

## ANÁLISIS ESPACIAL DE METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LA SUBCUENCA ATOYAC-ZAHUAPAN Y RIESGOS DE SALUD PÚBLICA

Numa P. **Castro-González**<sup>1</sup>, Francisco **Calderón-Sánchez**<sup>2\*</sup>, Guillermo J. **Pérez-Marroquín**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Tlatlauquitepec, Puebla, México. 73900.

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados Campus-Puebla. Cholula, Puebla, México. 72760.

\*Autor de correspondencia: fsanchezs@colpos.mx

### RESUMEN

En la subcuenca del Alto Balsas en los estados de Puebla y Tlaxcala, los suelos agrícolas son irrigados con aguas residuales que han acumulado metales pesados. Estos compuestos representan un riesgo para la salud, debido a que pueden ser ingeridos, inhalados o absorbidos y generar enfermedades cancerígenas y no cancerígenas. El objetivo de la investigación fue determinar el contenido de Cd, Pb, Cr y As en suelos agrícolas de cuatro zonas irrigadas: Tepetitla de Lardizabal, Nativitas, Santa Isabel Tetlatlahuca y Tecamachalco, las determinaciones fueron realizadas por medio de un ICP - OES. Se calculó el riesgo de salud para hombres, mujeres y niños utilizando las ecuaciones de la Unites Estates Enviromental Protection Agency (USEPA) y se calculó en términos porcentuales, el área de alcance de la contaminación de los suelos con metales pesados por medio de un análisis espacial. Se encontró que los mayores riesgos son para los adultos y fueron el Cd y Cr los metales más peligrosos para la población. La vía de exposición que representa el mayor riesgo fue oral en los niños y en adultos la vía dérmica. El riesgo de cáncer fue mayor en adultos, con orden descendente Cd>As> Cr>Pb. En cuanto a la dimensión de la afectación, 51 municipios de la subcuenca del Alto Balsas y canal de Valsequillo son afectados, donde el Cd, Pb y Cr fueron encontrados en todos, el As en 99% de la superficie total.

**Palabras clave:** aguas residuales, contaminación, riesgo de cáncer.

### INTRODUCCIÓN

Los suelos agrícolas irrigados con aguas residuales no tratadas, representan un riesgo para la salud pública, tanto para los agricultores, como para la población de su entorno (Mitra *et al.*, 2022). En la subcuenca del Alto Balsas, conformada por los ríos Atoyac y Zahuapan en los estados de Puebla y Tlaxcala, se constituyen los distritos de riego No. 056 Atoyac-Zahuapan en la región centro sur de Tlaxcala y el No. 030, que deriva de la presa Valsequillo en el estado de Puebla. En esta zona, los suelos se irrigan con una mezcla de aguas residuales de diferentes fuentes, las de mayor riesgo, son las que provienen de los complejos industriales de la región (Estrada-Rivera *et al.*, 2022), pero también se suman aquellas de origen urbano y los mismos retornos de agua de campos agrícolas donde se usan agroquímicos (Castro-González *et al.*, 2019).

Entre otros contaminantes que conducen las aguas residuales se encuentran los metales pesados, los cuales pueden ser retenidos en el suelo (Ríos-Reyes *et al.*, 2020; Yan *et al.*, 2022) y afectar la cadena alimentaria, en consecuencia, la salud pública de los consumidores (De Moya-Sánchez *et al.*, 2021). En la región de estudio, los principales cultivos son la alfalfa, el maíz y las hortalizas, en cuyo proceso de producción las familias campesinas están en contacto directo con los contaminantes al realizar diferentes labores agrícolas; sin

**Citation:** Castro-González NP, Calderón-Sánchez F, Pérez-Marroquín GJ. 2024. Análisis espacial de metales pesados en suelos agrícolas de la subcuenca Atoyac-Zahuapan y riesgos de salud pública. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. <https://doi.org/10.22231/asyd.v21i1.1593>

**Editor in Chief:**  
Dr. Benito Ramírez Valverde

Received: April 25, 2023.  
Approved: June 1, 2023.

**Estimated publication date:**  
December 14, 2023.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International license.



embargo, la mayoría de la población asentada en esta región, que de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2023) es de 1,451,013 habitantes, puede estar expuesta a dichos contaminantes por la ingestión en los alimentos producidos, la inhalación de aquellos suspendidos en el aire o por el contacto directo con los suelos contaminados.

Briffa *et al.* (2020), Mitra *et al.* (2022), Ohiagu *et al.* (2022) y otros autores, mencionan efectos neurotóxicos, cardiovasculares, cancerígenos y genotóxicos de los metales pesados; además del daño a órganos específicos como el hígado, riñón, piel y el debilitamiento del sistema inmunológico, entre otros aspectos. Para la región de estudio los efectos son visibles, Ortega *et al.*, (2023) reportan serios problemas del sistema renal de niños, que asocian a la contaminación ambiental; por otra parte, debido a efectos neurotóxicos, estos infantes pueden afectarse y padecer un pobre desarrollo a nivel cerebral y de los diferentes órganos; además, en la población pueden ser la causa de enfermedades cardiovasculares y cancerígenas (Mitra *et al.* 2022; Agency for Toxic Substances and Disease Registry: ATSDR, 2012; Centers for Disease Control and Prevention: CDC, 2023). Esta última enfermedad, debido a las alteraciones de las proteínas y patrones de expresión de diversos genes, lo que los sitúa en un estado de alto riesgo de desencadenar diversos trastornos de salud (Haidar *et al.*, 2023).

Estudios realizados en suelos de zonas industriales de India (Kumar *et al.*, 2019) y China (Yan *et al.*, 2022; Han y Gu, 2022), reportan valores de al menos siete metales pesados, pero concluyen que Cd, As y Pb, rebasan los límites permitidos y son los de mayor peligrosidad ambiental y para la salud de la población; además, que son las mujeres y los niños los de mayor susceptibilidad. Kumar *et al.* (2019) encuentran valores de 14.60, 148.70, 61.87 y 161.42 mg/kg, respectivamente, para Cd, As, Pb y Cr en India y Han y Gu (2022) de 0.30, 26.7 y 79.97 mg/kg para Cd, Pb y Cr, respectivamente, en China. Para evaluar el riesgo que representa la presencia de los metales en el suelo sobre la salud de la población, la USEPA, propone metodologías basadas en la concentración de estos contaminantes y en una serie de características de la población expuesta, para definir índices de riesgos de enfermedades cancerígenas y no cancerígenas por la inhalación, el contacto con la piel y la ingestión de estos contaminantes. Por otra parte, existen herramientas del sistema de información geográfico (SIG), que permiten definir espacialmente la magnitud del problema de contaminación de una determinada superficie, a partir de puntos específicos de muestreo. Con estas dos propuestas, se puede alertar a la población de la región de estudio, sobre la intensidad del riesgo que representa la presencia de metales pesados en el suelo de una determinada zona, el metal más peligroso, la vía más importante de ingreso al organismo y la presencia o no, de enfermedades cancerígenas y no cancerígenas.

El objetivo de este trabajo, fue determinar el riesgo de enfermedades cancerosas y no cancerosas por la ingesta, inhalación y contacto cutáneo de Cd, Pb, Cr y As, presentes en suelos agrícolas y por medio de análisis espacial, definir espacialmente las áreas de influencia de la contaminación de cuatro zonas irrigadas por los ríos Atoyac y Zahuapan en los estados de Tlaxcala y Puebla en México.

