



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO

Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra

**“Metales Pesados y su Impacto en las  
Enfermedades de la Población Humana del  
Municipio de Copándaro, Michoacán”**

**TESIS:**

Para obtener el grado de

**MAESTRA EN CIENCIAS**

Con especialidad en  
Geociencias y Planificación del Territorio

Presenta

**Biól. Mariela Casillas Corona**

Asesora:

Dra. Isabel Israde Alcántara

Co-asesora:

Dra. María Alcalá De Jesús

Morelia, Michoacán, agosto de 2016.



## **AGRADECIMIENTOS**

Al instituto de investigaciones en ciencias de la tierra por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de seguir aprendiendo y preparándome académicamente.

A CONACYT por el apoyo económico otorgado para estudiar el posgrado.

Al Laboratorio de Edafología (Edificio B-4) de la facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por permitirme realizar los análisis de suelos y darme un espacio para trabajar.

A la doctora Isabel Israde Alcántara por su apoyo, asesoría y dedicación para que este trabajo se realizara.

A la doctora María Alcalá de Jesús, por su apoyo, asesoría y dedicación para realizar este trabajo.

A los integrantes de la mesa de sinodales: Dra. Erna Martha López, Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva, Dr. Víctor Hugo Garduño y Dr. Ricardo Vázquez por su dedicación a la revisión de este trabajo y por sus sugerencias para mejorarlo.

A la Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva por el apoyo y préstamo del equipo para la medición de metales pesados.

Al ingeniero Virgilio Ledesma, por su apoyo y préstamo de material para realizar los análisis del agua.

A mis compañeros y amigos por su apoyo, Martha, Nancy, Selene, Biviana, Maite, Juan Carlos, Francisco, José, Alex y Antonio.

Un agradecimiento especial a mi familia mi esposo Hugo Soto y a mis hijas Alondra, Andrea y Abril por su paciencia, apoyo incondicional y a mi esposo por cuidar de ellas mientras yo trabajaba.

A mis padres, a mis suegros y hermanos.

## ÍNDICE

<b>Contenido</b>	<b>Página</b>
RESUMEN.....	1
Abstract .....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2.- MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Contaminación por metales pesados ( <i>MP</i> ).....	6
2.2. Contaminación del agua.....	7
2.3. Contaminación del suelo.....	7
2.4. Metales pesados y su relación con problemas de salud.....	9
2.5. Características y efectos en la salud humana del As y de los MP.....	9
Arsénico (As).....	9
Cadmio (Cd).....	10
Cromo (Cr).....	11
Níquel (Ni).....	12
Plomo (Pb).....	12
Zinc (Zn).....	13
3. ANTECEDENTES.....	14
3.1. Contaminación por metales pesados.....	14
3.2. Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	16
3.3.-Copándaro de Galeana.....	18
3.4.- Antecedentes históricos de la contaminación en el Lago de Cuitzeo.....	19
4. JUSTIFICACIÓN.....	22
5. HIPÓTESIS.....	23
6. OBJETIVOS.....	23
6.1. General.....	23
6.2. Específicos.....	23
7. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	24
7.1. Localización geográfica.....	24

7.2	Clima.....	25
7.3	Fisiografía. ....	26
7.4	Geología. ....	27
7.5	Suelos.....	29
8.	METODOLOGÍA.....	31
8.1.	Selección de sitios de muestreo.....	31
8.2.	Trabajo de campo. ....	32
8.2.1.	Colecta de muestras.....	32
8.2.2.	Encuestas.....	33
8.3.	Parámetros físicos y químicos en agua potable y aguas negras.....	33
8.3.1.	Físicos.....	33
8.3.2.	Químicos.....	34
8.4.	Parámetros físicos y químicos de los suelos y sedimentos.....	35
8.4.1.	Físicos.....	35
8.4.2.	Químicos.....	35
8.5.	Metales pesados ( <i>MP</i> ) y arsénico ( <i>As</i> ).....	36
8.6.	Mineralógicos.....	37
8.7.	Metales pesados y su relación con las enfermedades de la población.....	37
9.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
9.1	Agua potable.....	38
9.2.	Aguas residuales.....	46
9.3.	Suelos.....	56
9.4.	Caracterización de sales.....	63
9.5.	Resultados de las encuestas.....	66
9.6.	Relación entre metales pesados y las enfermedades humanas.....	68
10.	CONCLUSIONES.....	70
11.	RECOMENDACIONES.....	72
12.	REFERENCIAS.....	73

