toma de decisiones a partir de conocimiento científico preciso sobre el grado de toxicidad, fuentes de emisión, así como patrones estacionales y espaciales de mayor riesgo. La caracterización que llevaron a cabo en esta investigación mostró la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos como benzo (b) fluoranteno y benzo (K) fluoranteno, cuyo monitoreo cobra relevancia por los importantes efectos a la salud. También se determinó que los elementos más abundantes en el material particulado $PM_{2.5}$ son Fe, Cu y Pb. Además, encontraron V y Ni, metales que en estudios previos han sido asociados a la refinería de Tula, de acuerdo con la información investigada por los autores.

Este trabajo es un aporte muy valioso para la investigación toxicológica ambiental en el que no solo se incluye la caracterización de las sustancias tóxicas contaminantes, sino que se describen patrones espaciales y temporales de dichas sustancias, y se identifican las posibles fuentes de emisión.

Contaminación del agua

Los últimos estudios sobre la contaminación de cuerpos de agua de la RESA incluyen análisis de sustancias tóxicas de dos presas y los cuerpos de agua cercanos a estas. El primero de ellos es el estudio de Pérez-Coyotl et al. (2019), el cual se llevó a cabo en la Presa Madín, localizada en los municipios de Naucalpan y Atizapán, en el Estado de México y que constituye una importante fuente de agua potable para la población. En la presa se distribuye una especie de carpa común, *Cyprinus carpio*, cuyas poblaciones se han visto mermadas en los últimos años, motivo por el cual los autores analizaron las sustancias contaminantes, así como sus efectos tóxicos en los embriones para explicar la disminución de sus poblaciones. Los contaminantes encontrados en los puntos de muestreo incluyen pesticidas (clorfenvinfos, fentión, diazinón hexaclorobenceno, lindano DDT), fármacos (metformina, penicilina, naproxeno, acetaminofén) y contaminantes orgánicos persistentes (naftaleno, fluoreno, fenantreno, antraceno, pireno).

Los análisis de toxicidad realizados con las muestras de agua de cada sitio de muestreo alrededor de la presa mostraron efectos teratogénicos en la especie *C. carpio*. Esta información es muy relevante para la toma de decisiones en materia medioambiental y para la protección a la salud, y constituye uno de los temas menos estudiados y considerados como necesidades prioritarias en investigación no sólo en México, sino a nivel mundial. Los datos de toxicidad obtenidos a partir de organismos silvestres representan una alerta temprana sobre los posibles efectos en otras especies que conforman la red trófica en la región de la presa Madín, incluyendo a las poblaciones humanas, y sería altamente deseable que los investigadores realicen monitoreos en la zona.

En la entrega anterior se mencionó la importancia de la presa Endhó como fuente receptora y dispersora de múltiples contaminantes que son depositados en los suelos por el uso de sus aguas para la irrigación de cultivos. La contaminación que ha generado el uso de estas aguas residuales en una región ya devastada por los contaminantes de origen industrial ha sido continuo objeto de estudio de la comunidad científica, que año con año publica análisis de los contaminantes presentes en los cuerpos de agua, como el río Tula.

Las aguas residuales son fuente dispersora de contaminantes emergentes, los cuales comienzan a recibir atención por parte de la comunidad científica que estudia las sustancias tóxicas de la presa. Garduño-Jiménez et al. (2023), encontraron bezafibrato, diclofenaco, eritromicina, levonogestrel, simvastatina, sulfametoxazol, trimetoprima, tramadol, 4-terc-octilfenol y paracetamol. Entre los hallazgos más importantes se encuentran las altas concentraciones de acetaminofén, además de la presencia de tramadol, el cual no había sido detectado en aguas superficiales en América Latina. Además, mencionan que la dispersión en aguas superficiales de los antibióticos sulfametoxazol, trimetoprima y el analgésico acetaminofén se ha convertido en un problema extendido por todo el hemisferio sur del planeta.

Las aguas residuales, aunque constituyen un recurso valioso para los agricultores del Valle del Mezquital, acarrean grandes cantidades de fármacos y otras sustancias químicas que presentan patrones estacionales debido a su uso médico y doméstico. El estudio de Durán-Álvarez et al. (2023), muestra los resultados del monitoreo de los fármacos empleados para el tratamiento de Covid-19. Dicho monitoreo se llevó a cabo durante 30 meses entre 2020 y 2022 en aguas del Emisor Central, el canal Tlamaco y agua del manantial Cerro Colorado, para el análisis de famotidina, indometacina, dexametasona, azitromicina e ivermectina, así como el riesgo asociado a las concentraciones de cada uno de los fármacos. El riesgo asociado a los fármacos resultó en la siguiente priorización: ivermectina > azitromicina > dexametasona > famotidina > indometacina.

Es destacable que la carencia de estudios científicos de este tipo, en los que se caracterizan patrones espaciotemporales en la presencia y concentración de agentes tóxicos, dejan vacíos de información muy relevante para la protección de la salud ambiental. En este trabajo, puede observarse la complejidad de factores que pueden influir en la dispersión y concentración de sustancias químicas, cuyos efectos aún se desconocen y pueden sumarse a otros estresores ambientales.

Metales y otros elementos

La presencia y bioacumulación de metales y metaloides tóxicos ha sido bien documentada en matrices y tejidos biológicos, y es un tema que se investiga continuamente en la región de influencia de la presa Endhó, ya que se trata de contaminantes ubicuos a los que los organismos silvestres y humanos están constantemente expuestos. Los metales se acumulan en las aguas residuales en la presa, que, al ser usadas para la irrigación, se bioacumulan en las hortalizas que se siembran para consumo humano y de animales de granja. El estudio de Chávez-Mejía et al. (2019), reporta la presencia de metales y metaloides (Pb, Cd, Cr y Al) en orina, sangre, pelo y uñas en habitantes Xochitlán, Hidalgo, uno de los distritos de riego del Valle del Mezquital. El trabajo sobre esta zona es una evidencia más de los procesos de bioacumulación de metales tóxicos en diferentes tejidos y matrices biológicas, cuyo uso es altamente deseable en regiones altamente impactadas por las actividades industriales, agrícolas y urbanas.

En segundo lugar, en el trabajo de Aguillón-Gutiérrez y Ramírez-Bautista (2020), se analizaron las concentraciones de Ni, Cd, Pb, Cr y Zn, en agua y sedimento, así como en intestino, branquias e hígado del sapo *Dryophytes plicatus* del Parque Nacional “El Chico”.

La región de estudio se encuentra fuera del Valle del Mezquital, sin embargo, se agrega al acervo bibliográfico del Macroexpediente por ser unos de los pocos trabajos nuevos ecotoxicológicos de la región y porque atestigua la ubicuidad de los metales como contaminantes en el estado de Hidalgo, así como las afectaciones en

la fauna silvestre incluso dentro de áreas menos perturbadas, como “El chico”. Además, estos estudios apoyan el trabajo del Pronaces Agentes Tóxicos en la delimitación más precisa de las RESA.