## MARCO TEÓRICO

### **Aguas residuales en la agricultura**

Con el paso del tiempo, la demanda de agua en el mundo se incrementa de manera continua. El crecimiento poblacional, la mayor urbanización y la intensificación de las actividades industriales y agrícolas, entre otras causas (Narsimha *et al.*, 2018), han detonado la necesidad de hacer un uso más eficiente de este recurso. Al ser un solvente universal, el agua se utiliza en múltiples procesos que desafortunadamente conducen a su fácil contaminación, desencadenando una serie de problemas de índole ambiental, de salud pública y económicos (Mishra *et al.*, 2023). En su revisión, Singh (2021) menciona que más de 50% de las fuentes de agua en el mundo, se encuentran contaminadas con aguas residuales no tratadas de origen industrial, doméstico y agrícola, lo cual consecuentemente, es debido a que más de 80% de las aguas residuales, se liberan sin ningún tratamiento, alcanzando cifras de 95% en países subdesarrollados, por lo que la recomendación de United Nation (2023) es someter a tratamiento las aguas residuales y reutilizarlas.

La agricultura, utiliza 70% del agua disponible y el uso de las aguas residuales tratadas para riego, genera controversias entre autores, por tener efectos benéficos y negativos para el suelo y las plantas. Se reportan beneficios para los cultivos al incrementar en el suelo el contenido de materia orgánica, nutrientes esenciales como N, P, K, mejoramiento de la actividad microbiana y acondicionamiento de su estructura física; sin embargo, tiene efectos negativos, por incrementar la contaminación de suelos y alimentos, eleva en el suelo el contenido de microorganismos patógenos, de antibióticos y de metales pesados (Singh, 2021). Los efectos negativos se agravan cuando se utilizan las aguas residuales sin tratamiento. Estudios realizados en río Atoyac, han demostrado que existe una carga bacteriana (Coliformes fecales) importante, que genera enfermedades gastrointestinales en la población y representa un gasto económico su tratamiento (Aquino *et al.*, 2015)

### **Los metales pesados como contaminantes**

Nayak y Pathan (2023) mencionan que, de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud, 25% de las enfermedades se originan por la contaminación de agua, suelo y aire, particularmente, las aguas residuales que contienen cantidades importantes de colorantes orgánicos, agroquímicos y metales pesados. Se conoce que éstos últimos, son componentes naturales de la corteza terrestre y a través de la erosión natural ocasionada por el agua y el viento, son distribuidos de manera natural en el medio ambiente en forma de polvo o son filtrados a los ríos; sin embargo, estos procesos naturales, emiten una menor cantidad de metales al entorno socio productivo, que las diversas actividades antropogénicas desarrolladas por el hombre.

El riego frecuente, aunado a condiciones específicas del suelo, como alto contenido de materia orgánica derivado de la aplicación del estiércol, el pH bajo y otros factores, pueden favorecer que los metales pesados se acumulen en el suelo. Estos elementos químicos, que pueden llegar a ser altamente tóxicos, poseen baja densidad, peso atómico entre 63.5 y 200.6 g/mol y gravedad específica mayor a 5 g/cm<sup>3</sup>. Se considera que su peligrosidad aumenta debido a que no pueden degradarse y con el paso del tiempo, se bioacumulan y biomagnifican.

Dentro de los elementos que son considerados con mayor toxicidad, se encuentra el Cd, Pb, As, Hg y Cr; sin embargo, existen otros que, aunque tienen funciones metabólicas dentro del organismo, al ser ingeridos en cantidades superiores a las establecidas por las diferentes normas, llegan a presentar toxicidad, tal es el caso del Zn, Co, Ni, Cu y Se (Turdean, 2011). Por estas razones, se han realizado numerosos trabajos a nivel mundial relacionados con el efecto que dichos metales ejercen sobre la salud pública y la seguridad alimentaria. En el caso específico de la subcuenca del Alto Balsas (Atoyac y Zahuapan), autores como García -Nieto *et al.* (2011); Castro-González *et al.* (2019), han reportado concentraciones importantes de metales pesados, entre ellos, Pb y Cd en el agua de riego y en los suelos agrícolas.

La dispersión de grandes cantidades de estos elementos en el medio ambiente, provoca que sean transferidos a la cadena alimentaria. Los metales pesados, al ser elementos que tienen una alta densidad en comparación con el agua, se encuentran presentes en diversas matrices en forma de trazas. Su pesadez y toxicidad están interrelacionadas, ya que los metales pesados pueden inducir toxicidad aun en dosis bajas (Bhargava *et al.*, 2012; Govind y Madhuri, 2014; Dai *et al.*, 2016; Giromini *et al.*, 2016). Por otra parte, se sabe que los metales pueden ocasionar trastornos a la salud de manera individual o potencializar su efecto al actuar combinados con otros metales; sin embargo, las relaciones de estos compuestos son complejas y a la fecha no hay mucha claridad (Haidar *et al.*, 2023). En un estudio sobre daño en el hígado, Huang *et al.* (2022) encontró una fuerte concentración de As, Pb, y Cd asociados al debilitamiento funcional de este órgano; similarmente, en otro estudio Chang *et al.* (2023) concluyen que la población rural de China esta co-expuesta a altas concentraciones de Cr, Co, Cd y Pb, padeciendo afecciones serias.

## METODOLOGÍA

### Área de estudio

El área de estudio se localiza en la región centro-sur del estado de Tlaxcala y el sur-este del estado de Puebla. Pertenece a la región hidrológica No. 18 y está situado entre los paralelos 18° 50' y 19° 20' N y los meridianos 97° 40' y 98° 20' O. Para determinar las zonas de muestreo se realizaron diversos recorridos de campo, que permitieron ubicar sitios representativos que son irrigados con agua que fluye en los ríos Atoyac y Zahuapan, a través de tomas directas o conducida en canales.

Se tomó en cuenta la ubicación de vertederos de diferentes fuentes de contaminación, aquellos donde confluye el agua de origen industrial, retornos de agua de los mismos terrenos de riego y el agua de zonas urbanas. Se definieron cuatro áreas de muestreo, ubicándose de la siguiente manera: Zona 1 Tepetitla de Lardizabal, Zona 2 Nativitas, ambas en el estado de Tlaxcala y correspondientes al río Atoyac; La Zona 3 Santa Isabel Tetlatlahuaca, Tlaxcala, que recibe el agua del río Zahuapan y la Zona 4 correspondió a Tecamachalco, Puebla, irrigado con aguas del canal de Valsequillo. Se seleccionó un área de influencia según el radio de alcance de los datos obtenidos en el muestreo de suelo en campo, teniendo un total de 51 municipios dentro del área de estudio.

### Muestreo de suelos

En cada zona fueron muestreados cuatro sitios, en cada uno de estos, se tomaron 10 submuestras con las que se hizo una muestra compuesta. A partir del río, se dio seguimiento a los canales que distribuyen el agua de riego en un radio aproximado de un km, donde se ubicaron los sitios de muestreo, que correspondieron a parcelas de alfalfa con un rango de superficie de media a una hectárea, pertenecientes a productores cooperantes que estuvieron de acuerdo para participar en el estudio. La muestra de suelo se tomó de la capa superficial de 0 a 30 cm, debido a que los metales en los suelos cultivados, son generalmente más homogéneamente distribuidos a este nivel (Esmaili *et al.*, 2014). El manejo y preparado de las muestras de suelo se realizó de acuerdo la NOM-021-SEMARNAT-2000.