<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	<b>Página</b>
<b>Cuadro 1.</b> Localización y características de los sitios de estudio. ....	31
<b>Cuadro 2.</b> Sitios de estudio y toma de muestras. ....	32
<b>Cuadro 3.</b> Concentración máxima permitida para <i>MP</i> y <b>As</b> . ....	36
<b>Cuadro 4.</b> Parámetros físicos y químicos del agua potable y aguas residuales. ....	39
<b>Cuadro 5.</b> Color de los suelos del municipio de Copándaro, Michoacán .....	56
<b>Cuadro 6.</b> Análisis físicos y químicos los suelos del municipio de Copándaro, Michoacán .....	57
<b>Cuadro 7.</b> Minerales en muestras de sal del municipio de Copándaro, Michoacán. ....	64
<b>Cuadro 8.</b> Encuestas realizadas a la población de Copándaro, Michoacán .....	67
<b>Cuadro 9.</b> En anexo 4 concentración de <i>MP</i> en agua potable del municipio de Copándaro, Michoacán .....	93
<b>Cuadro 10.</b> En anexo 4 Concentración de <i>MP</i> en aguas residuales del municipio de Copándaro, Michoacán .....	93
<b>Cuadro 11.</b> En anexo 4 Concentración de <i>MP</i> en suelos del municipio de Copándaro, Michoacán .....	94
<b>Cuadro. 12.</b> En anexo 4 Concentración de <i>MP</i> en polvos del municipio de Copándaro, Michoacán .....	94

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> Localización del área de estudio. ....	24
<b>Figura 2.</b> Climogramas estaciones meteorológicas Santa Rita y Copándaro correspondiente al periodo 1951-2010	26
<b>Figura 3.</b> Geología del área de estudio, escala 1:310 000 (Garduño Monrroy y Israde-Alcantara, 2010) .....	28
<b>Figura 4.</b> Suelos del área de estudio.....	29
<b>Figura 5.</b> Ubicación de los pozos, de las descargas y sitios de muestreo .....	38
<b>Figura 6.</b> Temperatura en agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán. ....	40
<b>Figura 7.</b> Conductividad eléctrica del agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán. ....	41
<b>Figura 8.</b> pH del agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán .....	42
<b>Figura 9.</b> DBO <sub>5</sub> del agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán. ....	42
<b>Figura 10.</b> Dureza total del agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán. ....	43
<b>Figura 11.</b> Sulfatos en agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán. ....	44
<b>Figura 12.</b> Concentración de cloruros en agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán. ....	45
<b>Figura 13.</b> Nitratos en agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán. ....	45
<b>Figura 14.</b> Temperatura en agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán .....	46
<b>Figura 15.</b> Conductividad eléctrica del agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán .....	47
<b>Figura 16.</b> pH en aguas residuales más importantes del municipio de Copándaro, Michoacán .....	48
<b>Figura 17.</b> DBO <sub>5</sub> del agua residual más importante del municipio de	

