



## PLOMO Y ARSÉNICO EN LA SUBCUENCA DEL ALTO ATOYAC EN TLAXCALA, MÉXICO

### LEAD AND ARSENIC IN THE ALTO ATOYAC SUB-BASIN IN TLAXCALA, MEXICO

**Edelmira García-Nieto<sup>1</sup>; Leticia Carrizales-Yañez<sup>2</sup>; Libertad Juárez-Santacruz<sup>1</sup>; Elizabeth García-Gallegos<sup>1</sup>; Elizabeth Hernández-Acosta<sup>3</sup>; Elia Briones-Corona<sup>1</sup>; Oscar G. Vázquez-Cucuecha<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Genética y Ambiente y, Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de Tlaxcala, km 10.5 Autopista San Martín-Tlaxcala, C. P. 90120, Ixtacuixtla, Tlax., MÉXICO. Correo-e: mirosngn@yahoo.com.mx.

<sup>2</sup>Unidad de Toxicología Ambiental, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Venustiano Carranza Núm. 2405, Lomas Filtros, C. P. 78210, San Luis Potosí, SLP, MÉXICO.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma Chapingo km 38.5 Carretera México-Texcoco, C. P. 56230, Chapingo, Estado de México. MÉXICO.

#### RESUMEN

Se evaluaron indicadores ambientales en el sistema hidrológico Zahuapan-Atoyac (SH:ZA), en Tlaxcala, México. Una región impactada por descargas de aguas residuales de origen urbano, agrícola e industrial. Las muestras fueron colectadas en la primavera del año 2008, época de estiaje. Se seleccionaron 16 estaciones de muestreo; abarcando desde el nacimiento del río Zahuapan, incluyendo tres muestras del río Atoyac, hasta su salida del estado de Tlaxcala. En las muestras de agua se midieron arsénico, plomo, pH y temperatura, en sedimentos; arsénico, plomo, textura, contenido de materia orgánica, carbono orgánico total, pH y conductividad eléctrica de acuerdo con NMX-AA-051-SCFI-2001, Goyberg-Reín y Vázquez, 2003 y la NOM-021-SEMARNAT-2000. Los resultados mostraron que el intervalo de concentraciones de arsénico osciló de 0.06 a 0.87 mg·L<sup>-1</sup> en agua y de 1.3 a 127 mg·kg<sup>-1</sup> en sedimento. Mientras que el plomo alcanzó niveles hasta de 1.05 mg·L<sup>-1</sup> en agua del sitio denominado El Ojito y 89.5 mg·kg<sup>-1</sup> en sedimento de la estación Apizaco. Estos niveles superaron las normas nacionales e internacionales establecidas para agua de consumo humano y protección de la vida acuática. Los resultados sugieren un aporte antropogénico en algunas estaciones que se suma a la contaminación de origen natural.

Recibido: 23 de junio, 2010  
Aceptado: 18 de agosto, 2010  
doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.06.040  
<http://www.chapingo.mx/revistas>

**PALABRAS CLAVE:** Zahuapan, Atoyac, agua, sedimento superficial.

#### ABSTRACT

Environmental indicators in the Zahuapan-Atoyac hydrological system (ZA:HS) in Tlaxcala, Mexico, a region impacted by wastewater discharges from urban, agricultural and industrial sources, were assessed. Samples were collected in the spring 2008 dry season. Sixteen sampling stations were selected, stretching from the source of the Zahuapan River, including three samples from the Atoyac River, to its exit point from the state of Tlaxcala. Arsenic, lead, pH and temperature were measured in the water samples; in the sediments, the following were measured: arsenic, lead, texture, organic matter content, total organic carbon, pH and electrical conductivity according to NMX-AA-051-SCFI-2001, Goyberg-Rein and Vázquez, 2003 and NOM-021-SEMARNAT-2000. The results showed that the arsenic concentrations ranged from 0.06 to 0.87 mg·L<sup>-1</sup> in water and from 1.3 to 127 mg·kg<sup>-1</sup> in sediment, whereas lead levels reached up to 1.05 mg·L<sup>-1</sup> in water from a place called El Ojito and 89.5 mg·kg<sup>-1</sup> in sediment from the Apizaco station. These levels exceeded the national and international levels set for drinking water and protection of aquatic life. The results suggest an anthropogenic contribution at some stations that adds to natural pollution.

**KEY WORDS:** Zahuapan, Atoyac, water, surface sediment.

#### INTRODUCCIÓN

La subcuenca del Alto Atoyac es una de las siete que constituyen la subregión Alto Balsas de la región hidrológica Núm. 18 (Cuenca del Balsas). Se localiza en la porción central del estado de Tlaxcala entre los paralelos 19°06' y 19°40' latitud norte y los meridianos 97°58' y 98°031'

#### INTRODUCTION

The Alto Atoyac sub-basin is one of seven that make up the Alto Balsas sub-region of hydrological region No. 18 (Balsas Basin). It is located in the central area of the state of Tlaxcala between parallels 19°06' and 19°40' north latitude and meridians 97°58' and 98°031' west longitude,

longitud oeste, con una superficie de 2,031 km<sup>2</sup>, cubre total o parcialmente 50 de los 60 municipios, representando el 52 % de la superficie total del estado. El sistema hidrológico Zahuapan, Atoyac; formado por el río Zahuapan en su totalidad y el trayecto del río Atoyac que se interna en el estado de Tlaxcala, pertenece a esta subcuenca.

El río Zahuapan, principal corriente superficial del estado de Tlaxcala, se origina por los escurrimientos de la sierra de Tlaxco en el norte del estado, justo por debajo del cerro del Mirador y el Campanario desde una altura de 3,418 m. Sigue un curso sinuoso que recibe los escurrimientos de numerosos ríos y barrancas provenientes de las aguas continentales y del volcán la Malinche, presenta una longitud de 82.75 km y un promedio anual de precipitación de 204.65 millones de m<sup>3</sup> (CNA, 2002). Por su parte el río Atoyac, nace en la sierra nevada de Toluca, es producto de los deshielos del flanco norte del volcán Iztaccíhuatl, desde una altura de 4,000 m, en los límites de los estados de México y Puebla. Se interna en Tlaxcala por el suroeste, en el municipio de Tepetitla de Lardizábal, formando una franja que corre casi paralela al borde político estatal con el estado de Puebla hasta su confluencia con el río Zahuapan, en el municipio de Xicohtzinco (González, 2009).

El SH:ZA ha sido impactado negativamente por las descargas de aguas residuales de origen urbano y por los retornos de aguas de campos agrícolas de los municipios de Nativitas, Tepetitla, San José, Xicohtzinco, Papalotla y Panotla, entre otros, en donde el uso excesivo de agroquímicos, tanto fertilizantes como plaguicidas y productos foliares, se mezclan con el agua limpia de los manantiales. Anualmente se vierten 32.5 millones de m<sup>3</sup> de aguas negras al río Zahuapan. En las zonas urbanas; el 40 % del agua es saneada y la restante es liberada al río, mientras que en las zonas rurales; hasta el 80 % es descargada directamente a este sistema (Espejel y Carrasco, 1999). El problema ambiental se ha agudizado con la incorporación de aguas residuales provenientes de industrias del ramo textil, químico y automotriz de los estados de Puebla y Tlaxcala. Navarro *et al.* (2004), analizó aguas residuales de origen urbano e industrial descargadas al río Atoyac, registrando concentraciones de 26.5 µg·L<sup>-1</sup> de cloroformo, 32.8 µg·L<sup>-1</sup> de cloruro de metileno y 5.2 µg·L<sup>-1</sup> de tolueno. A su vez, Méndez *et al.* (2000), reportó niveles de 4.22 mg·kg<sup>-1</sup> de plomo y 4.14 mg·kg<sup>-1</sup> de cadmio en suelos agrícolas de Atlixco, Puebla, regados con el agua de este río.