Las concentraciones de todos los metales en agua se encontraron dentro de los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 a excepción del Cd, que se encontró en 0.007 mg/L. Por otra parte, las mayores concentraciones de metales se encontraron en alguno de los órganos analizados, lo que sugiere un proceso de biomagnificación que puede poner en riesgo a esta especie y a otras poblaciones de organismos silvestres.

Finalmente, se suma el trabajo de Izquierdo-Vega et al. (2022), en el que se analizaron las concentraciones de As (metaloides) y F (no metal) en el agua potable de la ciudad de Tula. Es bien conocido que existen fuentes naturales de As en ciertos materiales geológicos de las regiones áridas y semiáridas de México. Sin embargo, el problema se ha incrementado por la sobreexplotación de los acuíferos. En la investigación de Izquierdo-Vega et al. (2022) se encontró que existe un riesgo importante de exposición a As inorgánico en el agua potable de la población del municipio de Tula de Allende, con concentraciones de 8.5 a 331 µg/L, que de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) no deben exceder los 10 µg/L. Esta exposición a As representa un riesgo de 0.0052 (52 en 10,000) para el desarrollo de cáncer en Tula de Allende.

En el caso del F, se encontraron concentraciones de 0.86 a 3.2 mg/L, cuyas concentraciones no deberían sobrepasar los 1.5 mg/L de acuerdo con la OMS. La exposición a F ya ha ocasionado efectos en la salud de la población, como fluorosis dental y se esperan otros efectos crónicos si no se toman las medidas pertinentes. Tanto el As como el F representan riesgos importantes a la salud por lo que urgen medidas de las autoridades de salud para proteger a la población expuesta.

Investigaciones en salud

Las investigaciones sobre la salud ambiental en la RESA son escasas. A pesar de los efectos de la exposición a múltiples sustancias tóxicas contaminantes en las comunidades aún prevalecen vacíos de información toxicológica ambiental. Polanco-Flores (2022) menciona que, aun cuando no hay estudios sobre las enfermedades en Hidalgo, durante la práctica diaria se percatan de la alta prevalencia de neoplasias y enfermedad renal, cuyas causas disparadoras incluyen contaminantes de origen industrial como metales. Este autor, llevó a cabo un análisis observacional y descriptivo de la función renal de 200 pacientes que habitan la región de Tula-Tepeji, al sur del estado de Hidalgo. Los hallazgos más relevantes de su trabajo fueron la alta prevalencia de enfermedad renal crónica, la cual se presentó en 31% de la población de estudio. De los 200 pacientes analizados, el 39% refería tener familiares con la enfermedad. Las causas de desarrollo de la enfermedad que se discuten en el estudio incluyen tanto factores iniciadores como de progresión, entre los que se puede destacar a la exposición a contaminantes ambientales como plomo.

La pertinencia de llevar a cabo mediciones de metales en sangre, así como biopsias renales, es un punto importante que se menciona y que, de acuerdo con el autor, no se llevó a cabo por falta de recursos, pero arrojaría información importante sobre la salud renal en la región, la cual parece estar influenciada fuertemente por factores ambientales. En este sentido, la cooperación entre grupos de científicos multidisciplinarios resulta fundamental para lograr objetivos de investigación de mayor alcance que permitan la obtención de información más precisa e integral.

Este es, hasta el momento de esta investigación, el único trabajo sobre salud de la región que se suma al acervo bibliográfico del Macroexpediente.

Es importante destacar que, tal como mencionan algunos autores reseñados en el presente informe, aún se tiene un importante vacío de información de salud ambiental, ya que no se realizan estudios epidemiológicos suficientes en los que se analice la asociación entre la exposición a sustancias tóxicas contaminantes y el desarrollo de enfermedades crónicas no transmisibles en las poblaciones expuestas. El caso de la Ecotoxicología en la región no es la excepción. Existen pocos estudios que analicen la exposición en las especies de las regiones contaminadas y los efectos de las sustancias químicas contaminantes en diferentes grupos de organismos silvestres que aporten información sobre la dinámica completa de dispersión, bioacumulación y biomagnificación de los agentes tóxicos.

Algunas consideraciones generales sobre la producción científica de la situación toxicológica ambiental en la RESA

La revisión de la literatura científica realizada sobre la contaminación de esta RESA suma una cantidad menor de trabajos que el informe anterior, pues se trata de las investigaciones que se publicaron principalmente durante el último año. Los estudios que se reseñaron en este informe constituyen aportaciones muy valiosas sobre las sustancias tóxicas que contaminan el agua y el aire, con una creciente atención en los contaminantes emergentes que se descargan en la Presa Endhó.

Sin embargo, cabe señalar que, a pesar de los avances importantes en la detección de sustancias tóxicas contaminantes de gran relevancia por sus efectos sobre la salud humana y ecosistémica, es poco el seguimiento que se da a la presencia, concentración y temporalidad de estas, incluyendo a los contaminantes de preocupación emergente que han sido analizados en diferentes cuerpos de agua.

Finalmente, aún hace falta una visión integradora no solo en México, sino a nivel mundial, que se refleje en estudios de salud ambiental que articulen la problemática ecosistémica con la salud humana y contemplen la compleja exposición a múltiples agentes tóxicos.

Referencias

- Aguillón-Gutiérrez, A., y Ramírez-Bautista, A. (2020). Heavy metals in water, sediment and tissues of *Dryophytes plicatus* (ANURA: HYLIDAE). *Sylwan*, 164(8), 1-11.
- Amador-Muñoz, O., Gonzalez-Ramírez, A. E., y Villalobos-Pietrini, R. (2022). Polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in the metropolitan zone of Mexico Valley: Impact of air quality management programmes. *Urban Climate*, 42, 101096.
- Díaz-Quiñonez, J. A. (2023). Tula Basin, the most polluted region in Mexico. *Mexican Journal of Medical Research ICOSA*, 11(22), I-II.
- Durán-Álvarez, J. C., Prado, B., Zanella, R., Rodríguez, M., y Díaz, S. (2023). Wastewater surveillance of pharmaceuticals during the COVID-19 pandemic in Mexico City and the Mezquital Valley: A comprehensive environmental risk assessment. *Science of The Total Environment*, 900, 165886.
- Garduño-Jiménez, A. L., Durán-Álvarez, J. C., Ortori, C. A., Abdelrazig, S., Barrett, D. A., y Gomes, R. L. (2023). Delivering on sustainable development goals in wastewater reuse for agriculture: Initial prioritization of emerging pollutants in the Tula Valley, Mexico. *Water Research*, 238, 119903.
- Hernández-López, A. E., Santos-Medina, G. L., Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez, E., Villalobos-Pietrini, R., y Amador-Muñoz, O. (2023). Chemical speciation of organic compounds and elemental compositions of PM_{2.5} in Mexico City: Spatial-seasonal distribution, emission sources, and formation processes. *Atmospheric Research*, 106868.