Copándaro, Michoacán .....	48
<b>Figura 18.</b> Dureza total del agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán .....	49
<b>Figura 19.</b> Sulfatos en agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán .....	49
<b>Figura 20.</b> Concentración de cloruros en agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán .....	50
<b>Figura 21.</b> Nitratos en agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán .....	51
<b>Figura 22.</b> Concentración de <i>MP</i> en agua potable del municipio de Copándaro, Michoacán medidos por ICP-MS.....	52
<b>Figura 23.</b> Concentración de <i>MP</i> en agua potable del municipio de Copándaro, Michoacán medidos por AAS .....	53
<b>Figura 24.</b> Concentración de <i>MP</i> en agua residual del municipio de Copándaro, Michoacán medidos por ASS.....	55
<b>Figura 25.</b> Concentración de <i>MP</i> en suelos del municipio de Copándaro, Michoacán medidos por ASS .....	60
<b>Figura 26.</b> Concentración de <i>MP</i> en polvos del municipio de Copándaro, Michoacán medidos por ASS .....	63
<b>Figura 27.</b> Difractograma de los minerales de la muestra de sal de Copándaro, Michoacán .....	64
<b>Figura 28.</b> Difractograma de los minerales de la muestra de sal de Santa Rita, Michoacán .....	65
<b>Figura 29.</b> Difractograma de los minerales de la muestra de sal de San Agustín del Maíz, Michoacán .....	65

<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b>	<b>Página</b>
<b>ANEXO 1.</b> Marco conceptual.....	84
<b>ANEXO 2.</b> Cuestionario para rescatar información.....	91
<b>ANEXO 3.</b> Cuestionario para registrar antecedentes médicos en el municipio de Copándaro, Michoacán.....	92
<b>ANEXO 4.</b> Concentración de metales pesados en aguapotable, residual, suelos o sedimentos y polvos.....	93



## RESUMEN

La contaminación por metales pesados (*MP*) en agua y suelo provocan daños en el ecosistema y en la salud humana. Los residentes de la cuenca del Lago de Cuitzeo tienen problemas de salud por infecciones dermatológicas y respiratorias que se detectan con mayor frecuencia en la temporada de estiaje, época en la que inciden las tolveneras que llevan consigo partículas finas como los *MP* que provienen de los sedimentos de la zona de desecación del lago, metales que también están presentes en el agua potable y en las residuales.

En esta investigación se presenta la relación que existe entre los metales pesados y las enfermedades de la población humana del municipio de Copándaro, Michoacán (Copándaro, Santa Rita y San Agustín). Se analizaron los parámetros físicos y químicos así como la concentración de los *MP* en: agua potable, aguas residuales, suelos y sedimentos a un lado de pozos y descargas, así como polvos de varios sitios. Se realizaron entrevistas al médico y encuestas a los habitantes del municipio para conocer las enfermedades que presentan los pobladores y con apoyo de la literatura se estableció la relación metal-enfermedad.

En su mayoría, los parámetros del agua potable no rebasaron los límites permisibles establecidos en las Normas Oficiales. La DBO<sub>5</sub> presenta concentraciones altas (20 mg L<sup>-1</sup>) que indican contaminación por materia orgánica; en las aguas residuales, los cloruros y la DBO<sub>5</sub> rebasan los límites establecidos para riego agrícola; los *MP* (Cd, Cr, Ni, Pb y Zn) en el agua potable se presentan en concentraciones bajas, excepto el Cd que está en el límite permisible (0.005 mg L<sup>-1</sup>) en el Pozo 2 de Santa Rita; el As sobrepasó el límite (0.025 mg L<sup>-1</sup>) en el pozo de San Agustín del Maíz. La concentración de *MP* en aguas residuales, suelos, sedimentos y polvos son menores a los establecidos en las Normas; sin embargo, al estar presentes son bioacumulables. Las enfermedades gastrointestinales, respiratorias y dermatológicas que aquejan a la población humana se asocian a la presencia de los metales **As**, **Cd**, **Cr**, **Ni**, y **Zn** encontrados en las tres localidades.

## PALABRAS CLAVE

Lago de Cuitzeo, sedimentos, tolveneras, metaloide, dermatitis.

## Abstract

Pollution of waters and soils by heavy metals (HM) has negative effects on ecosystems and human health. Cuitzeo's lake habitants have health issues by skin and respiratory infections detected during the lake low water season, season affect dust clouds that can carry away fine particles as *HM* that provides during the lake low water zone, metals are presents in the potable water and waste waters.

In this research the relationship between heavy metals (HM) and human diseases of the municipality of Copándaro, Michoacán (Copándaro, Santa Rita and San Agustín) is presented. The physical and chemical parameters and the concentration of HM were analyzed in: drinking water, wastewater, soil and sediment aside water wells and water discharges, as well as powders of various sites. The medical doctor was interviews and the inhabitants of the municipality were surveyed to find out the diseases with the populations and with the support of literature metal-disease relationship was established.