### Determinación de metales pesados

En el laboratorio, se digirieron las muestras bajo el protocolo 3051 de la Unites Estados Enviromental Protection Agency (EPA), utilizando un horno de microondas (CEM-MarsX, CEM corporation Mathews, Notrh Carolina); posteriormente, se filtraron en papel Wathman 42, aforadas con agua desionizada a 50 ml y refrigeradas hasta su análisis. La determinación de los metales pesados Cd, Pb, Cr y As fue realizada por medio de espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP - OES) (Varian 730-ES). Todos los productos químicos utilizados fueron de grado reactivo analítico.

### Análisis de riesgos

El riesgo para la salud, fue evaluado a partir de las concentraciones de metales pesados (Cd, As, Cr y Pb) detectados en el suelo y considerando que los habitantes se encuentran expuestos a estos elementos, que de acuerdo a la International Agency for Research of Cancer (IARC, 2023), son clasificados como cancerígenos y según Chen *et al.* (2015), pueden ingresar al organismo por ingestión, contacto dérmico e inhalación. Para ello, se emplearon las siguientes ecuaciones que evalúan la exposición a sustancias tóxicas propuestas por USEPA, (2001; 2011):

$$ADI_{dermal} = C_{soil} \times \frac{SA \times AF \times ABS \times ED}{BW \times AT} \times 100^{-6} \quad (1)$$

$$ADI_{ing} = C_{soil} \times \frac{IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 100^{-6} \quad (2)$$

$$ADI_{inh} = C_{soil} \times \frac{InhR \times EF \times ED}{PFT \times BW \times AT} \quad (3)$$

donde  $ADI_{dermal}$ ,  $ADI_{ing}$  y  $ADI_{inh}$ : corresponden al promedio de consumo diario de suelo, ya sea por contacto dérmico, ingestión o inhalación ( $\text{mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ), respectivamente;  $C_{soil}$ : concentración de metales en el suelo analizado ( $\text{mg kg}^{-1}$ );  $SA$ : área de la superficie dérmica expuesta ( $\text{cm}^2$ );  $AF$ : factor de adherencia ( $\text{kg cm}^2 \text{ día}^{-1}$ );  $ABS$ : factor de absorción dérmico (sin unidades);  $ED$ : tiempo de exposición (año);  $IngR$  e  $InhR$  representan la taza

de ingestión e inhalación de suelo ( $\text{mg día}^{-1}$  y  $\text{m}^3 \text{ día}^{-1}$ , respectivamente);  $EF$ : la frecuencia de exposición ( $\text{día año}^{-1}$ );  $PFT$ : factor de emisión ( $\text{m}^3 \text{ día}^{-1}$ );  $BW$ : peso corporal (kg) de la persona expuesta;  $AT$ : periodo de tiempo (día) sobre el cual se promedia la dosis (para no cancerígenos:  $AT=ED \times 365$  días, para cancerígenos  $AT$ : expectativa de vida  $\times 365$  días) en este caso se utilizó para hombres y mujeres un valor de 78 años y de 16 años para niños.

Para mujeres, hombres y niños se calculó el cociente de riesgo ( $HQ$ ) y el índice de riesgo ( $HI$ ) para metales individuales y múltiples respectivamente, y para las vías de exposición, mediante el empleo de las ecuaciones propuestas por Khan *et al.* (2008); Bermúdez *et al.* (2011) y Khan *et al.* (2013). El riesgo de cáncer se calculó a partir del resultado obtenido a través de la ecuación reportada por Castro-González *et al.* (2017).

$$HQ = \frac{ADI_i}{RfD_i} \quad (4)$$

$$HI \sum HQ_i = \sum \frac{ADI_i}{RfD_i} \quad (5)$$

$$HI \sum HQ_{\text{exp}} = HQ_{\text{dermal}} + HQ_{\text{ingestion}} + HQ_{\text{inhalation}} \quad (6)$$

donde  $RfD$ : dosis de referencia de las sustancias peligrosas ( $\text{mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) para cada vía de exposición;  $RfD_{\text{dérmica}}$ : 1.00E-05, 6.00E-05, 1.23E-04, 5.25E-04, para Cd, Cr, As, Pb, respectivamente;  $RfD_{\text{ingestión}}$ : 3.00E-04, 1.00E-03, 3.00E-03, 3.50E-03, para As, Cd, Cr y Pb;  $RfD_{\text{inhalación}}$ : 2.86E-05, 5.71E-05 para Cr y Cd (Ferreira-Baptista, 2005; Integrated Risk Information System IRIS, 2015).

Del resultado obtenido se calculó el índice de riesgo de cáncer (CRI) mediante la siguiente ecuación:

$$Risk \sum ADI_i \times SF_i \quad (7)$$

donde  $SF_i$ : factor dependiente ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de Cd, Cr y As, que son considerados como cancerígenos (Chen *et al.*, 2015) y el Pb como probablemente cancerígeno (IARC, 2015). Los valores de  $SF_i$  para vía oral fueron: 15.0, 1.5, 0.5 y 0.0085 para Cd, As, Cr y Pb, respectivamente (IARC, 2015); por la vía inhalatoria: 42.0, 15.1, 6.3 y 0.042 para Cr, As, Cd, y Pb; y para la vía dérmica se considera únicamente al As con un valor de 3.66 (Ferreira-Baptista, 2005; Office of Environmental Health Hazard Assessment: OEHHA, 2009).