- Izquierdo-Vega, J. A., Sánchez-Gutiérrez, M., Peña, L. C. S., Martínez-Acuña, M. I., y Del Razo, L. M. (2022). Arsenic and Fluoride in the Drinking Water in Tula City, México: Challenges and Lessons Learned. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(6), 200.
- Pérez-Coyotl, I., Galar-Martínez, M., García-Medina, S., Gómez-Oliván, L. M., Gasca-Pérez, E., Martínez-Galero, E. y Sánchez-Aceves, L. M. (2019). Polluted water from an urban reservoir (Madín dam, México) induces toxicity and oxidative stress in *Cyprinus carpio* embryos. *Environmental Pollution*, 251, 510-521.
- Polanco-Flores, N. A. (2022). Epidemiology of chronic kidney disease in Tula de Allende-Tepeji del Río, Hidalgo, México. *Medicina Interna de México*, 38(2), 248-257.

RESA Puebla-Tlaxcala

La RESA Puebla-Tlaxcala concentra un conglomerado industrial ligado a la red de proveeduría automotriz, a la producción de químicos y plásticos, así como a un difuso sector textil que realiza parte de los procesos en fábricas y el deslavado de mezclilla en domicilios particulares, descargando colorantes a las redes de alcantarillado municipales.

La contaminación del río Atoyac y los riesgos de ésta para la salud pública ha sido reconocida por instituciones como la Comisión Nacional del Agua en su Declaratoria de Clasificación de 2011 y por la Comisión Nacional de Derechos Humanos (CNDH) en su Recomendación 10/2017 y recientemente, por Conahcyt en el Primer Informe Estratégico de la Cuenca del Alto Atoyac (2023).

Estudios previos confirman algunas de las sustancias ya identificadas por el estudio de CONAGUA en los ríos de la Cuenca. En esta entrega, se suman algunos estudios en suelos agrícolas, que confirman la presencia de sustancias ligadas a esta actividad, como los plaguicidas.

En esta revisión, que contiene estudios de 2017 a 2022, se identificaron también algunos medicamentos; los autores resaltan la importancia de su identificación, cuantificación y regulación (Navarro y Olivé, 2017). Estos autores resaltan la incipiente investigación sobre fármacos en los cuerpos receptores en México en contraste con más de 200 estudios internacionales realizados desde 2014.

En esta etapa se recopilaron investigaciones sobre la temática que más ocupa el quehacer de los científicos estudiosos de la región, la contaminación de agua superficial, el uso y dispersión de plaguicidas, la contaminación puntual ligada a algunos sectores industriales como el textil y una investigación sobre las costumbres alimentarias de las comunidades contemporáneas que habitan la Cuenca.

Cambio alimentario

Álcantara-Rusell (2020) ha documentado la preservación del consumo de algunos alimentos oriundos de la región de Puebla-Tlaxcala, particularmente de vegetales locales, semillas, y algunos animales marinos de agua dulce desde el posclásico (900-1500 D.C.) hasta los días que corren. Mediante un estudio de isótopos, la autora identificó vestigios del cultivo, procesamiento y consumo de agave y pulque, maíz, papa dulce y frijoles salvajes, así como la nixtamalización del maíz en las poblaciones cholulteca y tlaxcalteca prehispánica. Los esqueletos analizados cubren un período de 200 años en su conjunto, el área de estudio es Cholula y Tepeticpac (Tlaxcala). Mediante un análisis de isótopos de carbono y nitrógeno en los restos óseos y el análisis de microfósiles vegetales extraídos de los cálculos dentales tomados de las muelas esqueletos, se confirmó el consumo de

algunos cultivos que todavía se siembran en la región. De acuerdo con la autora, la presencia de isótopos de hidrógeno daría cuenta del consumo de plantas, frijoles y algunos animales como peces de agua dulce, mientras que la presencia de isótopos de carbón, darían cuenta del consumo de maíz, amaranto y chía.

El alcance del estudio es de 200 años en el posclásico y cubre el territorio que va de Cholula, Puebla a Tepeticpac, Tlaxcala. Las inferencias hechas a partir de los resultados de laboratorio permiten confirmar la homogeneidad de la dieta de los habitantes de esta región. En términos generales, se pueden confirmar cuatro tipos de alimentos: herbívoros terrestres, plantas, además de otros cereales y semillas.

El estudio ofrece una revisión de las dietas presentes, elaborada a partir de las entrevistas a cocineros tradicionales, chefs y agricultores contemporáneos, con quienes confirmó el consumo actual de alimentos como gusanos de maguey, la planta conocida como epazote de zorrillo, quelites y ajo entre otros. El trabajo confirma la importancia de preservar áreas agrícolas para el cultivo de especies nativas, ante el avance de los emplazamientos industriales en el territorio.

Contaminación de agua superficial

Entre los principales factores de riesgo de exposición a contaminantes para la biota y la salud humana, se encuentran las descargas de aguas residuales industriales con metales pesados, contaminantes orgánicos, plaguicidas y -de acuerdo al estudio de Navarro y Olivé (2017), también con medicamentos como Naproxeno, Carbamazepina, Triclosán y Diclofenaco en distintos puntos de la Cuenca del Alto Atoyac y de los estados de Puebla y Tlaxcala. Los autores identificaron estos medicamentos en el punto en el que el río Nexapa recibe una transferencia de aguas del río Atoyac, así como en puntos de descarga de los municipios de Atlixco e Izúcar de Matamoros, en Tlaxco, Puebla y Atoyatempan. Estos puntos de muestreo cubren la parte superior y media de la Cuenca Alta del río Atoyac y evidencian la dispersión de estos contaminantes (Navarro y Olivé, 2017).

Las mayores concentraciones en este monitoreo fueron encontradas en el punto en el que el Nexapa recibe el afluente del río Atoyac. En los ríos Atoyac y Zahuapan se identificaron en mayores concentraciones el triclosán ($1.89_{\mu g}L^{-1}$), seguido del naproxeno ($1.43_{\mu g}L^{-1}$) y en tercer lugar el diclofenaco ($.12_{\mu g}L^{-1}$); en Izúcar de Matamoros se repite el patrón, pues el que se encontró en mayores concentraciones fue el triclosán ($19.34_{\mu g}L^{-1}$), seguido del naproxeno ($1.89_{\mu g}L^{-1}$) y en tercer lugar el diclofenaco ($.60_{\mu g}L^{-1}$). Como se ve, las concentraciones de triclosán en Izúcar fueron alrededor de 10 veces superiores a las identificadas en el Nexapa. El punto donde se registraron las menores concentraciones fue el nacimiento del Nexapa, que se contamina después de la confluencia con el Atoyac, los contaminantes se diluyen en el trayecto hasta antes de llegar a la presa Valsequillo, donde nuevamente aumentan las concentraciones.

El autor concluye que este patrón se explica tanto por la excreción de estas sustancias por parte de la población que las ha ingerido, como por la inadecuada disposición de estas. En este sentido cabe recordar que la ciudad de Puebla concentra los hospitales más importantes del Estado, que pueden ser la causa de estas concentraciones elevadas de medicamentos, de acuerdo con los autores.