Mostly parameters of drinking water did not exceed the permissible limits set out in the Official Rules. BOD<sub>5</sub> has high concentrations (20 mg L<sup>-1</sup>) indicating pollution by organic matter; in wastewater, chlorides and BOD<sub>5</sub> exceed the limits for agricultural irrigation; the HM (Cd, Cr, Ni, Pb and Zn) in drinking water were present in low concentrations, except Cd which is in the allowable limit (0.005 mg L<sup>-1</sup>) in the water well 2 Santa Rita; As exceeded the limit (0.025 mg L<sup>-1</sup>) in the water well of San Agustín del Maiz. HM concentrations in waste waters, soils, sediments and dusts are low to norms established; however, to be present are bioaccumulate. The gastrointestinal, respiratory and skin infections reported in the community could be related with the As, Cr, Ni and Zn found in the three communities.

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados en suelo y agua es un problema que se presenta a menudo y que actualmente provoca daños en el ecosistema y en la salud humana; se considera a las actividades antrópicas como una de las principales e importantes fuentes de contaminación.

El Lago de Cuitzeo provee diversos recursos naturales a los residentes de la cuenca y es el lugar en donde habitan gran cantidad de organismos que se ven afectados por los cambios en el medio, producto de la contaminación.

Los residentes de la cuenca señalan que su salud es afectada por este problema ambiental. Cabe señalar que existe un consenso el cual afirma que los responsables de la salud de las poblaciones son un conjunto de factores complejos (políticas públicas características individuales, factores sociales y económicos, y el entorno físico) que al actuar de manera combinada determinan los niveles de salud de los individuos y de las comunidades (Romero *et al.*, 2007).

En la cuenca del Lago de Cuitzeo son comunes las infecciones de piel, irritación de ojos y de vías respiratorias que se detectan con mayor frecuencia en la época de estiaje cuando se presentan las tolvaneras con partículas que provienen de los sedimentos superficiales del lago y que posiblemente llevan consigo metales pesados (*MP*) como el **Cr**, **Cu**, **Cd**, **Ni**, **Pb**, **Zn** y el metaloide **As**, así como partículas de sal que se encuentran sobre la superficie de los suelos localizados en la ribera del lago que pueden ser los responsables de los problemas de salud antes mencionadas. Los metales y el metaloide también pueden estar presentes en el agua potable y en las aguas residuales, cuyo drenaje se encuentra a cielo abierto en las comunidades y va directo al lago, ésto por carecer de plantas tratadoras;

sumado a lo anterior, es conocido que las principales vías de ingreso de los metales hacia los seres humanos son a través del agua, polvo y alimento (Nava-Ruíz *et al.*, 2011).

De acuerdo con información verbal de parte del Secretario del Ayuntamiento de Copándaro, la población de San Agustín del Maíz presenta una conducta agresiva a diferencia de las otras localidades cercanas, estudios realizados por Zhang *et al.* (2012) relacionan los problemas de conducta con la presencia de metales pesados, y en el caso del **Pb**, éste agrava los síntomas neurológicos. Sin embargo los médicos del centro de salud de las comunidades de Copándaro, Santa Rita y San Agustín del Maíz, carecen de la información que indique el origen de dichas alteraciones en la salud.

En la desembocadura de las descargas urbanas que provienen de la ciudad de Morelia y se dirigen al Lago de Cuitzeo se han reportado metales pesados en agua y en sedimentos así como su toxicidad en concentraciones que no sobrepasan el límite permisible de las normas oficiales Mexicanas (Alfaro, 2010; Villalobos-Castañeda *et al.*, 2010).

Otros estudios sólo se han enfocado en la caracterización fisicoquímica de los metales pesados y del **As** en agua y en sedimentos del lago (Kram-Heydrich *et al.*, 2010); pero aun no se cuenta con estudios que relacionen la concentración de los metales y los daños que éstos causan a la salud humana.