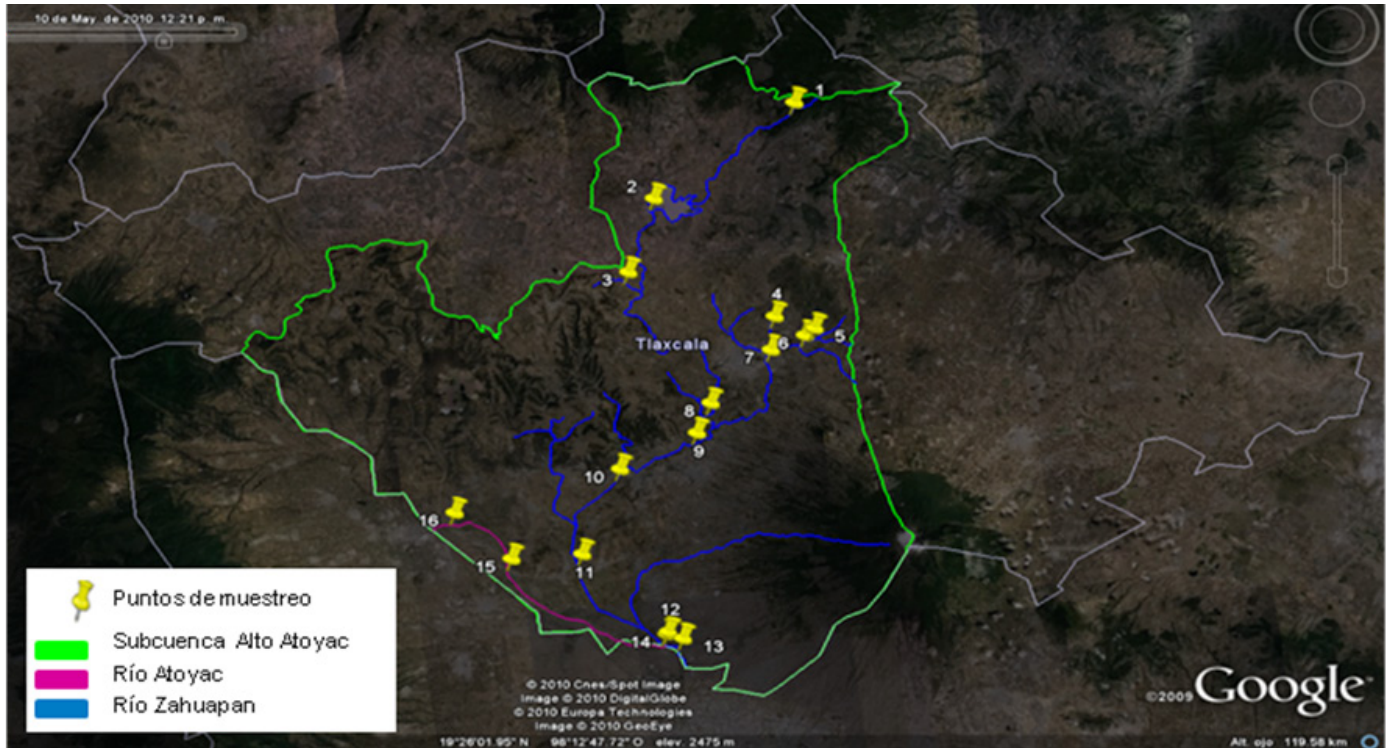
De seguir este escenario como hasta el momento es inminente el riesgo en salud ambiental; por la suma de impactos adversos sobre el sistema hidrológico (descargas de aguas residuales urbanas, agrícolas e industriales), la extensión de la población afectada debido a las actividades que derivan del SH:ZA y por la escasez de estudios que muestren analíticamente el tipo y niveles de agentes tóxicos presentes en él, especialmente en lo que respecta al trayecto del río Zahuapan. Es necesario considerar la contaminación presente no sólo en el agua sino también

with an area of 2,031 km<sup>2</sup>, covering all or part of 50 of the 60 state municipalities, representing 52 % of the total area of the state. The Zahuapan-Atoyac hydrological system, formed by the Zahuapan River in its entirety and the course of the Atoyac River, which flows into the state of Tlaxcala, belongs to this sub-basin.

The Zahuapan River, the main surface current in the state of Tlaxcala, is fed by runoff from the Sierra de Tlaxco in the north of the state, just below Mirador Hill and El Campanario, from a height of 3,418 m. It follows a winding course that receives water from several rivers and ravines originating from inland waters and La Malinche volcano. It is 82.75 km long with an average annual rainfall of 204.65 million m<sup>3</sup> (CAN, 2002). For its part the Atoyac River, which originates in the Sierra Nevada de Toluca, is a product of the melting ice and snow on the northern flank of the Iztaccíhuatl volcano, from a height of 4,000 m, within the boundaries of the states of Mexico and Puebla. It flows into Tlaxcala in the southwest, in the municipality of Tepetitla de Lardizábal, forming a strip that runs almost parallel to the state border with the state of Puebla until its confluence with the Zahuapan River, in the municipality of Xicohtzinco (González, 2009).

The ZA:HS has been negatively impacted by urban wastewater discharges and return flows from agricultural fields in the municipalities of Nativitas, Tepetitla, San José, Xicohtzinco, Papalotla and Panotla, among others, where excessively-used agrochemicals, both fertilizers such as pesticides and leaf products, are mixed with clean spring water. Currently, 32.5 million m<sup>3</sup> of wastewater are discharged into the Zahuapan River annually. In urban areas, 40 % of the water is treated and the remainder is released into the river, while in rural areas up to 80 % is discharged directly into the system (Espejel and Carrasco, 1999). The environmental problem has become acute with the addition of industrial wastewater from textile, chemical and automobile plants in the states of Puebla and Tlaxcala. Navarro *et al.* (2004) analyzed urban and industrial wastewater discharges into the Atoyac River, recording concentrations of 26.5 µg·L<sup>-1</sup> of chloroform, 32.8 µg·L<sup>-1</sup> of methylene chloride and 5.2 µg·L<sup>-1</sup> of toluene. In turn, Mendez *et al.* (2000) reported levels of 4.22 mg·kg<sup>-1</sup> of lead and 4.14 mg·kg<sup>-1</sup> of cadmium in agricultural soils in Atlixco, Puebla, irrigated with water from this river.

If this situation continues as it is now, the risk to environmental health is imminent due to the sum of adverse impacts on the hydrological system (urban, agricultural and industrial wastewater discharges), the increased population affected as a result of the activities derived from the ZA:HS, and the scarcity of analytical studies that show the type and levels of toxic agents present in it, especially as regards the course of the Zahuapan River. It is necessary to consider the pollution present not only in the water but also in the sediment. They are a dynamic component of



SITIO	ALTITUD (m)	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	SITIO	ALTITUD (m)	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE
TL(1)	2,641	19° 37' 49.7"	98° 04' 35.3"	AE(9)	2,252	19° 20' 19.3"	98° 11' 37.9"
AT(2)	2,500	19° 33' 23.5"	98° 12' 08.2"	PA(10)	2,230	19° 18' 45.6"	98° 15' 40.0"
MZ(3)	2,472	19° 29' 30.5"	98° 13' 54.0"	TT(11)	2,139	19° 14' 18.4"	98° 18' 06.9"
TX(4)	2,444	19° 26' 16.6"	98° 07' 00.3"	XZ(12)	2,177	19° 09' 33.5"	98° 14' 24.9"
OJ(5)	2,430	19° 25' 24.6"	98° 05' 07.4"	PP(13)	2,170	19° 09' 07.2"	98° 13' 44.5"
SA(6)	2,432	19° 25' 04.3"	98° 05' 39.0"	XA(14)	2,147	19° 09' 27.1"	98° 14' 30.7"
AP(7)	2,385	19° 24' 28.0"	98° 07' 25.4"	TE(15)	2,205	19° 14' 26.3"	98° 21' 37.7"
AL(8)	2,323	19° 21' 53.3"	98° 10' 45.0"	VI(16)	2,238	19° 17' 16.7"	98° 24' 06.7"

FIGURA 1. Localización de los puntos de muestreo en el SH: ZA.  
 FIGURE 1. Location of sampling points in the ZA:HS.

en el sedimento. Éstos son un componente dinámico de las cuencas hidrográficas y representan un elemento esencial en ecosistemas acuáticos, además son importantes en el transporte de metales y pueden reflejar su calidad (Ruiz *et al.*, 1991 y Ongley, 1997).

watersheds and represent an essential element in aquatic ecosystems. In addition, they are important in the transport of metals and may reflect their quality (Ruiz *et al.*, 1991 and Ongley, 1997).