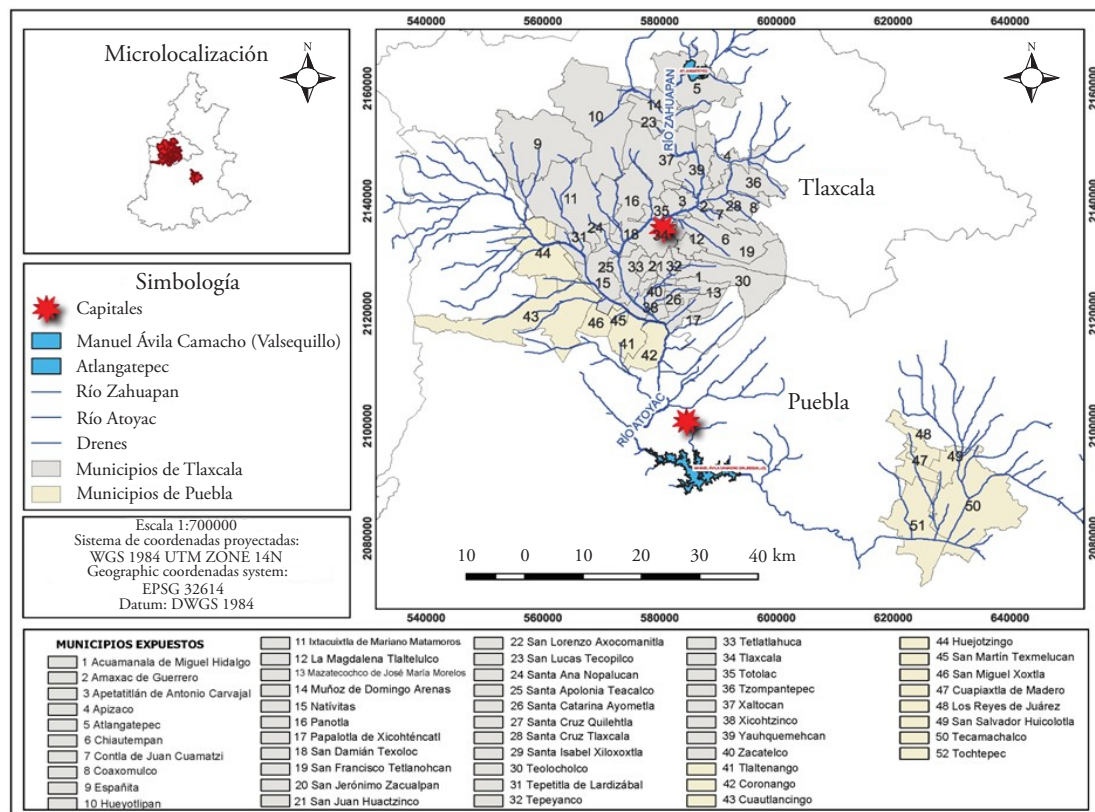
### Análisis espacial

Se seleccionó un área de influencia según el radio de alcance de los datos obtenidos en el muestreo de suelo en campo, teniendo un total de 51 municipios dentro del área de

estudio (Figura 1), 40 del estado de Tlaxcala y 11 de Puebla que utilizan el agua de los ríos Atoyac y Zahuapan. Los municipios 47 a 51 se encuentran irrigados por aguas del canal de Valsequillo, el cual conduce las aguas provenientes de la presa Manuel Ávila Camacho. El análisis espacial fue realizado utilizando el software QGIS 3.22 Białowieża, que es un SIG (Sistema de Información Geográfica). Dicha herramienta de análisis espacial, fue desarrollada con métodos de interpolación y con procedimientos para predecir un valor donde no se ha muestreado, convirtiendo observaciones puntuales en superficies continuas (Journel y Huijbregts, 1978; Goovaerts, 1997; Wallo y Cuestas, 2006).

### Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el paquete SAS versión 9.0 (2002), creando un Modelo Lineal General (GLM) para determinar las diferencias en HQ, HI y riesgo de cáncer entre hombres, mujeres y niños. Para la comparación de medias, se realizó la prueba de Tukey con un nivel de confianza de 95% ( $p \leq 0.05$ ).



Fuente: elaboración propia (RyV) con datos del INEGI

**Figura 1.** Municipios pertenecientes a la subcuenca del Alto Balsas con suelos agrícolas irrigados con aguas residuales en los estados de Puebla y Tlaxcala.

## RESULTADOS

### Metales en suelos irrigados con aguas residuales

Los resultados obtenidos del análisis de los suelos irrigados con aguas de los ríos Atoyac, Zahuapan y canal de Valsequillo, mostraron niveles de metales pesados similares en las cuatro zonas muestreadas. Únicamente el Cr mostró diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre la zona tres, que presentó un valor superior, respecto a la zona cuatro (Cuadro 1).

En términos generales, hay una tendencia a tener mayores concentraciones de Cd, Pb y Cr en la zona tres, que corresponde al Río Zahuapan, en el cual se descargan los residuos del estado de Tlaxcala. La menos afectada por Pb, Cr y As, es la zona de Tecamachalco, que puede deberse a que la presa Valsequillo, sirve como filtro natural de estos contaminantes. La norma mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, establece concentraciones de referencia totales en suelo para Cd, Pb, Cr y As, concentraciones respectivas de 37, 400, 280 y 22  $\text{mg kg}^{-1}$ , en los suelos agrícolas con superficies menores a 1000  $\text{m}^2$ , determinadas por espectrofotometría de flama. De acuerdo con la norma, para superficies mayores de la antes mencionada, se tiene que desarrollar un modelo conceptual para seleccionar metodologías de muestreo y análisis de muestras. Los valores del presente estudio se reportan en  $\text{mg/gr}$ , obtenido por espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente, los cuales no tienen referentes en la norma. Con respecto a los valores reportados en estudios realizados por Han *et al.* (2022) en China, son muy bajos los encontrados en esta investigación, y aún más distantes de los reportados por Kumar *et al.* (2019) en India; sin embargo, las concentraciones de metales pesados encontrados en esta cuenca, son similares a los que reportan Núñez-Gastélum *et al.* (2019) para Pb y Cd en los suelos agrícolas del Valle de Juárez, en la zona fronteriza de México y USA.

### Vías de ingreso de los metales pesados al organismo

La vía oral mostró diferencias significativas ( $p \leq 0,001$ ), representando un riesgo mayor en el caso de los niños, donde se detectaron los siguientes valores; As ( $2,09\text{E}-01 \pm 2,09\text{E}-01$ ), Cr ( $7,02\text{E}-02 \pm 1,68\text{E}-02$ ), Pb ( $4,99\text{E}-02 \pm 1,32\text{E}-02$ ) y Cd ( $1,46\text{E}-02 \pm 3,29\text{E}-03$ ), proseguida de la vía dérmica. Hasta antes de los 16 años, tiene mayor posibilidad que los metales ingresen a través de los alimentos que por exposición al medio ambiente.

**Cuadro 1.** Contenido de metales y As ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en los suelos agrícolas irrigados con aguas residuales en la subcuenca del Alto Balsas en los estados de Puebla y Tlaxcala, México.

Metales y Arsénico				
Zona	Cd	Pb	Cr	As
1	1.16±0.2 <sup>a</sup>	14.79±1.2 <sup>a</sup>	19.04±3.3 <sup>ab</sup>	5.16±1.1 <sup>a</sup>
2	1.15±0.3 <sup>a</sup>	13.03±4.8 <sup>a</sup>	17.35±3.2 <sup>ab</sup>	5.91±2.2 <sup>a</sup>
3	1.42±0.5 <sup>a</sup>	17.67±7.1 <sup>a</sup>	20.25±5.8 <sup>a</sup>	5.70±1.2 <sup>a</sup>
4	1.22±0.2 <sup>a</sup>	13.60±2.6 <sup>a</sup>	14.37±2.2 <sup>b</sup>	4.51±2.6 <sup>a</sup>

Diferentes literales (ab) representan diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre Zonas. Zonas: (1) Atoyac. (2) Atoyac. (3) Zahuapan. (4) Canal de Valsequillo. (±): Desviación estándar.  
 Fuente: datos propios.



Por otra parte, la vía dérmica es la de mayor riesgo en los adultos, mostrando  $p \leq 0.001$  sobre las otras vías, manifestando valores de: Cd ( $2.11E + 01 \pm 4.73E + 00$ ), Cr ( $7.76E + 00 \pm 7.14E + 00$ ) y As ( $1.58E + 00 \pm 6.68E - 01$ ). Este resultado pudiera estar asociado a la exposición permanente que los habitantes tienen al polvo, particularmente la población campesina, quienes manipulan la tierra directamente durante toda su vida. Estos datos difieren de lo reportado por Qing *et al.* (2015) y Wei *et al.* (2015), quienes determinaron la vía oral como la principal vía de ingreso de los metales, seguida de la vía dérmica.