Contaminación asociada a descargas de aguas residuales del sector textil

En la Cuenca del Alto Atoyac operan un número importante de unidades económicas dedicadas al “acabado de productos textiles”, categoría de actividad económica establecida en el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIÁN) que ampara el lavado de ropa de mezclilla en domicilios privados que descargan aguas residuales a los drenajes municipales. Esta actividad se asocia a la contaminación no sólo de los drenajes sino de los ríos, con sustancias propias del teñido de la mezclilla.

En un protocolo y estudio piloto desarrollado como tesis de maestría en ciencias ambientales, Ahuatzin-Flores (2019) presentó los resultados de una prueba de degradación de un derivado del fenol, el pentaclorofenol, componente de algunos colorantes textiles. La sustancia analizada puede penetrar por la piel, las mucosas, el tracto respiratorio, el aparato digestivo, por lo que es una sustancia de alta toxicidad, de acuerdo con el autor.

El estudio compara el límite de pentaclorofenol en desechos tomando como referencia la NOM-052-SEMARNAT-2005 (100 mg/L).

Para el proceso se utilizaron los colorantes azul azoico y antraquinona, la bacteria *S typhi* eficacia de remoción del contaminante pues degradó más del 60% de la concentración del mismo, mientras *E Tarda* removió 61% y *K pneumoniae* 48%. Adicionalmente, el estudio probó que las muestras *allium sativum* tratadas con colorantes no desarrollaron raíz mientras que los ejemplares de control, sí. Las muestras de agua residual con pentaclorofenol fueron tomadas en Teziutlán, Puebla. Sin embargo, la Declaratoria de Clasificación de los ríos Atoyac-Xochiac y Zahuapan publicada por CONAGUA en 2011 confirmó la presencia de fenoles en el caudal del río, por lo que la propuesta técnica para su degradación se incluyó en esta etapa del Macroexpediente.

Contaminación del suelo agrícola con compuestos orgánicos persistentes

Los suelos son en última instancia, los depositarios de diversos contaminantes como los provenientes de la industria, de la minería, agricultura, y ganadería; adicionalmente son los receptores últimos de los residuos sólidos depositados en los rellenos sanitarios y los lixiviados derivados; incluso contaminantes atmosféricos pueden, eventualmente, depositarse en el suelo. A esta lista de los contaminantes del suelo tradicionalmente reconocidos, se debe sumar los hidrocarburos provenientes de las tomas clandestinas en los ductos de Pemex, el “huachicol”, los “basureros clandestinos” y los incendios industriales. En este

amplio panorama de riesgos de contaminación del suelo, en esta etapa del Macroexpediente se acopiaron algunos estudios sobre el tema.

Un estudio reciente ha identificado compuestos orgánicos persistentes como DDT, Hexaclorobenceno (HCB) Bifenilos policlorados (PCB) y DDE tanto en el río Texcalac como en sus sedimentos. (García-Nieto et al., 2019) muestrearon 19 puntos ubicados entre la Ciudad Industrial Xicohtencátl I y el Corredor Industrial Xalostoc. En el trayecto de estas dos instalaciones, existen descargas industriales y urbanas que representan un aporte de contaminantes al suelo, son la Quebrada de San Cosme, después de la descarga de aguas residuales industriales de Ciudad Industrial Xalostoc y el Barranco de San Cosme que recibe vertidos de aguas residuales urbanas de José López Portillo. Así como el río La Mancera, donde nace el Texcalac y el Manantial El Ojito, entre el trayecto de una Ciudad Industrial a la otra. El estudio cubre diversos puntos ubicados en las colindancias de los municipios de Xalostoc, Tetla de Solidaridad y Apizaco.

El estudio refiere que el Convenio de Estocolmo, firmado por México en 2003 propone la reducción y abandono gradual de estas sustancias, pero los resultados de laboratorio evidencian que no se han dejado de usar en la región. Las concentraciones de estas sustancias fueron evaluadas en referencia a las directrices canadienses sobre la calidad de los sedimentos para la protección de la vida acuática y a las directrices canadienses sobre la calidad del suelo para la protección del medio ambiente y la vida humana (CSQG por sus siglas en inglés).

En siete sitios muestreados se confirmó la presencia de DDT mientras el DDE se confirmó en tres. Todas las muestras de DDT excedieron el límite de 1.19 µg por kilogramo para la protección de la vida acuática establecido en los lineamientos canadienses; mientras que el 25% de las muestras de DDE se encontraron entre 1.42 y 3.16 µg por kilogramo, superando la misma normativa.

Respecto de los bifenilos policlorados (PCB), estos fueron identificados en el río Texcalac, en el que se encontraron 36 de 45 congéneres de PCB, los más abundantes fueron los penta PCB y hexa PCB con concentraciones de hasta 15 804 y 13 242 μg por kilogramo.

El patrón de concentración de las dioxinas coincide con el de los PCB, pues el 23% de los congéneres se identificaron en el trayecto del río Texcalac, mientras que sólo el 2.2% se identificó en la barranca Sambrano.

Con estos resultados se puede concluir que las concentraciones de estos contaminantes son superiores en los sedimentos del río Texcalac que en los suelos agrícolas que lo circundan.

El bajo contenido de materia orgánica tanto en los sedimentos como en los suelos reduce la absorción de estas sustancias, permitiendo su dispersión con el flujo del agua.

Las concentraciones de estos compuestos en el río Texcalac fueron superiores a las reportadas en ríos como el Tíber en Italia. De ello se derivan altos valores de toxicidad de los sedimentos.

La citotoxicidad y genotoxicidad fue probada en un ensayo con la planta del haba, los resultados mostraron la presencia de micronúcleos, considerados un buen biomarcador de agentes clastogénicos (Ibid., 2019).

Estos hallazgos confirman los riesgos para la vida acuática del río, que resulta inferior a las concentraciones de ríos altamente contaminados como el Coatzacoalcos en Veracruz, pero superiores a zonas consideradas como de desastre ecológico, como el río Tíber en Italia.

Otro estudio infiere la contaminación del suelo con plaguicidas en el municipio de Tepetitla de Lárdizabal, éste fue elegido debido a que el 60% de su superficie está dedicada a las actividades agrícolas. De acuerdo con el autor, la agricultura es la principal fuente de ingresos, por lo que se hace uso de una gran gama de plaguicidas para obtener altos rendimientos en los cultivos. El experimento

evalúa una propuesta de degradación del DDT con un método llamado “bioestimulación”, que consiste en agregar al suelo rastrojos agroindustriales para propiciar su oxigenación, ello conduce al incremento de algunos microorganismos funcionales para la descomposición de sustancias como el DDT.

Para el pilotaje se recolectaron 6 muestras de suelo agrícola regularmente cultivado, el suelo fue colectado en forma de zig-zag a lo largo de la parcela, con una distancia de cinco metros entre cada punto, a una profundidad de 15-20 cm, se hizo una muestra compuesta a la que se analizaron los parámetros físico-químicos: el contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, pH, humedad, textura y contenido de plaguicidas. El suelo utilizado fue franco arenoso, franco arenoso-arcilloso y franco.