Con base en lo anterior, es necesario realizar un estudio de impacto en la salud por contaminación con metales pesados. El objetivo del presente trabajo fue analizar el impacto de los metales pesados de agua suelo y polvo con las enfermedades de la población humana del municipio de Copándaro, Michoacán; esto se realizo

mediante la relacion metal – enfermedad de acuerdo con la información obtenida de la literatura y de las encuestas realizadas a la población sobre las enfermedades que los aquejan. Esta investigación será una contribución para la evaluación y aplicación de políticas ambientales en el municipio de Copándaro, Michoacán.

## 2.- MARCO TEÓRICO

En el presente apartado se hará referencia a la relación que tienen el agua, suelo sedimentos y polvos contaminados por metales pesados. En el Anexo 1 se muestra una serie de conceptos relacionados con el tema de estudio.

La contaminación, se lleva a cabo cuando un elemento o una sustancia está presente en concentraciones mayores a lo natural como resultado de la actividad humana, provocando un efecto negativo sobre el medio ambiente y sus componentes (Kabata-Pedias, 2011). La contaminación puede ser de origen natural, aunque en general está relacionada con las actividades del hombre, debido a su búsqueda de supervivencia y bienestar dispersa en sustancias agresivas (Bautista, 1999).

### 2.1 Contaminación por metales pesados (*MP*).

Éste tipo de contaminación se refiere a cualquier elemento químico metálico que presenta una densidad de  $5 \text{ g cm}^{-3}$  o superior cuando está en forma elemental o cuyo número atómico es superior a 20, excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos, y que además puede ser tóxico aun en cantidades muy bajas (Pérez, 2005; Wild, 1993). Los *MP* comprenden a los elementos conocidos como de transición y post-transición junto con metaloides como el **As** y el **Se**, significativamente más pesados y su presencia en la corteza terrestre es inferior a 0.1%, y casi siempre menor de 0.01%. Junto a estos *MP* hay otros elementos químicos que aunque son metales ligeros tienden a ser englobados con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados como es el caso del **As**, **B**, **Ba** y **S** (García y Dorrnsoro, 2005; Pérez, 2005). Los *MP* se consideran tóxicos, ya sea como iones o formando compuestos solubles en agua y pueden ser de fácil

absorción por los organismos vivos en los que aún en bajas concentraciones pueden causar severos efectos de salud (EcuRed, 2015).

**2.2. Contaminación del agua.** El agua contaminada por metales pesados es un factor importante en la salud humana y ambiental. De acuerdo con García y Dorronsoro (2005) y Díaz (2013), tanto en aguas superficiales como en subterráneas hay presencia de elementos químicos derivados de procesos naturales y/o de actividades humanas. Las fuentes de contaminación en el agua pueden ser naturales y antropogénicas.

a) Fuentes naturales: incluyen la meteorización química de las rocas, lixiviación del suelo y componentes de origen natural procedentes del suelo, por ejemplo, las sales minerales de **Ca**, **Mg** y **Fe**, entre otros, que pueden ser nocivos para la salud; sin embargo, son fáciles de identificar y eliminarse.

b) Fuentes antropogénicas: son consecuencia de las actividades humanas como la agricultura, ganadería, minería, aguas residuales municipales y del sector industrial; estas actividades han provocado la presencia de componentes peligrosos para el medio ambiente y los organismos, y es difícil eliminarlos.

Los *MP* pertenecen al grupo de los contaminantes más peligrosos debido a que pueden entrar en las reservas de agua de varias formas, entre ellas por el suelo y participar en diferentes reacciones químicas, cambiando la movilidad y el transporte de la fase acuosa a la fase sólida de los sedimentos o precipitar como componentes poco solubles y transportarse a la solución nuevamente (Kabata-Pedias, 2000).