### Cociente de peligro (HQ)

Respecto a HQ se encontró que para Cd hubo valores de  $QH > 1$  y con diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ), siendo los adultos quienes obtuvieron los valores más altos respecto a los niños (Cuadro 2), quienes mostraron  $HQ < 1$ , lo que indica que a la edad en la que están siendo evaluados (16 años) existe menos probabilidad de que puedan presentar efectos o afecciones en su salud (USEPA, 2001).

El HI, es la sumatoria de los valores de HQ, en este trabajo no presentó diferencias significativas ( $p \geq 0,05$ ) por zona; sin embargo, el valor promedio obtenido en las cuatro zonas fue de ( $HI > 1$ ), lo que indica un alto riesgo para la población de desarrollar enfermedades no cancerosas (trastornos del sistema nervioso central, insuficiencia renal, trastornos cardiovasculares, pobre desarrollo cerebral en infantes, osteoporosis entre otras) (ATSDR, 2012). El efecto calculado por la sumatoria de los metales, presenta mayor riesgo para los hombres ( $p \leq 0,05$ ) comparado con las mujeres (Cuadro 2) y es aún menor ( $p \leq 0,05$ ) para los niños. Por otra parte, para la vía de mayor exposición a los metales en adultos, fue a través del contacto dérmico, que mostró diferencias ( $p \leq 0,05$ ) entre la exposición oral e inhalatoria

### Riesgo de cáncer

Con respecto al análisis del riesgo de cáncer, individualmente se encontró que el Cd, es el metal con mayor riesgo tanto en hombres como en mujeres, seguido en orden

**Cuadro 2.** Cociente de riesgo (HQ) en niños, hombres y mujeres por la exposición a metales pesados encontrados en suelos agrícolas en la subcuenca del Alto Balsas en los estados de Puebla y Tlaxcala, México.

Metales pesados	Niños		Hombres		Mujeres	
	Media	DS	Media	SD	Media	SD
As	8.35E-02	1.10E-01	6.36E-01 <sup>a</sup>	8.70E-01	6.45E-01 <sup>a</sup>	8.80E-01
Cd	6.00E-03 <sup>b</sup>	7.00E-03	8.38E+00 <sup>a</sup>	1.00E+01	8.47E+00 <sup>a</sup>	1.00E+01
Cr	5.10E-01 <sup>b</sup>	1.00E+00	6.26E+00 <sup>a</sup>	7.10E+00	9.23E-01 <sup>b</sup>	1.00E+00
Pb	1.90E-02 <sup>b</sup>	2.00E-02	8.40E-02 <sup>a</sup>	1.00E-01	8.52E-02 <sup>a</sup>	1.00E-01
HI $\Sigma$ HQ Cd+Pb+Cr+...	1.20E-01 <sup>c</sup>	1.77E-01	1.27E+01 <sup>a</sup>	1.88E+01	8.54E+00 <sup>b</sup>	1.25E+01

Literales (a, b, c) representa diferencia significativa  $p \leq 0.05$ , DS desviación estándar.  
 Fuente: datos propios.

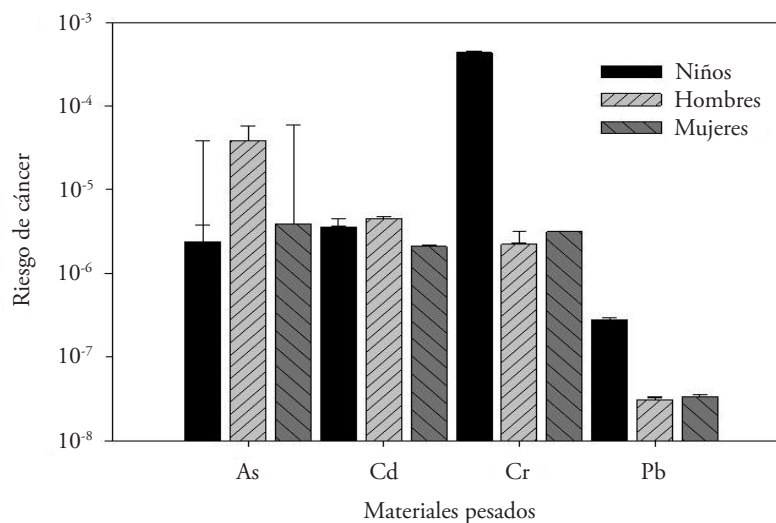
descendente: As>Cr>Pb (Figura 2). Los adultos (hombres y mujeres), presentaron valores mayores que los niños existiendo diferencia significativa ( $p \leq 0,05$ ). Los valores para esta variable, fueron superiores al rango establecido como máximo para el riesgo de cáncer ( $10^{-6}$  a  $10^{-4}$ ) por la USEPA (2001) y reportado por Hu *et al.* (2012) (Figura 2). Por lo tanto, se puede afirmar que, el riesgo de cáncer en hombres, mujeres y niños en las cuatro zonas de estudio es alto.

En el caso de los hombres, el riesgo de cáncer determinado en este trabajo puede deberse a las actividades de labranza de los suelos agrícolas, ya que están en contacto directo con estos, y no utilizan ninguna prenda protectora, por lo que la piel de sus manos, pies y caras están claramente expuestas.

Los valores altos encontrados en las mujeres, podrían deberse a que a menudo apoyan las labores de los hombres en el campo, además de lavar a mano la ropa y los utensilios que utilizan los hombres en las labores del campo (ATSDR, 2012). Se debe de considerar que niños habrían de tener condiciones de riesgo en el largo plazo, debido a que los metales pesados tienen la cualidad de ser acumulativos y no se biodegradan dentro del organismo, pudiendo permanecer en él hasta por un periodo de 30 años (USEPA, 1986; Chen *et al.*, 2015).

Los metales pesados pueden acumularse en los huesos, los riñones y otros órganos, aprovechándose de los trastornos metabólicos que padecen los niños en la etapa de crecimiento, donde el Ca y Fe son sustituidos por metales y en la etapa adulta en el caso de las mujeres se ven afectadas en la dimensión ósea y pueden llegar a padecer osteoporosis (WHO, 2010; Lim *et al.*, 2016; Feng *et al.*, 2023).

El Cd mostró valores más altos para el riesgo de cáncer cuando se comparó individualmente, seguido de As, Cr y, por último, Pb. Al determinar en las cuatro zonas el riesgo



Fuente: datos propios.

**Figura 2.-** Riesgo de cáncer en niños, hombres y mujeres por el contenido de metales pesados en suelos contaminados en la subcuenca del Alto Balsas en los estados de Puebla y Tlaxcala, México.

total de cáncer por la sumatoria del efecto que ejerce cada uno de ellos en el organismo, se encontró un valor de  $8.56E+00 (\pm 1.96E-01)$ , lo que revela alto riesgo para todos los habitantes en estas áreas y, especialmente, para los agricultores y sus familias. Esto se considera un problema grave porque los agricultores están en contacto con las tierras agrícolas y de los productos resultantes de su trabajo durante todo el año.