Al suelo se agregaron tres tipos de rastrojos agroindustriales: bagacillo de caña, rastrojo de maíz y paja de trigo, a partir de su procesamiento cuantificó la cantidad de CO₂ producido por bacterias altamente resistentes al DDT. A las muestras de suelo se agregaron los rastrojos, y una concentración del plaguicida de 50 mg/kg⁻¹ además de nitrógeno y fósforo. Después de un procesamiento de 24 y 72 horas se cuantificaron las colonias de bacterias y hongos previa identificación mediante un equipo de secuenciación de ADN y la comparación de los resultados con la base de datos Gen Bank y un posterior análisis filogenético mediante el uso de un software. Mediante este procedimiento se identificaron trazas de metilparatión, gamma HCH, endosulfán. Adicionalmente se verificó la pobreza de materia orgánica en el suelo de la parcela. A pesar del contenido de DDT en las muestras, se verificó un crecimiento bacteriano de los grupos gram positivo y gram negativo, y fúngico menor, sin embargo, al final del experimento, la cantidad de DDT había reducido. Las bacterias más tolerantes resultaron las del género *actinobacteria* (*cellulosimicrobium cellulans* P14, *bacillus pumilus* P18, *Bacillus sp.* P20, *Lycinibacillus sp* P30, y una proteobacteria: *Sphingomonas sp* P28. Ninguna de las bacterias identificadas en el experimento son las comúnmente reportadas en la degradación de DDT: *Alcaligenes eutrophus* y *Micrococcus varians*.

Las probables fuentes de contaminación son dos, la aplicación directa de plaguicidas por parte de los agricultores y el riego con agua del río Atoyac, que ya de por sí contiene estas sustancias (Calva-Rodríguez, 2013). Los autores concluyen que la pobreza de materia orgánica del suelo da cuenta de la posible filtración de plaguicidas a lo largo del tiempo y proponen un nuevo tipo de batería para su tratamiento, aunque con menor eficacia que con las bacterias previamente identificadas para tal fin.

Estudios de revisión

Durante el último año se publicó un estudio de revisión que recoge publicaciones que datan de 2010 a 2020. Cervantes-Avilés et al. (2022) han sistematizado la totalidad de publicaciones de los resultados de muestreos realizados en este período tanto en los ríos Atoyac y Zahuapan como en los sedimentos, sintetizando los datos de contaminantes identificados en la Cuenca del Alto Atoyac, clasificados en orgánicos, inorgánicos y microbiológicos. El estudio concluye que los parámetros fisicoquímicos se encuentran fuera de los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y de los actualizados en la NOM-001-SEMARNAT-2021, confirma la presencia de elementos traza como aluminio, plomo, cobre, zinc y hierro, altos valores de bacterias coliformes, productos farmacéuticos y metales pesados. El estudio clasifica las investigaciones de acuerdo al sitio donde se realizaron los muestreos: antes de la confluencia de los ríos Atoyac y Zahuapan, en la zona de confluencia y en la presa Valsequillo.

En el último estudio de revisión se incluyen tres sitios de México, característicamente industriales (Santa Catarina, Monterrey, Coatzacoalcos, Veracruz y la cuenca del Río Atoyac en Puebla-Tlaxcala) como sitios en los que se han identificado Compuestos Orgánicos Volátiles. Aunque en otras ciudades del mundo típicamente industriales ya se han encontrado relaciones entre estos COV y daños a la salud, en México no se habían analizado, sin embargo, en el río no hay evidencia de vida macroscópica (Montero-Montoya, et al., 2018).

Algunas consideraciones sobre la producción científica de la situación toxicológico-ambiental en la RESA Cuenca del Alto Atoyac:

Los estudios de revisión de este período contribuyen a la identificación de sustancias como compuestos orgánicos persistentes, medicamentos y plaguicidas en suelos agrícolas y sedimentos de los ríos de la Cuenca. Respecto de los contaminantes persistentes, algunos autores asocian la contaminación de los cuerpos de agua y sedimentos a las descargas de aguas residuales industriales, particularmente a la Ciudad Industrial Xicohtencátl y a la Ciudad industrial Xalostoc. Es importante resaltar que en México adolecemos de NOM que regulen las concentraciones de plaguicidas en suelos agrícolas, y de medicamentos y POP en aguas residuales, por lo que los estudios contribuyen a visibilizar una problemática que requiere atención y regulación.

A pesar de incluir dos artículos resultado de monitoreos, ninguno es de carácter eco toxicológico o epidemiológico, por lo que la recomendación general es nutrir esa área de investigación.

Referencias

- Ahuatzin Flores, Omar Enrique. (2019). Toxicidad del agua contaminada por colorantes textiles y pentaclorofenol al ser tratados con enterobacterias. Tesis de Maestría. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/4772>
- Alcántara-Russell, K. (2020). The diet of sovereignty: Bioarchaeology in tlaxcallan (Order No. 28288427). Available from ProQuest One Academic. (2498183024).
<https://login.pbidi.unam.mx:2443/login?qurl=https%3A%2F%2Fwww.proquest.com%2Fdissertations-theses%2Fdiet-sovereignty-bioarchaeology-tlaxcallan%2Fdocview%2F2498183024%2Fse-2%3Faccountid%3D14598>
- Ávila-Orta, C.A., María de Lourdes Hernández-Rodríguez y S. Alejandro Lozano Morales coords. (2021). Río Atoyac: hacia una gestión integral de una problemática multifactorial. *El Colegio de Tlaxcala, A. C.*

- Calva Rodríguez, M. L. (2013). Biodegradación de plaguicidas en suelos agrícolas de Tepetitla por bioestimulación y bioaumentación. Tesis (Maestría en Biotecnología Aplicada), Instituto Politécnico Nacional, CIBA.
- García-Nieto, E., Libertad Juárez-Santacruz, Elvia Ortiz-Ortiz, Héctor Santos Luna-Zendejas, Dora María Frías-Márquez, Hipólito Muñoz-Nava y Claudia Romo-Gómez. (2019) Ecotoxicological assessment of sediment from Texcalac River and agricultural soil of riverside area, in Tlaxcala, Mexico. *Chemistry and Ecology*, 35:4, 300-318, DOI: 10.1080/02757540.2018.1546297.
- García, G., Lilian y Cervantes-Avilés, Pabel y Mähknecht, Jürgen y Mora, Abrahan y García-Gamboa, Maritza y Sánchez-Luna, Mari. (2022). Revisión bibliográfica del estado ambiental actual y de las implicaciones para la salud humana de uno de los ríos más contaminados de México: El río Atoyac, Puebla.
- Hernández Garcia, M. G. (2019). Local organizations facing socio-environmental risk in the Alto Atoyac Basin, Tlaxcala-Puebla. *Textual*, 74, 185-227. Doi: 10.5154.r.textual.2018.74.04
- Montero-Montoya R, López-Vargas R, Arellano-Aguilar O. (2018). Volatile Organic Compounds in Air: Sources, Distribution, Exposure and Associated Illnesses in Children. *Ann Glob Health*, 84(2):225-238. Doi: 10.29024/aogh.910. PMID: 30873816; PMCID: PMC6748254.
- Olivé-Isaac K., Navarro-Frometa, E. (2017). Detection of farmaceutics in te environment en: Gómez-Oliván, L. (eds.) Eco farmaco vigilancia. *Manual de Ciencias de la ingeniería y la tecnología*, 66.https://doi.org/10.1007/698_2017_165

RESA Istmo Veracruzano

Los estudios sobre esta RESA ofrecen una diversidad temática que va de la contaminación del agua con Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos, la contaminación del aire con compuestos volátiles orgánicos (CVO), a temas de salud como el patrón de enfermedades transmitidas por vectores ante escenarios de incremento de la temperatura ambiental, hasta la exposición a contaminantes después de eventos como los accidentes en las empresas del corredor petroquímico Minatitlán-Coatzacoalcos.