El objetivo del presente estudio fue determinar las concentraciones de arsénico (As) y plomo (Pb) en agua superficial y sedimento de 16 estaciones de muestreo que cubren el inicio y el final del trayecto de los ríos Zahuapan y Atoyac dentro del estado de Tlaxcala, discutir si los niveles de contaminantes superan las guías ambientales y si éstos representan un riesgo potencial de efectos adversos a la salud humana o a la vida silvestre.

The aim of this study was to determine arsenic (As) and lead (Pb) concentrations in surface water and sediment at 16 sampling stations covering the entire course, from beginning to end, of the Atoyac and Zahuapan rivers within the state of Tlaxcala, and to discuss whether the pollutant levels exceed environmental guidelines and whether they pose a potential risk, due to their adverse effects, to human health or wildlife.

**MATERIALES Y MÉTODOS**

El estudio se realizó a lo largo del SH:ZA (Figura 1). Después de una etapa de inspección se eligieron los sitios de muestreo con base en la metodología de evaluación de

**MATERIALS AND METHODS**

The study was conducted throughout the ZA:HS (Figure 1). After the inspection stage, the sampling sites were selected based on the health risk assessment methodology

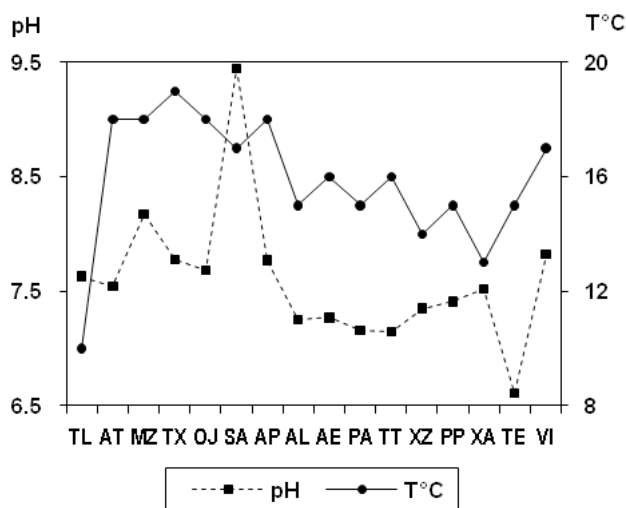


FIGURA 2. pH y Temperatura en agua del SH:ZA.  
 FIGURE 2. Water pH and temperature in the ZA:HS.

riesgo a la salud propuesta por Díaz-Barriga (1999). Se consideraron las zonas de exposición humana y se tomaron en cuenta las descargas industriales, municipales y agrícolas; con la finalidad de intentar discernir la aportación de contaminantes inorgánicos provenientes de actividades antropogénicas. Se establecieron 16 estaciones de colecta denominadas: Tlaxco (TL), Laguna de Atlangatepec (AT), Muñoz (MZ), Texcalac (TX), El Ojito (OJ), Sambrano (SA), Apizaco (AP), Atlihuetzia (AL), Apetatitlán (AE), Panotla (PA), Tetlatlahuca (TT), Xicohtzinco-Zahuapan (XZ), Papalotla (PP), Xicohtzinco-Atoyac (XA), Tepetitla (TE) y Villa alta (VI). Tlaxco y El Ojito fueron consideradas como puntos de referencia; zonas aparentemente no impactadas por actividades humanas.

El muestreo se llevó a cabo durante la primavera del 2008 en la época de estiaje, se colectaron muestras compuestas (tres sub-muestras) de cada estación, considerando una distancia mínima de 100 m de cualquier descarga residual visible. El agua se obtuvo directamente de la corriente, utilizando frascos de polietileno de 1 L, y acidificándola con 2 ml de HNO<sub>3</sub> concentrado, para evitar la pérdida de los metales por volatilización. Se midió el pH y la temperatura del agua en el sitio.

Las muestras de sedimento superficial se recolectaron en la orilla del cauce, con ayuda de una draga de plástico, en recipientes de polietileno. Se mantuvieron y transportaron a 4 °C hasta su análisis. Se secaron en una estufa a 50-60 °C por 72 h, posteriormente, se homogenizaron mecánicamente en un mortero y se tamizaron en malla de 600 µm. Los sedimentos se caracterizaron mediante la determinación de textura, por el método del hidrómetro de Bouyoucos; el contenido de materia orgánica y carbono orgánico total, por el método de Walkley y Black; el pH en una relación 1:2 en base KCl (Goyberg-Reín y Vázquez, 2003), utilizando un potenciómetro marca Denver Instrument, modelo 215; y la conductividad eléctrica, por extracto de saturación (NOM-021-SEMARNAT-2000).

proposed by Díaz-Barriga (1999). Areas of human exposure and the industrial, municipal and agricultural discharges were taken into account, with the aim of trying to discern the contribution of inorganic contaminants from anthropogenic activities. Sixteen sampling stations were established and named as follows: Tlaxco (TL), Laguna de Atlangatepec (AT), Muñoz (MZ), Texcalac (TX), El Ojito (OJ), Sambrano (SA), Apizaco (AP) Atlihuetzia (AL), Apetatitlán (AE), Panotla (PA), Tetlatlahuca (TT), Xicohtzinco-Zahuapan (XZ), Papalotla (PP), Xicohtzinco-Atoyac (XA), Tepetitla (TE) and Villa Alta (VI). Tlaxco and El Ojito were considered as reference points, meaning areas apparently not impacted by human activities.

Sampling was conducted during the spring 2008 dry season. Composite samples (three sub-samples) were collected from each station, with a minimum distance of 100 m from any visible residual discharge. The water was obtained directly from the current using 1-L polyethylene bottles and acidified with 2 mL of concentrated HNO<sub>3</sub> to prevent metal loss by volatilization. Water pH and temperature were measured at the site.

The surface sediment samples were collected on the bank of the river-bed using a plastic dredge and stored in polyethylene containers. The samples were kept and transported at 4 °C until analysis. They were dried in an oven at 50-60 °C for 72 h, then homogenized mechanically in a mortar and sieved in a 600-micron mesh. The sediments were characterized by determining their texture using the Bouyoucos hydrometer method, whereas organic matter content and total organic carbon were determined by the Walkley and Black method. The pH was assessed in a 1:2 ratio based on KCl (Goyberg-Reín and Vázquez, 2003), using a Denver Instrument potentiometer, model 215, and the electrical conductivity was determined by saturation extract (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Prior to the quantification of As and Pb, 0.5 g of sediment or 1 ml of water were subjected to digestion. Then 10 mL of 68 % nitric acid and 0.5 mL of concentrated perchloric acid were added to each sample, after which they were placed for 12 h on heating grills at 80 °C, until the total destruction of the organic matter was achieved. The digested solution was filtered using Whatman Grade No. 1 paper and diluted to 25 mL with 0.2 % nitric acid. The As and Pb content was determined by atomic absorption spectrophotometry (Perkin Elmer model 3110) with a graphite furnace for Pb and a flame detector for As (NMX-AA-051-SCFI-2001). Each sample was analyzed in duplicate.