**2.3. Contaminación del suelo.** Existen suelos cuyas características se han alterado de forma negativa por la presencia de componentes químicos de carácter

peligroso, en concentración tal que presente un riesgo para la salud humana o el medio ambiente (SIAPA, 2004). Un suelo contaminado puede definirse como aporte de un elemento químico desde el exterior del lugar y provoca un aumento respecto a la concentración inicial, lo cual produce efectos desfavorables, tanto por su acción desactivadora como por el aumento excesivo de la actividad físico química (Porta *et al.*, 2003).

Los *MP* están presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de las actividades antropogénicas (Prieto *et al.*, 2009). El suelo funciona como agente de lavado geoquímico y como un amortiguador natural que controla el transporte de elementos químicos y de sustancias a la atmósfera, hidrósfera y biota. Los elementos traza pueden afectar el funcionamiento del suelo y su destino dependerá de las propiedades físicas y químicas de éste (Kabata-Pedias, 2011).

Las fuentes importantes de aporte de *MP* en el suelo son las actividades geológicas naturales como intemperismo y erosión en distintas morfologías desde valles hasta montañas, actividades antropogénicas como la industria minera, catalogada como una de las actividades que más aporta *MP* al ambiente. En el suelo, los *MP* pueden estar presentes como iones libres o disponibles, compuestos de sales metálicas solubles o bien, compuestos insolubles o parcialmente solubilizables como óxidos, carbonatos e hidróxidos (Pineda, 2004).

Los *MP* retenidos por el suelo pueden seguir las siguientes rutas:

- 1) Quedar disueltos en la solución del suelo o quedar fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación;
- 2) ser absorbidos por las plantas e incorporarse a las cadenas tróficas;
- 3) pasar a la atmósfera por volatilización; y/o
- 4) movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas (García y Dorronsoro, 2005).



**2.4. Metales pesados y su relación con problemas de salud.** Los efectos que los *MP* tienen sobre la salud del ser humano dependen de la naturaleza del compuesto, la ruta de exposición, la dosis de exposición y el tiempo de exposición. Las vías de exposición pueden ser por inhalación de humos o aire contaminado, ingesta de alimentos y/o agua contaminada, consumo de medicamentos o por contacto directo con la piel (ASTDR, 2005; García y Dorronsoro, 2005).

#### **2.5. Características y efectos en la salud humana del As y de los MP.**

**Arsénico (As).** Es un elemento natural ampliamente distribuido en la corteza terrestre. En el ambiente, el **As** se combina con **O**, **Cl** y **S** para formar compuestos inorgánicos de **As**. Este elemento se encuentra de manera natural en el suelo y en minerales, y por lo tanto, puede entrar al aire y al agua en el primero, mediante el polvo que se levanta del suelo y en el segundo, a partir del en efluente de lluvia o en agua que se filtra a través del suelo.

El **As** se presenta en el agua procedente de la disolución de minerales y menas; efluentes industriales y el lavado de la atmósfera. En algunas zonas, la concentración de **As** en el agua subterránea es alta como resultado de su composición geológica por ejemplo, en México, el **As** existe de forma natural en los acuíferos de las zonas hidrotermales utilizadas para generar energía eléctrica, así como en la Comarca Lagunera Coahuila y Durango (Jiménez, 2011). Además, en su mayoría este elemento se encuentra en la zona del cinturón volcánico en donde los suelos son ricos en **As** y contaminan los mantos freáticos (Castro de Esparza, 2006).

Las principales rutas de exposición de las personas al **As** son la ingesta e inhalación. Este elemento se acumula en el organismo por exposición crónica, y en cierta concentración ocasiona alteraciones de la piel con efectos secundarios en los sistemas nervioso, respiratorio y gastrointestinal (Castro de Esparza, 2006).

El **As** produce toxicidad aguda y su ingestión en dosis alta provoca síntomas gastrointestinales, trastornos de las funciones de los sistemas cardiovascular y nervioso, y hasta la muerte. La exposición prolongada al **As** en el agua de uso doméstico tiene una relación causal con el aumento de los riesgos de cáncer de piel, pulmón, vejiga y de riñón. La ingestión de agua de bebida en concentraciones mayores a  $50 \mu\text{g L}^{-1}$  de **As** provoca cambios cutáneos como hiperqueratosis (engrosamiento de la piel) y de pigmentación así como lesiones en la vejiga y en la piel (Jiménez, 2011).