En la región se han identificado sustancias como el dicloruro de etileno (DCE), clasificado como posible cancerígeno por la IARC y precursor de furanos. Esta sustancia se encuentra en la lista de prioridades de regulación en la lista europea de sustancias contaminantes, REACH; mientras que en esta región sólo la organización no gubernamental Greenpeace la ha identificado.

Múltiples investigaciones acopiadas en etapas posteriores del macro expediente se han dedicado a identificar y evaluar los abundantes hidrocarburos en la región, presentes en los suelos, los cuerpos de agua superficiales y en los manglares.

La contaminación de la región se debe no sólo a las emisiones cotidianas de las empresas del sector petroquímico y alimentario sino a múltiples accidentes de gran escala que afectan no sólo a los trabajadores y a la población sino a las especies marinas locales y se acumulan, en última instancia, en los suelos y sedimentos de los ríos y canales.

Los municipios que integran la RESA son afectados por las emisiones contaminantes diversas fuentes fijas y difusas, entre las más importantes se encuentran los Complejos Petroquímicos Cangrejera, Pajaritos y Coatzacoalcos en los que operan decenas de empresas privadas dedicadas a la producción de etileno, propileno, aromáticos, metanol, amoniaco, acrilonitrilo, y cloruro de vinilo. A estas

fuentes de contaminación industrial se suman el “basurero Las Matas” en el municipio de Minatitlán, que recibió residuos sólidos urbanos de Minatitlán, Coatzacoalcos y Cosoleacaque durante dos décadas y el depósito a cielo abierto de coque en Jáltipan.

De acuerdo con Fernández et al., (2016), en esta zona se ha producido la contaminación causada por el sector petroquímico más importante del país.

La difusión de las sustancias contaminantes proveniente de “Las Matas” alcanza los manglares, y aunque la investigación sobre esto es incipiente, pues recién en 2018 se realizó una evaluación de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2013 por parte de la Secretaría en la que se asentó la contaminación de los humedales aledaños con lixiviados, así como la falta de infraestructura para el control del biogás generado por el basurero (SEMARNAT, 2018).

Debido al crecimiento poblacional en esta región, ha sido necesario el establecimiento de un Decreto por el que se estableció la zona de reserva parcial de aguas nacionales superficiales para los usos doméstico y público urbano en las cuencas Alto Río Coatzacoalcos, Bajo Río Coatzacoalcos, Bajo Río Uxpanapa, Río Huazuntlán y Llanuras de Coatzacoalcos, y zona de reserva parcial de aguas nacionales superficiales para uso ambiental o conservación ecológica en la cuenca Llanuras de Coatzacoalcos, en la Subregión Hidrológica Río Coatzacoalcos y en la Región Hidrológica número 29 Coatzacoalcos (Diario Oficial de la Federación 23 de marzo de 2018). El reto de la provisión de agua de calidad para uso y consumo humano, así como un ambiente seguro es un reto para la región.

En este complejo contexto ambiental, las investigaciones acopiadas en esta etapa se centran en la contaminación por productos derivados del petróleo:

Contaminación por petróleo

El equipo de Riojas et al. (2008) determinó la presencia de benceno, tolueno, xileno y etileno en sedimentos del río Coatzacoalcos, sedimentos fluviales y agua potable de la Cuenca del río Coatzacoalcos a partir del análisis de 30 muestras de agua, 11 de suelo y 6 de sedimentos.

La presencia de estos compuestos se confirmó en el 100% de las muestras, las concentraciones de benceno en agua subterránea fueron de .021 a 1.08 mg/kg, mientras el tolueno fue de .0074 a .4008. La concentración de etilbenceno fue de .642 mg/kg a .349 mg/kg. De acuerdo con el autor, estas concentraciones no superaron la norma mexicana aplicable.

Caracterización de contaminantes después de la ocurrencia de explosiones industriales

Después del accidente de la empresa productora de policloruro de vinilo (PVC) *Mexichem* en el municipio de Coatzacoalcos, Veracruz, en 2016, la organización no gubernamental (ONG) Greenpeace (2016) realizó un análisis de 10 muestras de agua, entre el puerto de Coatzacoalcos y el arroyo Nuevo Teapa y en la desembocadura del río hacia la confluencia con el estuario. El análisis, realizado en el laboratorio internacional acreditado de la ONG en el Reino Unido, confirmó la presencia de 5 derivados del etano; 5 del eteno; 6 del metano; benceno y 13 derivados suyos y otros 4 compuestos orgánicos volátiles, 4 tipos de ftalatos; 6 tipos de Hidrocarburos aromáticos policíclicos; 6 compuestos clorados y 11 compuestos orgánicos adicionales y 12 metales pesados y 17 tipos de dioxinas y furanos. Estos hallazgos resultaron del análisis de aguas residuales, agua del río Coatzacoalcos y muestras de suelo superficial.

Estudios de salud

Estudios de morbilidad que asocien las condiciones medio ambientales a la condición de salud pública son escasos, sin embargo, un estudio piloto asoció el cambio climático a enfermedades transmitidas por vectores, en una región amplia que incluyó 25 municipios entre ellos, se incluyeron los que hemos denominado RESA Istmo norte. Se encontró una asociación positiva entre el incremento de la temperatura y las enfermedades diarreicas agudas en Coatzacoalcos, Cosoleacaque, Chinameca, Ixhuatlán del Sureste, Jáltipan, Minatitlán, Moloacán, Oteapan, Soteapan y Zaragoza entre 1998 y 2005. También se documentó un alto riesgo relativo de contraer dengue, asociado a las altas temperaturas en Minatitlán, Coatzacoalcos y Acayucan. Las tasas más altas de dengue en el período se registraron en Acayucan, Minatitlán y Nanchital, además se evidenció la alta persistencia de casos de dengue; mientras que en Cosoleacaque y Chinameca se registró un aumento de 10% de enfermedades diarreicas agudas en niños menores de cinco años por cada incremento de un grado de temperatura.