For quality control, the reference standard SRM 2710 for sediment and SRM 1640 for water, both certified by the National Institute of Standards and Technology (NIST), were used. The standards and the arsenic calibration curve were digested simultaneously with the water and sediment samples.

Previo a la cuantificación de As y Pb, 0.5 g de sedimento o 1 ml de agua fueron sometidos a digestión. Se adicionaron 10 ml de ácido nítrico al 68 % y 0.5 ml de ácido perclórico concentrado a cada muestra, se colocaron durante 12 h en parrillas de calentamiento a 80 °C; hasta la destrucción total de la materia orgánica. La solución digerida se filtró en papel Wathman Núm. 1, y se aforó a 25 ml con ácido nítrico al 0.2 %. El contenido de As y Pb se determinó por espectrofotometría de absorción atómica (Perkín Elmer modelo 3110) con horno de grafito para Pb y detector de flama para As. (NMX-AA-051-SCFI-2001). Cada una de las muestras se analizó por duplicado.

Como control de calidad se utilizó el estándar de referencia SRM 2710 para sedimento y SRM 1640 para agua, avalados por el National Institute of Standards and Technology (NIST). Los estándares y la curva de calibración de arsénico se digirieron simultáneamente con las muestras de agua y sedimento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 señala las 16 estaciones de muestreo con su localización geográfica. La altitud muestra la pendiente del SH:ZA desde la estación denominada Tlaxco con 2,641 m hasta el sitio Papalotla con una altura de 2,230 m.

El intervalo de temperatura y pH del agua determinada en el sitio al momento del muestreo, se indica en la Figura 2. En la mayoría de las estaciones de muestreo, el agua reveló una tendencia a la alcalinidad con una media aritmética de  $7.60 \pm 0.6$ . Se observan dos claras excepciones, el sitio Sambrano con una elevada alcalinidad (9.45) y Tepetitla con un pH ligeramente ácido (6.61). El promedio de la temperatura fue de  $15.88 \text{ °C} \pm 2.31$ .

El 87.5 % de los sedimentos exhibieron un contenido de arena por arriba del 68 %. Estos resultados indican que la textura predominante es arenosa. Cabe resaltar dos claras excepciones, el sitio denominado Muñoz con clase textural franca; porcentajes equivalentes de arena-arcilla-limo y el sedimento de Tepetitla que se clasifica como limosa con un porcentaje por arriba del 90 % de este grano (Figura 3).

En el Cuadro 1, se observa que el 75 % de los sedimentos revelaron porcentajes bajos de materia orgánica y carbono orgánico total. Los niveles de MO fluctuaron entre 0.27 y 5.38 %, valores típicos de sedimentos arenosos y ambientes hidrodinámicos. Llama la atención los sitios identificados como El Ojito (20.44 %), Apizaco (26.90 %), Panotla (29.95 %) y Tetlatlahuca (13.99%) con porcentajes sumamente elevados.

Esta acumulación de materia orgánica no correlacionó con las texturas granulométricas, sin embargo, hay características particulares que pueden explicar estos

## RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows the 16 sampling stations with their geographical location. The elevation shows the ZA:HS slope from the Tlaxco station at 2,641 m to the Papalotla site with a height of 2,230 m.

The water temperature and pH range determined on site at the time of sampling is shown in Figure 2. At most sampling stations, the water revealed a tendency to alkalinity with an arithmetic mean of  $7.60 \pm 0.6$ . There are two clear exceptions: the Sambrano site with high alkalinity (9.45) and the Tepetitla one with slightly acidic pH (6.61). The average temperature was  $15.88 \text{ °C} \pm 2.31$ .

Some 87.5 % of the sediments showed a sand content above 68%. These results indicate that the predominant texture is sandy. It is worth noting two clear exceptions: the site named Muñoz with a loamy textural class (equivalent percentages of sand-clay-silt) and the Tepetitla site where the sediment is classified as silty with a rate above 90% for this grain (Figure 3).

Table 1 shows that 75% of the sediments revealed low percentages of organic matter and total organic carbon. OM levels ranged between 0.27 and 5.38 %, values typical of sandy sediments and hydrodynamic environments. The sites identified as El Ojito (20.44 %), Apizaco (26.90 %), Panotla (29.95 %) and Tetlatlahuca (13.99 %) stand out in the table due to their extremely high percentages.

**CUADRO 1. Parámetros físico-químicos en sedimento del SH: ZA**  
**TABLE 1. Physico-chemical sediment parameters in the ZA:HS.**

SITIO DE MUESTREO	pH	COT (%)	MO (%)	CE (dS·cm <sup>-1</sup> )
TL	6.37	0.31	0.54	5
AT	7.52	0.78	1.35	2
MZ	6.71	0.16	0.27	10
TX	7.01	0.47	0.81	13
OJ	6.77	11.86	20.44	33
SA	7.63	3.12	5.38	95
AP	7.08	15.60	26.90	6
AL	6.71	0.62	1.08	22
AE	6.43	0.16	0.27	5
PA	6.62	16.85	29.05	14
TT	7.07	8.11	13.99	25
XZ	5.68	0.31	0.54	6
PP	6.23	0.31	0.54	16
XA	5.43	0.62	1.08	14
TE	6.35	0.31	0.54	3
VI	5.57	0.94	1.61	25

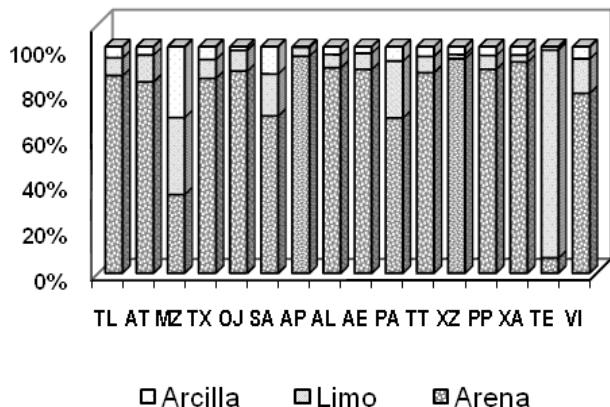


FIGURA 3. Clasificación textural en sedimento del SH:ZA.  
 FIGURE 3. Textural classification of ZA:HS sediment.

niveles: el fitoplancton, tan evidente en el manantial El Ojito, refleja el elevado porcentaje de MO en este sitio; mientras que los otros tres, reciben sustancias de suelos húmicos superficiales, acarreados de tributarios y escorrentías, aunado a un elevado aporte antropogénico de descargas urbanas con contenido fecal y agrícola. Los sedimentos registraron un pH en el intervalo de 5.43 a 7.63 y una baja conductividad eléctrica de 2 a 95 dS·cm<sup>-1</sup>, que se clasifica como no salino. El sitio denominado Sambrano mostró el valor más alto de CE y por lo tanto, de pH. El análisis estadístico no mostró correlación entre los parámetros fisicoquímicos y la concentración de As y Pb.

El intervalo de concentraciones de As en agua fue de 0.06 mg·kg<sup>-1</sup> a 0.94 mg·kg<sup>-1</sup>, siendo Sambrano y Panotla los sitios que presentaron los niveles más altos. En Atlhuetzia el Pb no fue detectable, mientras que el valor más elevado de este metal se observó en El Ojito con una concentración de 1.05 mg·L<sup>-1</sup> (Figura 4).