### Análisis espacial

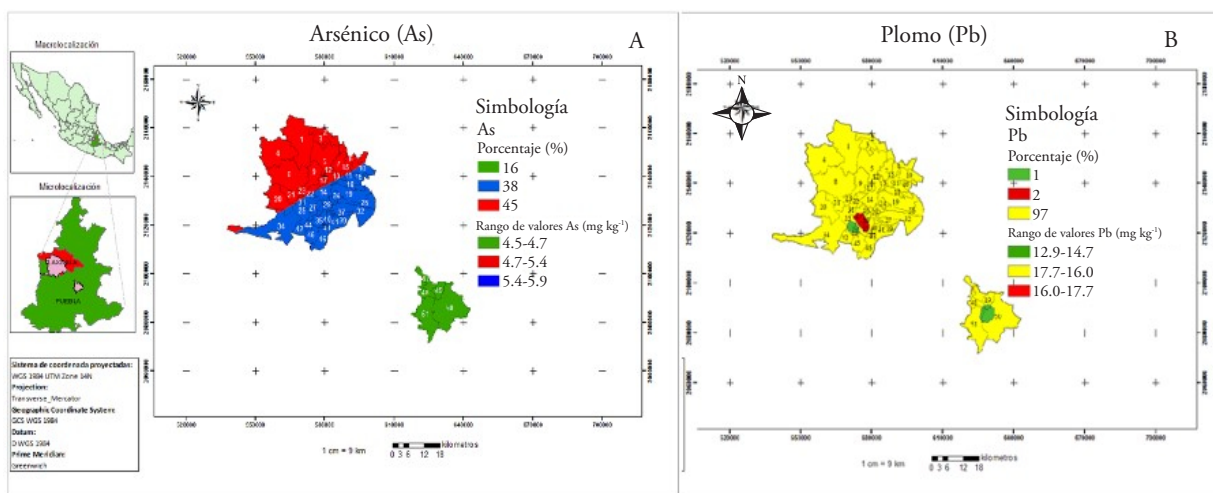
Los resultados obtenidos en el análisis espacial sobre la valoración del contenido y distribución de metales pesados en el suelo, se dividieron en alta, media y baja concentración, esto con la finalidad de presentar el valor de concentración porcentual.

Se encontró que los metales detectados, representan un riesgo para la salud de una población de aproximadamente 1,451,013 habitantes de los 51 municipios que colindan con las zonas muestreadas, mostrando con ello, la magnitud de la contaminación con estos elementos tóxicos.

En el caso del Arsénico, se evidencia que 38% de la superficie tiene niveles que van de 5.4 a  $5.9 \text{ mg kg}^{-1}$ , 45% va en un rango de  $4.7$  a  $5.4 \text{ mg kg}^{-1}$  y 16%, tiene valores de  $4.5$  a  $4.7 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que representa la presencia de este metaloide en 99% de la superficie total de los 51 municipios (Figura 3).

El plomo muestra valores que van de  $12.9$  a  $14.7 \text{ mg kg}^{-1}$  y de  $14.7$  a  $16.0 \text{ mg kg}^{-1}$  correspondiendo a 1 y 2% de la superficie respectivamente, 97% restante, presenta valores que van del  $16.0$  a  $17.7 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que indica que todo el territorio de los municipios aledaños a la subcuenca, presentan contaminación con plomo (Figura 3).

El cadmio, considerado como uno de los elementos de mayor toxicidad fue detectado con niveles de  $1.30$  a  $1.42 \text{ mg kg}^{-1}$ , correspondiendo tan solo a 1% del área de estudio y un



Fuente: elaboración propia.

**Figura 3.** Dimensión de la contaminación con As (a) y Pb (b) en los 51 municipios cercanos a la subcuenca del Alto Balsas y canal de Valsequillo.

rango de valores 1.22 a 1.30 mg kg<sup>-1</sup>, representando 3% de la superficie y valores de 1.14 a 1.22 mg kg<sup>-1</sup>, que corresponde a 96% por ciento de la superficie de los 51 municipios, hecho que es de gran preocupación, debido a que el Cd se encuentra entonces en un 100% de la superficie total de los suelos que corresponden a los 51 municipios aledaños a la subcuenca del Alto Balsas (Figura 4).

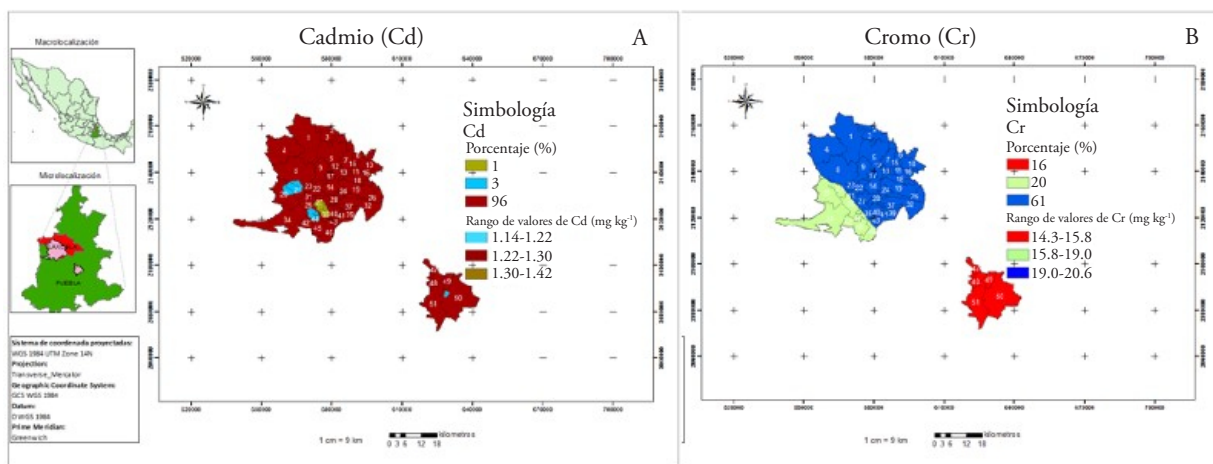
Los Valores de cromo de 19.0 a 20.6 mg kg<sup>-1</sup>, se encuentran en 64% de la superficie, seguido de rango de valores de 15.8 a 19.0 mg kg<sup>-1</sup>, correspondiente a 20% de la superficie y valores de 14.3 a 15.8 mg kg<sup>-1</sup> para 16% de la superficie total, lo que significa que el Cr está contaminando toda la superficie de los municipios estudiados (Figura 4).

Como se puede apreciar el Pb, Cd y Cr, tienen presencia de 100% y el As en 99% de contaminación en los 51 municipios aledaños a la subcuenca del Alto balsas; si consideramos el riesgo que representan estos elementos tóxicos como se demostró en la parte de análisis de riesgo de enfermedades cancerígenas, no cancerígenas y riesgo de cáncer, se puede entender que la región comprendida de los 51 municipios aquí analizados, se encuentra en grave riesgo de padecer alguna enfermedad relacionada a uno o a varios de estos metales pesados presentes en los suelos agrícolas.

### CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados encontrados, se puede concluir que las cuatro zonas estudiadas, fueron similares en el riesgo que representa la contaminación del suelo agrícola para las familias de los agricultores y los habitantes de esas áreas, donde las vías de ingreso de los contaminantes al organismo en los niños, son mayormente por ingestión y en los adultos es por contacto dérmico.

Resultó que, el riesgo para padecer enfermedades no cancerígenas, fue más alto en adultos que en niños, debido al tiempo que tienen exponiéndose, y fue el Cd el de mayor riesgo.



Fuente: elaboración propia.

**Figura 4.-** Dimensión de la contaminación con Cd (a) y Cr (b) en los 51 municipios cercanos a la subcuenca del Alto Balsas y canal de Valsequillo.