Los resultados de este ejercicio investigativo permiten confirmar la incidencia de la temperatura en enfermedades infecciosas, los autores concluyen que, en los municipios de Coatzacoalcos y Minatitlán, las poblaciones con niveles bajos de marginación presentaron persistencia en las afecciones causadas por el dengue; mientras que en municipios de marginación media como Acayucan, Cosoleacaque y Chinameca, por cada aumento de 1°C de temperatura, los casos de EDA en niños menores de 5 años aumentó 10%; en el municipio de Soteapan, donde la población vive en condiciones de alta marginación, también aumentaron las EDAs ante el aumento de 1°C de temperatura. (Riojas-Rodríguez et al., 2008).

Propuestas de análisis

Debido a la complejidad de los factores climáticos y antrópicos de la región, (Torres et al., 2013) proponen la aplicación de un Sistema Integrado de Evaluación Ambiental que considere la complejidad y multiplicidad de factores, en un ejercicio piloto se introdujeron datos reales de calidad del agua del río Coatzacoalcos; las muestras fueron tomadas sobre el río en el trayecto de Minatitlán al Golfo de México, los sitios se seleccionaron con el criterio de mostrar la hidrodinámica y calidad del agua. Este modelo numérico integrado de Saint Venant y las ecuaciones de Advección-difusión-reacción permitió evaluar la calidad y transporte de más de 22 parámetros de calidad del agua, incluyendo del tipo toxicológico, biológico y físico-químico.

Denuncias por delitos ambientales

Bajo este rubro, el Pronaces recabó un expediente de la Fiscalía Especial en Delitos Ambientales de la Procuraduría General de la República, el cual incluye una denuncia por descargas de sólidos provenientes de una empresa contratada por la empresa Petróleos Mexicanos (PEMEX) para tratar residuos de la planta deshidratadora Agatha en 1999. Ante la flagrancia de la descarga en el arroyo grande en el municipio de Ixhuatlán del Sureste. En el marco de la indagación del delito, se tomaron muestras de agua y sedimentos del arroyo y de la presa de almacenamiento 1004 Moloacán, éstas fueron analizadas para verificar el cumplimiento de la NOM-052-ECOL-1993, y 053-ECOL-1993, adicionalmente se analizaron sus propiedades para ver si contenía propiedades enlistadas en los criterios CRETIB. Los resultados confirmaron la flamabilidad y carácter infeccioso de las muestras. Un análisis independiente fue realizado por PEMEX, la concentración total de Hidrocarburos Totales fue de 102,519 ppm, el volumen total de hidrocarburos de 1,408 m³ y la masa total de hidrocarburos de 1,380 toneladas en las coordenadas Lat. 17°58'07", long 94°22'78" (Causa penal 62/999).

De acuerdo con la ONG, la denuncia penal presentada por el vertido intencional y programado de desechos peligrosos a cielo abierto en terrenos del municipio de Ixhuatlán del Sureste, en el sur de Veracruz, la denuncia penal presentada por Greenpeace y CEMDA contra Pemex representa el primer caso de residuos peligrosos y su disposición que se consigna ante un juez federal. Es también el primer caso en el que se ejercita la acción penal y se ejecutan órdenes de aprehensión contra funcionarios de Pemex por el vertido de desechos tóxicos al ambiente. El éxito relativo de esta demanda reside en la aplicación de las sanciones por delitos ambientales consignados en el Código Penal.

Algunas consideraciones sobre las investigaciones ambientales, de salud y ecotoxicología realizadas en la RESA Istmo veracruzano

Las investigaciones sobre la región petrolera del Istmo ofrecen evidencia científica de la grave afectación a los ecosistemas acuáticos y terrestres asociados a la actividad petrolera. Estudios iniciales sobre enfermedades transmitidas por vectores y cambio climático, sobre la presencia de hidrocarburos en medios acuáticos y sobre la calidad del aire, se han realizado desde la década de 1970. Sin embargo, un pendiente importante es la caracterización de las partículas atmosféricas PM₁₀ y PM_{2.5}, de vital importancia por el antecedente ofrecido por los laboratorios Greenpeace que identificaron múltiples cancerígenos y dioxinas en suelo y aire, por lo que la confirmación de estos contaminantes resulta apremiante en vistas a garantizar condiciones de salud ambiental para una población creciente en la región.

La consignación de responsables por delitos ambientales es un avance en esta región, sin embargo, caracterizaciones profundas de la contaminación serían útiles para identificar los pasivos ambientales.

Referencias

Causa penal 62/999, Fiscalía en delitos ambientales. Procuraduría General de la República.

Diario Oficial de la Federación, DOF. (2018). DECRETO por el que se establece zona de reserva parcial de aguas nacionales superficiales para los usos doméstico y público urbano en las cuencas Alto Río Coatzacoalcos, Bajo Río Coatzacoalcos, Bajo Río Uxpanapa, Río Huazuntlán y Llanuras de Coatzacoalcos, y zona de reserva parcial de aguas nacionales superficiales para uso ambiental o conservación ecológica en la cuenca Llanuras de Coatzacoalcos, en la Subregión Hidrológica Río Coatzacoalcos, de la Región Hidrológica número 29 Coatzacoalcos. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5517108yfecha=23/03/2018#gsc.tab=0

González-Rocha, S., Cervantes-Pérez, J. y Baldasano-Recio, J. (2016) Air Quality Trends in Metropolitan Zones in Veracruz, México. *Open Journal of Air Pollution*, 5, 64-94. doi: [10.4236/ojap.2016.52007](https://doi.org/10.4236/ojap.2016.52007).

Brigden, K., Wang, M., Labunska, I., Santillo, D. (2016). Technical Report. Analysis of discharged water, water from the River Coatzacoalcos, and of soil and surface dust collected in the vicinity of the Complejo Petroquímico Pajaritos PVC and related chemicals facility, Veracruz (Mexico) for the presence of metals and organic chemical contaminants following the explosion and fire in April 2016. *Greenpeace Research Laboratories* <https://www.greenpeace.to/greenpeace/wp-content/uploads/2017/05/TR-06-2016-Mexico-PVC-fire.pdf>

- Montero-Mendoza, E., (2011). Mortalidad en un área indígena de Veracruz. Enfermedades transmisibles y no transmisibles. *Papeles de Población*, 17(68), 41-68. <https://www.scielo.org.mx/pdf/pp/v17n68/v17n68a3.pdf>
- Riojas-Rodríguez H., Baltazar-Reyes MC, y Meneses F. (2008). Volatile Organic Compound Presence in Environmental Samples Near a Petrochemical Complex in Mexico. *Epidemiology*, 19 (1), S219. https://journals.lww.com/epidem/fulltext/2008/01000/volatile_organic_compound_presence_in.49.aspx
- Riojas-Rodríguez, H., Hurtado-Díaz, M., Litai-Moreno, G., Santos-Luna, R., Texcalac-Sangrador, J.L., (2007). Estudio Piloto sobre Escenarios de Riesgos en Salud asociados al Cambio Climático en Regiones Seleccionadas de México: Informe Final. *Instituto Nacional de Salud Pública*. <https://www.yumpu.com/es/document/read/21875711/estudio-piloto-sobre-escenarios-de-riesgos-en-salud-bvsde->
- Ruiz-Fernández, A.C., Betancourt-Portela, J.M., Sericano, J.I., Sanchez-Cabeza, J.A., Espinosa, LF., Cardoso-Mohedano, J.G., Pérez-Bernal, L.H., Garay Tinoco, J.A., (2016). Coexisting sea-based and land-based sources of contamination by PAHs in the continental shelf sediments of Coatzacoalcos River discharge area (Gulf of Mexico). *Chemosphere*, 144, 591-598, doi.org/10.1016/chemosphere.2015.08.081. https://www.researchgate.net/publication/282126890_Coexisting_sea-based_and_land-based_sources_of_contamination_by_PAHs_in_the_continental_shelf_sediments_of_Coatzacoalcos_River_discharge_area_Gulf_of_Mexico