En la actualidad en México no se cuenta con valores de referencia de calidad del agua para evaluar el estado del ambiente en ríos, por lo que se consideró conveniente comparar los resultados con la NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Once de las dieciséis muestras revelaron concentraciones de As en agua superior a la norma mexicana (NOM-001-ECOL-1996), que establece el límite de 0.2 mg·L<sup>-1</sup> en las descargas de aguas residuales para protección de la vida acuática. Todas las muestras exceden el valor de referencia de 0.005 mg·L de la normatividad canadiense para la protección de la vida acuática (CCME, 2001). El 50 % de las muestras, superó el valor de 0.5 mg·L<sup>-1</sup> establecido por la NOM arriba citada, como límite para que el agua sea utilizada con fines agrícolas y el 87.5 % superó el valor de 0.1 mg·L valor establecido por la normatividad canadiense para protección de diversos cultivos (CCME, 1999 a). Cabe mencionar que en la zona sur del estado, el agua del SH:ZA es utilizada para el riego de hortalizas. El agua de los sitios denominados Tlaxco y El Ojito, se

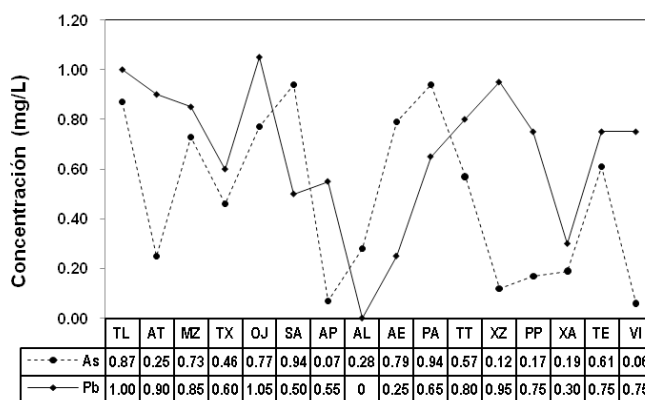


FIGURA 4. Arsénico y plomo en agua del SH: ZA.  
 FIGURE 4. Arsenic and lead in ZA:HS water.

This accumulation of organic matter did not correlate with the texture grain size; however, there are particular characteristics that can explain these levels: phytoplankton, as evident in the El Ojito spring, reflects the high percentage of OM at this site, while the other three receive substances from surface humic soils, carried by tributaries and runoff, coupled with a high anthropogenic contribution from urban discharges with fecal and agricultural content. The sediments showed a pH level in the range of 5.43 to 7.63 and a low electrical conductivity from 2 to 95 dS·cm<sup>-1</sup>, which is classified as non saline. The Sambrano site showed the highest value of EC and hence of pH, too. Statistical analysis showed no correlation between physico-chemical parameters and the concentration of As and Pb.

The range of As concentrations in water was from 0.06 mg·kg<sup>-1</sup> to 0.94 mg·kg<sup>-1</sup>, with the Sambrano and Panotla sites having the highest levels. At Atlhuetzia, Pb was not detectable, while the highest value of this metal was observed at El Ojito with a concentration of 1.05 mg·L<sup>-1</sup> (Figure 4).

Currently, Mexico does not have any water quality reference values to assess the state of a river environment, so it was considered advisable to compare the results with NOM-001-ECOL-1996, which establishes the maximum allowable levels of pollutants in wastewater discharges into national waters and land. Eleven of the sixteen samples revealed As concentrations in water exceeding the Mexican standard (NOM-001-ECOL-1996), which sets the limit at 0.2 mg·L<sup>-1</sup> for wastewater discharges in order to protect aquatic life. All samples exceeded the reference value of 0.005 mg·L in Canadian regulations for the protection of aquatic life (CCME, 2001). Moreover, 50 % of the samples exceeded the value of 0.5 mg·L<sup>-1</sup> established by the above-mentioned standard as the limit for water used for agriculture, while 87.5 % exceeded the value of 0.1 mg·L set by Canadian regulations for protection of various crops (CCME, 1999). It should be noted that in the south of the state, water from the ZA:HS is used for vegetable irrigation. The water from the Tlaxco and El Ojito sites is used to

utiliza para abastecer de agua potable a comunidades aledañas; ambos sitios superaron por más de 30 veces la norma mexicana (NOM-127-SSA1-1994 Mod. 2000) que establece  $0.025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  como límite permisible de As en agua para consumo humano.

Niveles similares de arsénico han sido reportados en diversos acuíferos de la República Mexicana, siendo uno de los más estudiados; la hidroarseniosis crónica endémica, en la Comarca Lagunera en los estados de Coahuila y Durango, en donde, el intervalo de concentraciones de este metaloide oscila entre  $0.008\text{-}0.624 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (Del Razo *et al.*, 1993; Armienta y Segovia, 2008). En el estado de Chihuahua, reportan concentraciones en el acuífero de Meoqui-Delicias que fluctúan entre  $0.10$  y  $0.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (Espino-Valdés *et al.*, 2009), mientras que, en el río San Pedro en el mismo estado, el promedio mensual fue de  $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (Gutiérrez *et al.*, 2008). En Zimapán, Hidalgo, las concentraciones de As en agua de pozos, con diferentes usos, estuvieron en el intervalo de  $0.32$  a  $0.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , y se relacionó con procesos geoquímicos naturales de mineralización en la actividad minera (Armienta *et al.*, 1997a; Romero *et al.*, 2006; Sracek *et al.*, 2010).

La exposición crónica, por ingesta de agua contaminada con As, se ha relacionado con diversas alteraciones en la piel. El 21.6 % de los individuos expuestos a  $0.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de As en agua, presentaron alteraciones en la piel con una prevalencia de lesiones cancerosas del 1.4 % (Cebrián *et al.*, 1983). El 80 % de una población expuesta a niveles de  $1.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  presentaron; hipopigmentación, hiperpigmentación y/o hiperqueratosis (Armienta *et al.*, 1997b).

Con respecto al plomo en agua, los sitios identificados como Tlaxco y El Ojito, excedieron el límite para uso y consumo humano de  $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , establecido por la norma mexicana (NOM-127-SSA1-1994 Mod. 2000). Todas las muestras excepto el sitio denominado Atlhuetzia, superaron el límite para protección de la vida acuática de  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de Pb en agua (NOM-001-ECOL-1996), mientras que el límite para uso agrícola de  $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , fue excedido por el 75 % de las muestras. En las dos últimas estaciones de muestreo (Villa alta y Tlaxco), correspondientes al río Atoyac, los niveles de Pb en agua fueron superiores al intervalo encontrado por Méndez *et al.* (2000) de  $0.14$  a  $0.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , en el mismo río pero en el trayecto de Atlixco, Puebla, después de que este río deja el estado de Tlaxcala.

Valencia *et al.*, (2009 a), reportó concentraciones de As y Pb en agua del SH:ZA en las mismas estaciones de muestreo del presente trabajo, pero en época de lluvia; el nivel más alto fue de  $0.082 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de As en el sitio denominado Sambrano y  $0.069 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de Pb en Xicohtzinco-Zahuapan, once y catorce veces inferiores a los encontrados en nuestro estudio (As= $0.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,

supply drinking water to adjoining communities. Both sites exceeded by more than 30 times the Mexican standard (NOM-127-SSA1-1994 Mod. 2000), which sets  $0.025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  as the allowable limit for As in drinking water.