El riesgo de padecer enfermedades cancerígenas es alto, tanto para la población infantil como para los adultos, aunque es más acentuada en este último estrato de la población, ocasionada principalmente por el Cd, seguida por As, Cr y Pb.

En cuanto a la afectación, 51 municipios de la subcuenca del Alto Balsas y canal de Valsequillo están afectados, siendo el Cd, Pb y Cr, los encontrados en 100% de la superficie total y el As en 99% de la superficie. La acumulación de todos estos metales en los suelos, coloca a la población en una situación de alto riesgo de cáncer.

Es importante el monitoreo constante de agua y suelo, para establecer programas de remediación a fin de limitar la presencia de enfermedades. Conociendo que los suelos están contaminados, y que representan una amenaza para la salud de la población, es conveniente que las instituciones, se coordinen para hacer un tratamiento eficaz del agua utilizada para riego e implementar acciones para recuperar los suelos.

## REFERENCIAS

- Aquino ME, Rodríguez TL, Morales NJA. 2015. Valoración económica de los impactos ambientales en la salud por la contaminación del río Atoyac. Memoria del Congreso Nacional AMICA.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). 2012. Atlanta (GA): US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. [Cited 2023 Apr 1]. <http://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=15>.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). 2016. Atlanta (GA): US Department of Health and Human Services, Public Health Service. [Cited 2023 Apr 11]. [http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs13.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.html).
- Bermúdez GMA, Jasan R, Plá R, Pignata ML. 2011. Heavy metal and trace element concentrations in wheat grains: assessment of potential non-carcinogenic health hazard through their consumption. *J Hazard Mater.* 193. 264–271. DOI:10.1016/j.jhazmat.2011.07.058.
- Bhargava A., Carmona FF, Bhargava M, Srivastava S. 2012. Enfoques para mejorar la fitoextracción de metales pesados. *The Journal of Environmental Management* 105. 103 – 120.
- CDC (Centers for Disease Control and Prevention). 2023. Combatting the Dangers of Heavy Metal Contamination: the CDC Can Lead the Way! <https://www.cdc.gov/od/science/technology/techtransfer/successstories/leadwipes.htm>
- Castro-González NP, Calderón-Sánchez F, Moreno-Rojas R, Tamariz-Flores JV, Reyes-Cervantes E. 2019. Nivel de contaminación de metales y arsénico en aguas residuales y suelos en la Subcuenca del Alto Balsas en Tlaxcala y Puebla, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(2). 335-348. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.06>.
- Castro-González NP, Moreno-Rojas R, Calderón SF, Moreno OA, Juárez MM. 2017. Assessment risk to children's health due to consumption of cow's milk in polluted areas in Puebla and Tlaxcala, Mexico, *Food Additives & Contaminants: Part B*, DOI: 10.1080/19393210.2017.1316320.
- Chang Z, Qiu J, Wang K, Liu X, Fan L, Liu X, Zhao Y, Zhang Y. 2023. The Relationship Between Co-exposure to Multiple Heavy Metals and Liver Damage. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology.* 77. 127128. 10.1016/j.jtemb.2023.127128.
- Chen H, Teng Y, Lu S, Wang Y, Wang J. 2015. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China. *Sci Total Environ.* 512–513. 143–153. DOI:10.1016/j.scitotenv.2015.01.025.
- Briffa J, Sinagra E, Blundell R. 2020. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon.* Volume 6. e04691. Doi:10.1016/j.heliyon.2020.e04691.
- Dai YS, Jones B, Lee KM, Li W, Post L, Timoty J, Herrman. 2016. Contaminación de alimentos para animales por metales pesados en Texas. *Revista de ciencia reguladora* 01 21 – 32.
- De Moya-Sánchez A, Casierra-Martínez H, Vargas-Ramírez X, Caselles-Osorio A. 2021. Chromium and Zinc A. removal from synthetic industrial wastewater in pilot-scale constructed wetlands planted with *Cyperus odoratus* L. *INGE CUC.* 17;2. 75–86. Doi:10.17981/ingecuc.17.2.2021.08.
- Esmacili A, Moore F, Keshavarzi B, Jaafarzadeh N, Kermani M. 2014. A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone. *CATENA.* 121. 88–98. DOI:10.1016/j.

- catena.2014.05.003.
- Estrada-Rivera A, Díaz Fonseca A, Treviño Mora S, García Suastegui WA, Chávez Bravo E, Castelán Vega, R, Morán Perales JL, Handal-Silva A. 2022. The Impact of Urbanization on Water Quality: Case Study on the Alto Atoyac Basin in Puebla, Mexico. *Sustainability* 2022, 14. 667. <https://doi.org/10.3390/su14020667>
- Feng XG, Zan Y, Wei X, Ge H, Cai T, Long L, Xie L, Tong C, Liu L, Li L, Huang F, Wang X, Chen H, Zhang Y, Zou Z, Zhang X, Yang. 2023. Relationship of multiple metals mixture and osteoporosis in older Chinese women: anaging and longevity study. *Environ. Pollut.* 317(2023). 20699.
- Ferreira-Baptista L, De Miguel E. 2005. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment. *Atmos Environ.* 39(25). 4501–4512. DOI:10.1016/j.atmosenv.2005.03.026.
- García-Nieto E, Carrizales-Yáñez L, Juárez-Santacruz L, García-Gallegos E, Hernández-Acosta E, Briones Corona E, Vázquez-Cucuecha OG. 2011. Plomo y arsénico en la subcuenca del Alto Atoyac en Tlaxcala, México. *Rev. Chapingo Ser. Cie.* 17(1). 7-17. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2010.06.040.
- Giomini C, Rebucci R, Fusi E, Rossi L, Saccone F, Baldi A. 2016. Citotoxicidad, apoptosis, daño del ADN y metilación en líneas celulares epiteliales mamarias y renales expuestas a ocratoxina. *Biología celular y toxicología* 32. 249 – 258.
- Goovaerts P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Applied Geostatistics Series. XIV. New York, Oxford: Oxford University Press. *Geological Magazine*, 135(6). 819-842. doi:10.1017/S0016756898631502. 483 p.
- Govind P, Madhuri S. 2014. Metales pesados que causan toxicidad en animales y pescadores. *Revista de investigación de ciencias animales, veterinarias y pesquera* 2. 17- 23.
- Haidar Z, Fatema K, Shoily S, Sajib A. 2023. Disease-associated metabolic pathways affected by heavy metals and metalloids. *Toxicology Reports*. Doi:10. 10.1016/j.toxrep.2023.04.010.
- Han Y, Gu X. 2022. Enrichment, contamination, ecological and health risks of toxic metals in agricultural soils of an industrial city, northwestern China. *Journal of Trace Elements and Minerals*. 3. 100043. 10.1016/j.jtemin.2022.100043.
- Hu X, Zhang Y, Ding Z, Wang T, Lian H, Sun Y. 2012. Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM2.5 in Nanjing, China. *Atmos Environ* [Internet]. Elsevier; 57. 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.04.056>.
- Huang R, Huiji P, Zhou M, Jin J, Ju Z, Ren G, Shen M, Zhou P, Chen X. 2021. Potential liver damage due to co-exposure to As, Cd, and Pb in mining areas: Association analysis and research trends from a Chinese perspective. *Environmental Research*. 201. 111598. DOI:10.1016/j.envres.2021.111598.
- IARC (International Agency for Research of Cancer). 2023. Agents classified by the IARC monograph. Volumes I-106. [Cited 2023 Apr. 07]. <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>
- IRIS, 2015. Integrated Risk Information System. <https://www.epa.gov/iris/reference-dose-rfd-description-and-use-health-risk-assessments>
- INEGI (Instituto nacional de estadística y geografía). 2023. [Citado 2023 abril 03]. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=21>.
- Journel AG, Huijbregts CJ. 1978 *Mining Geostatistics*. Academic Press, London, 600 p.
- Khan K, Lu Y, Khan H, Ishtiaq M, Khan S, Waqas M, Wei L, Wang T. 2013. Heavy metals in agricultural soils and crops and their health risks in Swat District, northern Pakistan. *Food Chem Toxicol.* 58. 449–458. doi:10.1016/j.fct.2013.05.014.
- Khan S, Cao Q, Zheng YM, Huang YZ, Zhu YG. 2008. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing. *Environ Pollut.* 152:686–692. DOI:10.1016/j.envpol.2007.06.056.
- Kumar V, Sharma A, Kaur P, Singh Sidhu GP, Bali AS, Bhardwaj R, Thukral AK, Cerda A. 2019. Pollution assessment of heavy metals in soils of India and ecological risk assessment: A state-of-the-art. *Chemosphere*. 216. 449-462. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.066. Epub 2018 Oct 25. PMID: 30384315.
- Lim HS, Lee HH, Kim TH, Lee BR. 2016. Relationship between heavy metal exposure and bone mineral density in Korean adult. *J Bone Metab* 23. 223–231.
- Mishra S, Kumar R. 2023. Use of treated sewage or wastewater as an irrigation water for agricultural purposes- environmental, Health, and Economic Impacts. *Total Environment Research Themes*. 6. 100051. 10.1016/j.totert.2023.100051.
- Mitra, S., Chakraborty A., Tareq A., Emran T., Nainu F., Khusro A., Idris, A., Khandaker M., Osman H.,