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT (2018). Informe del estudio de evaluación del Basurero Las Matas, Veracruz. <https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/estudios/2018/Resumen%20Informe%20Las%20Matas%20Veracruz.pdf>

Torres-Bejarano, Franklin y Ramirez-Leon, Hermilo y Denzer, Ralf y Frysinger, S. y Hell, Thorsten y Schlobinski, Sascha. (2013). Linking Numerical Water Quality Models in an Environmental Information System for Integrated Environmental Assessments. *Journal of Environmental Protection*, 04, 126-137. 10.4236/jep.2013.47A015.

Consideraciones finales sobre las investigaciones acopiadas en esta etapa

Los resultados de las investigaciones acopiadas en esta etapa del macro expediente permiten concluir que en el 90% de los casos se rebasaron los límites de contaminantes en las muestras tomadas de los ríos, arroyos y manantiales.

En las investigaciones reunidas en esta etapa para el Estado de Guanajuato se han identificado contaminantes atmosféricos como compuestos volátiles orgánicos, metales en estado gaseoso, e incluso bacterias patógenas para la salud pulmonar. Es de resaltar que para la mayoría de estas sustancias no existe normatividad aplicable y que el muestreo, realizado en 2015 no ha sido repetido, por lo que no existen datos actualizados de la calidad del aire de la región que contemplen un espectro amplio de contaminantes, más allá de los 5 establecidos en las normas oficiales mexicanas 20-SSA1-2014, NOM-22-SSA1-2010, 23-SSA1-1993, 25-SSA1-2014.

Contaminantes emergentes como medicamentos y micro plásticos han sido identificados en las RESA Puebla-Tlaxcala y el Valle del Mezquital Norte, para los cuales, México tampoco cuenta con normatividad aplicable y representan un riesgo para la vida acuática, esta situación es crónica en la región de la presa Endhó, donde se han identificado pesticidas como HCH, contaminantes orgánicos persistentes y multiplicidad de medicamentos como tramadol, dexametasona y levonogestrel, sólo por mencionar algunos.

Los estudios sobre la absorción de contaminantes por parte de la población humana sólo han sido desarrollados en la RESA El Salto, donde se identificaron pesticidas en la leche de madres que amamantan.

Las investigaciones sobre los efectos de la contaminación ambiental sobre la salud son escasos en esta etapa, pero resalta el realizado en la RESA El Salto que identificó pesticidas como HCH, heptacloro epóxido, Aldrín y Dieldrín en la leche materna.

Los estudios sobre contaminación del suelo se han desarrollado en menor medida y han estado orientados a la identificación de pesticidas y a su biodegradación, pero no se encontraron investigaciones que identifiquen el paso de los contaminantes de las matrices ambientales a los vegetales.

Con los trabajos acopiados en esta etapa se han contabilizado 46 sustancias contaminantes de cuerpos de agua en la RESA Istmo, 5 tipos de pesticidas y 21 tipos de fármacos y 5 contaminantes orgánicos persistentes en la RESA Valle del Mezquital.

Se identificaron noventa y siete compuestos volátiles orgánicos en el aire de la Zona Metropolitana del Valle de Guadalajara; cinco metales pesados en la RESA Valle del Mezquital Norte; mientras que en la RESA Valle del Mezquital presencia únicamente de los 5 contaminantes atmosféricos criterio.

Respecto de los contaminantes caracterizados en suelos y sedimentos, se confirmaron seis metales pesados, nueve pesticidas y tres contaminantes orgánicos persistentes en la RESA El Salto; mientras que en el Istmo Veracruzano se identificaron compuestos volátiles orgánicos del complejo BTEX.

Es importante resaltar que en México no existe regulación sobre algunos de los contaminantes atmosféricos identificados en la región de la Cuenca de la Independencia y que, por lo tanto, los resultados han tenido que ser evaluados a la luz de normatividades de otros países, como la canadiense.

Las particularidades de cada región deben ser evaluadas de conjunto con los reportes del macro expediente de etapas anteriores para determinar el alcance de lo investigado hasta la fecha, así como las necesidades de investigación pendientes en el ámbito de la toxicología y la toxicología ambiental.

La literatura científica revisada en el marco del presente informe constituye los avances de los últimos años sobre la situación toxicológica ambiental que se vive en el país y a la que se debe dar seguimiento. En este sentido, son estudios fundamentales con los que se puede establecer un diagnóstico más preciso sobre la dispersión de sustancias tóxicas contaminantes. Además, se puede apreciar el creciente número de sustancias químicas o el incremento en las concentraciones de algunas que ya habían sido encontradas en diferentes matrices ambientales o tejidos biológicos.

El trabajo de caracterización de sustancias tóxicas en el ambiente es una labor muy relevante y representa la base del quehacer científico en materia de contaminación ambiental. Este conocimiento debe ser considerado el fundamento sobre el que los tomadores de decisiones y otras autoridades desarrollan los planes de la protección de la salud y de la conservación de los recursos naturales.

No obstante, es importante resaltar que esta valiosa labor debe de buscar un mayor alcance en los objetivos de investigación, que incluyan, no solo la caracterización de sustancias, sino el análisis de los efectos en diferentes tipos de poblaciones humanas y de organismos silvestres, que consideren el estudio de la posible biomagnificación de tóxicos y los puntos geográficos de riesgo en dónde esto sucede. Además, sería importante que los estudios incluyeran patrones espaciales y temporales de distribución y dispersión de las sustancias tóxicas que se consideren prioritarias, principalmente en favor de la protección de la salud ambiental en regiones y temporadas de mayor riesgo.

A pesar de ello, los resultados actuales ya permiten confirmar la presencia de contaminantes de riesgo para la vida acuática y para la salud, así como la presencia de agentes patógenos en la atmósfera de estas regiones. La múltiple exposición de decenas de sustancias en agua, suelo y aire da sustento a la caracterización de éstas como Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental, caracterizadas no sólo por la presencia de sustancias tóxicas sino por la permanencia de las actividades que las producen, en este caso, los confinamientos de residuos, las presas receptoras de aguas residuales de otras ciudades, los conglomerados industriales y las actividades agroindustriales.