Similar arsenic levels have been reported in various aquifers in Mexico, with one of the most studied being the endemic chronic hydroarsenicism in the Comarca Lagunera in the states of Coahuila and Durango, where the concentrations of this metalloid range from  $0.008\text{-}0.624 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (Del Razo *et al.*, 1993; Armienta and Segovia, 2008). In the state of Chihuahua, concentrations ranging from  $0.10$  to  $0.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  have been reported in the Meoqui-Delicias aquifer (Espino-Valdés *et al.*, 2009), while in the San Pedro River in the same state, the monthly average was  $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (Gutiérrez *et al.*, 2008). In Zimapán, Hidalgo, arsenic concentrations in well water, with different uses, were in the range from  $0.32$  to  $0.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , attributed to natural geochemical processes related to mineralization in mining activity (Armienta *et al.*, 1997a; Romero *et al.*, 2006; Sracek *et al.*, 2010).

Chronic exposure, by ingestion of water contaminated with As, has been associated with various skin disorders. Some 21.6 % of individuals exposed to  $0.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  of As in water showed skin changes, with 1.4 % having cancerous lesions (Cebrián *et al.*, 1983), and 80 % of a population exposed to levels of  $1.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  showed hypopigmentation, hyperpigmentation and/or hyperkeratosis (Armienta *et al.*, 1997b).

With regard to lead in water, the Tlaxco and El Ojito sites exceeded the limit for human use and consumption of  $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , established by the Mexican standard NOM-127-SSA1-1994 Mod 2000. All samples, except the one from the Atlhuetzia site, exceeded the limit for protection of aquatic life of  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  of Pb in water (NOM-001-ECOL-1996), while the limit for agricultural use of  $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  was exceeded by 75 % of the samples. At the last two sampling stations (Villa alta and Tlaxco), located along the Atoyac River, Pb levels in water were higher than the range measured by Méndez *et al.* (2000), from  $0.14$  to  $0.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , in the same river but in the Atlixco, Puebla stretch after the river leaves the state of Tlaxcala.

Valencia *et al.* (2009) reported As and Pb concentrations in ZA:HS water at the same sampling stations as in this work, but in the rainy season. The highest As level was  $0.082 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  at the Sambrano site and the highest Pb one was  $0.069 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  at Xicohtzinco-Zahuapan, eleven and fourteen times lower, respectively, than those levels found in our study (As= $0.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , Pb= $0.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). The difference occurs in some cases due to the dilution effect. In this regard, Oller and Goitia (2005) report a dilution effect for lead of 15 times and up to 40 for arsenic. Pb levels in water found at some ZA:HS sampling stations exceeded the  $0.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  reported by Gómez *et al.* (2004)

Pb=0.95 mg·L<sup>-1</sup>); la diferencia ocurre en algunos casos por el efecto de dilución, al respecto Oller y Goitia (2005), reportan un efecto de dilución para plomo de 15 veces y hasta de 40 para arsénico. Los niveles de Pb en agua, encontrados en algunas estaciones de muestreo del SH:ZA, superaron los 0.30 mg·L<sup>-1</sup> reportados por Gómez *et al.*, (2004) en el río San Pedro de Cananea, Sonora; cuya fuente de contaminación es la minería.

En la Figura 5 se aprecia que los sedimentos superficiales del SH:ZA revelaron concentraciones de As y Pb que oscilaron en 1.3-127.7 mg·kg<sup>-1</sup> y 27.3-89.5 mg·kg<sup>-1</sup>, respectivamente. El límite superior de As fue presentado por la Laguna de Atlangatepec, mientras que Apizaco mostró la concentración de Pb más elevada.

En México, no existen normativas que regulen la calidad de la matriz sedimentaria, con respecto a los límites permitidos de metales pesados, lo que conlleva a utilizar criterios internacionales de calidad (NJDEP, 1998; CCME, 1999) para evaluar la contaminación en sedimento.

En 13 de los 16 sitios de muestreo, el nivel de As en sedimento superó la norma para la protección de la vida acuática establecida por el Departamento de Protección Ambiental de New Jersey (NJDEP, 1998); que propone un LEL (Lowest Effect Level) de 6 mg·kg<sup>-1</sup>. El 50 % de las muestras, rebasaron el PEL (Probable Effect Level) de 17 mg·kg<sup>-1</sup> indicada por el Ministerio Ambiental del Cónsul de Canadá (CCME, 1999b).

En algunas estaciones del SH:ZA los sedimentos superficiales son utilizados para enriquecer suelos agrícolas, esto aunado al desbordamiento del río en época de lluvia provoca que los sedimentos se dispersen en los campos. La NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 establece un valor de 22 mg·kg<sup>-1</sup> de As en suelo agrícola como criterio para su remediación, por lo menos cinco muestras de sedimento superan este valor.

Calzada-Mendoza y Carrillo-Chávez (2005), reportaron concentraciones de As en suelos de Tlaxcala que van desde no detectables hasta 96.9 mg·kg<sup>-1</sup>. El intervalo más elevado (38.6 a 96.9 mg·kg<sup>-1</sup>) se encontró al oriente del estado; en Huamantla, Alzayanca, Cuapiaxtla, Zitlaltepec y Teolochoico, municipios que se ubican fuera de los límites de la subcuenca del Alto Atoyac, y por lo tanto, del SH:ZA. Niveles menores a 10 mg·kg<sup>-1</sup> se registraron en municipios ubicados dentro de la subcuenca.

Por lo menos seis estaciones del SH:ZA, mostraron concentraciones de As en sedimento de 21 a 127 mg·L<sup>-1</sup>, por lo que la contaminación puede tener una influencia antropogénica, sin descartar el aporte de origen natural.

Doce sitios, mostraron niveles de Pb en la matriz sedimentaria que superaron la norma de 31 mg·kg<sup>-1</sup>

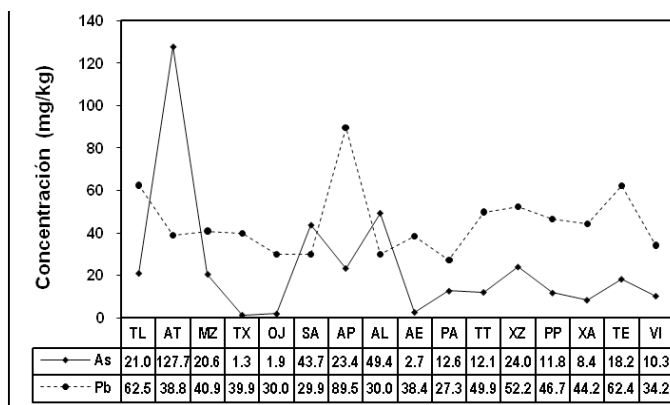


FIGURA 5. Arsénico y plomo en sedimento del SH: ZA  
 FIGURE 5. Arsenic and lead in ZA:HS sediment.

in the San Pedro River in Cananea, Sonora, whose pollution source is mining.

Figure 5 shows that the surface sediments in the ZA:HS revealed As and Pb concentrations ranging from 1.3-127.7 mg·kg<sup>-1</sup> and 27.3-89.5 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. The highest As limit was presented by Atlangatepec Lagoon, while Apizaco showed the highest Pb concentration.

In Mexico, there are no regulations governing the quality of the sedimentary matrix, with respect to the allowable limits of heavy metals, which leads one to use international quality criteria (NJDEP, 1998; CCME, 1999) to assess sediment contamination.

At 13 of the 16 sampling sites, the As level in sediment exceeded the standard for the protection of aquatic life established by the New Jersey Department of Environmental Protection (NJDEP, 1998), which proposes a LEL (Lowest Effect Level) of 6 mg·kg<sup>-1</sup>. In addition, 50% of the samples exceeded the PEL (Probable Effect Level) of 17 mg·kg<sup>-1</sup> given by the Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME, 1999b).

At some stations in the ZA:HS, surface sediments are used to enrich agricultural soils. This coupled with river flooding in the rainy season causes sediment dispersal in the fields. The NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 sets a value of 22 mg·kg<sup>-1</sup> of As in agricultural soil as the criterion for remediation. At least five sediment samples are above this value.