- Alhumaydhi F, Simal-Gandara J. 2022. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University - Science*. 34. 101865. 10.1016/j.jksus.2022.101865.
- United Nations. 2023. The Sustainable Development Goals Report. 2023. Special edition. <https://sdgs.un.org/documents/sustainable-development-goals-report-2023-53220>.
- Narsimha, A, Li P, Qian Hui. 2018. Evaluation of groundwater contamination for fluoride and nitrate in semi-arid region of Nirmal Province, South India: A special emphasis on human health risk assessment (HHRA). *Human and Ecological Risk Assessment*. 25. 1-18. DOI:10.1080/10807039.2018.1460579
- Nayak T, Pathan A. 2023. Environmental remediation and application of carbon-based nanomaterials in the treatment of heavy metal-contaminated water: A review, *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.227>.
- Núñez-Gastélum, JA, Hernández Carreón S, Delgado Rios M, Flores-Marguez J, Meza-Montenegro M, Osorio-Rosas C, Cota Ruiz K, Gardea-Torresdey J. 2019. Study of organochlorine pesticides and heavy metals in soils of the Juarez valley: an important agricultural region between Mexico and the USA. *Environmental Science and Pollution Research*. 26. 10.1007/s11356-019-06724-4.
- OEHHA (Office of Environmental Health Hazard Assessment). 2009. Toxicity Criteria Database. Cancer Potency Values. <http://oehha.ca.gov/risk/pdf/tcdb072109alpha.pdf>.
- Ohiagu F, Chikezie P, Ahaneku C, Chikezie C. 2022. Human exposure to heavy metals: toxicity mechanisms and health implications. *Material Science & Engineering International Journal*. 6. 10.15406/msej.2022.06.00183.
- Ortega RM, Jiménez CM, Barrera HA, Sepúlveda GM, Narváez JA, Madrid G, Juárez PC, Del Razo LM, Cruz AM, Méndez HP, Medeiros MBO. 2023. Relationship between urinary biomarkers of early kidney damage and exposure to inorganic toxins in a pediatric population of Apizaco, Tlaxcala, Mexico. *Journal of Nephrology*. 36. DOI:10.1007/s40620-023-01598-9.
- Ríos-Reyes CA, Williams C, Castellanos-Alarcon OM. 2020. A comparative study on the use of zeolite-like materials in the removal of heavy metals and ammonium from wastewaters. *Prospectiva*. 18:2. <http://doi.org/10.15665/rp.v18i2.2187>.
- Qing X, Yutong Z, Shenggao L. 2015. Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China. *Ecotoxicol Environ Saf*. 120. 377–385. DOI:10.1016/j.ecoenv.2015.06.019.
- SAS Institute, SAS User's Guide: Statistics Version 9.2. Statistical Analysis System Institute Cary, North Carolina, 2002. USA.
- SEMARNAT. 2000. Norma Oficial mexicana. NOM-021-SEMARNAT-2000. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>.
- SEMARNAT. 2004. Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/135331/48.-\\_NORMA\\_OFICIAL\\_MEXICANA\\_NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/135331/48.-_NORMA_OFICIAL_MEXICANA_NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004.pdf).
- Singh A. 2021. A review of wastewater irrigation: Environmental implications. *Resources, Conservation & Recycling* 168 (2021) 105454. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105454>
- Turdean, G. 2011. Design and development of biosensors for the detection of heavy metal toxicity. 3–5. doi:10.4061/2011/343125.
- USEPA (Environmental Protection Agency of the United State). 1986. Guidelines for the health risk assessment of chemical mixtures [R]. Washington (DC): US Environmental Protection Agency. (EPA/630/R-98/002). [Cited 2023 May.18]. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/chem\\_mix\\_1986.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/chem_mix_1986.pdf).
- USEPA (Environmental Protection Agency of the United State). 2001. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. Washington (DC): Office of Solid Waste and Emergency Response. (OSWER9355.4–24). [Cited 2023 Apr. 12]. <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/91003IJK.PDF?Dockey=91003IJK.PDF>
- USEPA (Environmental Protection Agency of the United State). 2011. Exposure factors handbook: Edition. Washington (DC): National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development U. S. Environmental Protection Agency. [Cited 2023 Apr. 12]. <http://www.epa.gov/ncea/efh/pdfs/efh-frontmatter.pdf>.
- USEPA (Environmental Protection Agency of the United State). 1992. Guidelines for Exposure Assessment. Washington (DC): US Environmental Protection Agency. (EPA/600/Z-92/001). [Cited 2023 May19].

- <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=15263>.
- Wallo VA, Cuestas SO. 2006. Análisis espacial de riesgo relacionado con la influencia de la calidad del aire sobre el asma bronquial en el municipio de Regla mediante la aplicación SIG. *Revista Cubana de Meteorología*. 13:2. Recuperado de: <http://revista.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/401/461>.
- Wei X, Gao B, Wang P, Zhou H, Lu J. 2015. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in WHO (World Health Organization). 2010. Exposure to cadmium: a major public health concern. *Prev Dis Through Heal Environ*. 3–6. [Cited 2022 Dic 20]. <http://www.who.int/ipcs/features/cadmium.pdf>.
- Yan K, Wang H, Lan Z, Zhou J, Fu HZ, Wu L, Xu J. 2022. Heavy metal pollution in the soil of contaminated sites in China: Research status and pollution assessment over the past two decades. *Journal of Cleaner Production*. 373. 133780. 10.1016/j.jclepro.2022.133780.