Calzada-Mendoza and Carrillo-Chávez (2005) reported As concentrations in soils from Tlaxcala ranging from not detectable to 96.9 mg·kg<sup>-1</sup>. The highest range (38.6 to 96.9 mg·kg<sup>-1</sup>) was found in the eastern part of the state, in Huamantla, Alzayanca, Cuapiaxtla, Zitlaltepec and Teolochoico, municipalities that are located outside the boundaries of the Alto Atoyac watershed and, therefore, in the ZA:HS. Levels below 10 mg·kg<sup>-1</sup> were reported in municipalities located within the watershed.



propuesta por NJDEP, para la protección de la vida acuática; sin embargo, ninguno de los puntos de muestreo rebasaron la norma de  $91.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  establecida por CCME (1999c). El plomo tiene la capacidad de biomagnificarse (García-Hernández *et al.*, 2005; Rubio-Franchini *et al.*, 2008), por lo que su presencia en sedimento, representa un peligro potencial al incorporarse a la cadena trófica. Márquez *et al.* (2008), reportan concentraciones de  $0.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de Pb en tejido de peces; en donde el sedimento mostró  $22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de este metal.

Los resultados del presente trabajo son similares a los reportados por Galindo *et al.* (2005), en el sedimento del río Cazonos, Veracruz;  $26$  a  $52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , y a los registrados en la Bahía Salinas de la Cruz, México, por González-Macías *et al.* (2006), con concentraciones que oscilaron entre  $5$  y  $124 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Carrasco (2006), identificó la actividad alfarera como fuente principal de liberación de plomo, en la Trinidad Tenexyecac, Ixtacuixtla, Tlax., con niveles en suelo superficial en el intervalo de  $11.8$  a  $12150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Calzada-Mendoza y Carrillo-Chávez (2005), reportaron concentraciones de Pb en suelos de Tlaxcala que van de  $6.5$  a  $68.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , identificando tres sitios con concentraciones muy elevadas ( $25.9$  y  $98.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), los cuales se ubicaron en la comunidad de La Trinidad Tenexyecac. En los municipios al norte del estado, este mismo autor, registró niveles de Pb entre  $6$  y  $14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , al compararlo con el Pb en sedimento ( $89.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de la estación AP del SH:ZA, que se encuentra en esa zona, el aporte antropogénico podría ser más determinante que la contribución natural.

Las concentraciones más altas de As y Pb en sedimento reportados por Valencia *et al.* (2009 b), en época de lluvia y en las mismas estaciones de muestreo del presente trabajo, fueron de  $0.0035$  y  $0.033 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  respectivamente, cantidades muy inferiores a las obtenidas en este estudio (época de estiaje), con valores que oscilaron entre  $1.3$  a  $127.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  para As y  $27.3$  a  $89.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  para plomo.

---

## CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo representan los primeros reportes de As y Pb en sedimento del SH:ZA. Éstos son similares a los encontrados en diferentes acuíferos de México cuyo aporte se presume es de origen natural; sin embargo, las concentraciones reportadas en suelos de Tlaxcala (niveles de fondo), son inferiores a los encontrados en sedimento, por lo que no podemos descartar el aporte antropogénico. Cualquiera que fuese el origen de la contaminación, lo importante es el riesgo potencial que representa el agua y sedimento de este sistema, para los diferentes fines de la comunidad; consumo humano, acuícola y agrícola. Se sugiere llevar a cabo una

At least six stations in the ZA:HS showed As concentrations in sediment from  $21$  to  $127 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; therefore, the contamination may have an anthropogenic influence, without ruling out the contribution of natural sources.

Twelve sites showed Pb levels in the sedimentary matrix exceeding the standard of  $31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  given by the NJDEP for the protection of aquatic life, but none of the sampling points exceeded the standard of  $91.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  established by the CCME (1999c). Lead has the ability to biomagnify (García-Hernández *et al.*, 2005; Rubio-Franchini *et al.*, 2008), so its presence in sediment represents a potential danger of entering the food chain. Márquez *et al.* (2008) reported Pb concentrations of  $0.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  in fish tissue where the sediment contained  $22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  of this metal.

The results of this study are similar to those reported by Galindo *et al.* (2005) for sediment in the Cazonos River in Veracruz,  $26$  to  $52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , and those reported by González-Macías *et al.* (2006) for Salina Cruz Bay, Mexico, where concentrations ranged between  $5$  and  $124 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Carrasco (2006) identified pottery making as the main source of lead release in Trinidad Tenexyecac, Ixtacuixtla, Tlaxcala, with surface soil levels in the range of  $11.8$  to  $12150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Calzada-Mendoza and Carrillo-Chávez (2005) reported Pb concentrations in soils from Tlaxcala ranging from  $6.5$  to  $68.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , and they identified three sites with very high concentrations ( $25.9$  and  $98.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), which were located in the community of La Trinidad Tenexyecac. In municipalities in the northern part of the state, the same authors recorded Pb levels between  $6$  and  $14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . When comparing it to the Pb in sediment ( $89.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) at the AP station in the ZA:HS, which is found in that area, the anthropogenic contribution could be a greater determinant than the natural input.

The highest As and Pb concentrations in sediment reported by Valencia *et al.* (2009), in the rainy season and at the same sampling stations as this work, were  $0.0035$  and  $0.033 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  respectively, amounts much lower than those obtained in this study (dry season), with values ranging from  $1.3$  to  $127.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  for As and  $27.3$  to  $89.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  for lead.

---

## CONCLUSIONS

The results of this study represent the first reports of As and Pb in ZA:HS sediment. These are similar to those found in different aquifers in Mexico whose input is presumed to be natural; however, the concentrations reported in soils from Tlaxcala (background levels) are lower than those found in sediment, which is why we cannot rule out anthropogenic input. Whatever the source of contamination, the important issue is the potential risk posed by the water and sediment of this system to different community uses, specifically

evaluación de riesgo en salud humana y ecotoxicológico en organismos acuáticos y terrestres afectados por el SH:ZA y, el impacto que representan para el hombre.

### LITERATURA CITADA

- ARMIENTA, M. A.; RODRÍGUEZ, R.; AGUAYO, A.; CENICEROS, N.; VILLASEÑOR, G.; CRUZ, O. 1997a. Arsenic contamination of groundwater at Zimapán, México. *Hidrogeol J.* 5(2): 39-46. ARMIENTA, M. A.; RODRÍGUEZ, R.; CRUZ, O. 1997b. Arsenic content in hair of people exposed to natural arsenic polluted groundwater at Zimapán, México. *Bull Environ Contam Toxicol* 59: 583-589.
- ARMIENTA, M. A.; SEGOVIA, N. 2008. Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environ Geochem Health* 30(4): 345-53.
- CALZADA-MENDOZA, J.; CARRILLO-CHÁVEZ, A. 2005. Mapas preliminares de distribución de As, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos del estado de Tlaxcala, México, In: Corona-Esquivel, R. y Gómez-Caballero, J. A. (Eds.): Acta de Sesiones: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A. C., XXVI Convención Internacional de Minería, Veracruz, México, 484p. ISBN 968-7726-02-4.
- CARRASCO, R. G. 2006. La Trinidad Tenexyecac transformación histórico-económica e impacto en la salud laboral de una comunidad agrario-locera tlaxcalteca. Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala, México. 420 p.
- CCME, 1999a. Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian water quality guidelines for the protection of agricultural water uses: Arsenic. Canada, USA 3p. Disponible en: <http://www.ec.gc.ca>.
- CCME, 1999b. Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Arsenic. Canada, USA 5p. Disponible en: <http://www.ec.gc.ca>.
- CCME, 1999c. Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Lead. Canada, USA 5p. Disponible en: <http://www.ec.gc.ca>.
- CCME, 2001. Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: Arsenic. Canada, USA 4p. Disponible en: <http://www.ec.gc.ca>.
- CEBRIÁN, M. E.; ALBORES, A.; AGUILAR, M.; BLAKELY, E. 1983. Chronic arsenic poisoning in the north of Mexico. *Hum Exp Toxicol* 2(1): 121-33.
- CNA, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Alto Atoyac, estado de Tlaxcala. Comisión Nacional del Agua. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. México 19 p.
- DEL RAZO, L. M.; CORONA, J. C.; GARCÍA-VARGAS, G.; ALBORES, A.; CEBRIÁN, M. E. 1993. Fluoride levels in well-water from a chronic arsenicism area of Northern Mexico. *Environ Pollut* 80(1): 91-4.
- DÍAZ-BARRIGA, F. 1999. Metodología de identificación y evaluación de riesgos para la salud en sitios contaminados. OPS/CEPIS. Agencia Alemana de Cooperación Técnica 42 p.
- ESPEJEL, R. A.; CARRASCO, R. G. 1999. El deterioro ambiental en Tlaxcala y las políticas de desarrollo estatal 1988-1999. *Gaceta Ecológica INE-SEMARNAP*, México 52: 41-52.
- ESPINO-VALDÉS, M. S.; BARRERA-PRIETO, Y.; HERRERA-PEDRAZA, E. 2009. Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *human consumption, aquaculture and agriculture. It is therefore suggested that a human health risk assessment be conducted, as well as an ecotoxicological one of aquatic and terrestrial organisms affected by the ZA:HS and the impact they represent to humans.*
- End of English Version*
- 
- Tecnociencia Chihuahua 3(1): 8-18.
- GALINDO, J. A.; VÁZQUEZ-CASTÁN, L.; CRUZ-LUCAS, M. A.; LÓPEZ-ORTEGA, M.; SAN MARTÍN DEL ÁNGEL, P. 2005. Contaminación del Río Cazones, Veracruz, México durante el periodo octubre 2004 - junio 2005. *Revista científica UDO Agrícola* 5(1): 74-80.
- GARCÍA-HERNÁNDEZ, J.; GARCÍA-RICO, L.; JARA-MARINI, M. E.; BARRAZA-GUARDADO, R.; HUDSON-WEAVER, A. 2005. Concentrations of heavy metals in sediment and organisms during a harmful algal bloom (HAB) at Kun Kaak Bay, Sonora, Mexico. *Mar Pollut Bull* 50(7): 733-9.
- GÓMEZ, A. A.; VILLAALBA, A. A.; ACOSTA, R. G.; CASTAÑEDA, O. M.; KAMP, D. 2004. Metales pesados en el agua superficial del río San Pedro durante 1997 y 1999. *Rev Int Contam Amb* 20(1): 1-8.
- GONZÁLES-MACÍAS, C.; SCHIFTER, I.; LLUCH-COTA, D. B.; MÉNDEZ-RODRÍGUEZ, L.; HERNÁNDEZ-VÁZQUEZ, S. 2006. Distribution, enrichment and accumulation of heavy metals in coastal sediments of Salina Cruz Bay, Mexico. *Environ Monitor Assess* 118(1-3): 211-230.
- GONZÁLEZ, J. A. 2009. El control del agua en la cuenca de los ríos Atoyac y Zahuapan por el estado mexicano posrevolucionario. *Anduli* 8: 169-190.
- GOYBERG-REÍN, G. E.; VÁZQUEZ, A. A. 2003. Análisis químico: Manual de prácticas. Universidad Autónoma Chapingo 85-88.
- GUTIÉRREZ, M. 2008. Heavy metals in water of the San Pedro River in Chihuahua, Mexico and its potential health risk. *Int J Environ Res Public Health* 5(2):91-8.
- MÁRQUEZ, A.; SENIOR, W.; MARTÍNEZ, G.; CASTAÑEDA, J.; GONZÁLEZ, A. 2008. Concentraciones de metales en sedimentos y tejidos musculares de algunos peces de la laguna de Castillero, Venezuela. *Rev Cient (Maracaibo)* 18(2):121-133.
- MÉNDEZ, G. T.; RODRÍGUEZ, D. L.; PALACIOS, M. S. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. *Terra Latinoamericana* 18(4): 277-288.
- NAVARRO, I.; FLORES, E.; VALLADARES, R. 2004. Estudio Ambiental. Informe. In: Morales Eduardo (ed.), Ambiente y Derechos Humanos. Centro Fray Julián Garcés, Derechos Humanos y Desarrollo Local A. C., Tlaxcala, México 27-59 p.
- NJDEP, 1998. New Jersey Department of Environmental Protection. Guidance for sediment quality evaluations. New Jersey, USA. 29p. Disponible en: <http://www.state.nj.us/dep/srp>
- NMX-AA-051-SCFI-2001. Norma Oficial Mexicana. Análisis de Agua-Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. Diario Oficial de la Federación (DOF). 2001. 52 p.
- NOM-001-ECOL-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación (DOF). 1996. 15 p.

- NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación (DOF). 2003. 85 p.
- NOM-127-SSA1-1994 Mod. 2000. Modificación a la norma oficial mexicana, salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario oficial de la federación (DOF). 2000. 21 p.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Norma Oficial Mexicana que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y vanadio. Diario oficial de la federación (DOF). 2005. 70 p.
- OLLER, C.; GOITIA, E. 2005. Macroinvertebrados bentónicos y metales pesados en el río Pilcomayo (Tarija, Bolivia). Rev. Bol. Ecol. 18: 17-32.
- ONGLEY, E. D. 1997. Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje - 55. FAO, Roma 116 p.
- ROMERO, F. M.; ARMIENTA, M. A.; VILLASEÑOR, G.; GONZÁLEZ, J. L. 2006. Mineralogical constraints on the mobility of arsenic in mailings from Zimapán, Hidalgo, México. Int J Environ Pollut 26(1,2,3):23-40.
- RUBIO-FRANCHINI, I.; MEJÍA-SAAVEDRA, J.; RICO-MARTÍNEZ, R. 2008. Determination of lead in samples of zooplankton, water, and sediments in a Mexican reservoir: evidence for lead biomagnification in lower/intermediate trophic levels? Environ Toxicol. 23(4): 459-65.
- RUIZ, E.; ROMERO, F.; BESGA, G. 1991. Selective solubilization of heavy metals in torrential river sediments. Toxicolo Environ Chem 33(1): 1-6.
- SRACEK, O.; ARMIENTA, M. A.; RODRÍGUEZ, R.; VILLASEÑOR, G. 2010. Discrimination between diffuse and point sources of arsenic at Zimapán, Hidalgo state, Mexico. J Environ Monit. 12(1): 329-37.
- VALENCIA, Q. R.; CALVA, R. M. L.; GARCÍA, N. E.; GÓMEZ, O. J. L.; WALISZEWSKI, S. M.; GUEVARA, A.; LÓPEZ, J. G.; ORTIZ, E.; MONTIEL, G. J. M. R.; SÁNCHEZ, A. J. 2009. Inspección del sistema hidrológico Zahuapan-Atoyac e identificación de sitios potencialmente peligrosos. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 25 suplemento 1 ISSN 0188 4999.
- VALENCIA, Q. R.; PÉREZ, S.; GARCÍA, N. E.; OLIVARES, G. J. L.; WALISZEWSKI, S. M.; GUEVARA, A.; LÓPEZ, J. G.; ORTIZ, E.; MONTIEL, G. J. R. M.; SÁNCHEZ, A. J. 2009. Inspección del sistema hidrológico Zahuapan-Atoyac e identificación de plomo y arsénico en sedimento superficial. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 25 suplemento 1 ISSN 0188 4999.