En México, los primeros antecedentes de la contaminación con **As** datan de 1962, cuando se notificaron 40 casos graves y una defunción en el sector urbano de Torreón, Coahuila. La presencia de **As** en el agua de consumo humano es un problema que se presenta en los acuíferos de Durango, Coahuila, Zacatecas, Morelos, Aguas Calientes, Chihuahua, Puebla, Nuevo León, Guanajuato, Michoacán, San Luis Potosí, Sonora y la Región Lagunera en donde se han detectado concentraciones superiores a  $0.05 \text{ mg L}^{-1}$  de **As** señalado por la NOM-127SSA1 (DOF, 2001a) (Finkelman *et al.*, 1993).

**Cadmio (Cd).** Es un elemento natural de la corteza terrestre. En general se encuentra como mineral combinado con el oxígeno tal como **CdO**, **Cl** (**CdCl<sub>2</sub>**) o **S** (**CdSO<sub>4</sub>**, y **CdS**).

El **Cd** es un elemento similar al **Zn** y no es encontrado en grandes cantidades; no se corroe fácilmente y tiene muchos usos, por ejemplo en baterías, pigmentos, revestimiento de metales y plásticos. La población puede estar expuesta al **Cd** al respirar humo de tabaco o consumir alimentos contaminados por este metal.

El **Cd** como otros *MP*, desplaza niveles saludables de **Mg** y **Ca** en el cuerpo. El envenenamiento puede ser muy severo y los síntomas varían desde las náuseas, diarrea y vómitos. Una exposición aguda puede causar tos, pérdida del olfato, dificultad para respirar, pérdida de peso, daño permanente al riñón e hígado; destrucción de tejido testicular y destrucción de los glóbulos rojos. Es un contaminante común en el agua y sedimentos en los puntos cercanos a instalaciones industriales (Manahan, 2007; ATSDR, 2012).

**Cromo (Cr).** Elemento de origen natural que se encuentra en el suelo, así como en rocas, animales y plantas, por lo general, el **Cr** no permanece en la atmósfera, pero se deposita en el suelo y el agua.

El **Cr** es un nutriente esencial que ayuda al cuerpo a metabolizar el azúcar, proteína y grasas, y también es encontrado en varios productos relacionados con la salud. Se mueve con facilidad en los suelos porosos con pH de moderado a alto.

Una de las principales fuentes de exposición al **Cr** es al tomar agua de pozo contaminada, los efectos en la salud son la dermatitis, úlceras nasales y de piel, bronquitis crónica, funciones anormales pulmonarias y asma alérgico. A algunos compuestos de **Cr** se les ha asociado con cáncer de pulmón y con agentes cancerígenos conocidos (RSP, 2013; ATSDR, 2008).

**Níquel (Ni).** Es un elemento natural muy abundante considerado esencial para los organismos del suelo. El contenido medio en la corteza terrestre es de  $80 \text{ mg kg}^{-1}$ , principalmente en las rocas ultramáficas como las serpentinas y peridotitas. Las condiciones ácidas favorecen la movilización del **Ni** en el suelo y facilitan su filtración hacia el agua subterránea. Los efectos más graves a la salud por exposición al **Ni** son bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar y, cáncer de los pulmones y senos nasales (ATSDR, 2005). Además, el **Ni** es un potente alérgeno que causa dermatitis, eccema y asma bronquial.

**Plomo (Pb).** Es un metal gris-azulado de origen natural presente en pequeñas cantidades en la corteza terrestre y el medioambiente. Es un *MP* sin beneficios para los organismos, se localiza en suelos como **Pb<sup>2+</sup>** y **Pb<sup>4+</sup>**, en especial la primera. Su disponibilidad aumenta al disminuir el pH.

El **Pb** es un contaminante altamente tóxico, su presencia en el ambiente se debe principalmente a las actividades antropogénicas como la industria, la minería y la fundición. El **Pb** ingresa al organismo por vía respiratoria y gastrointestinal. Una vez en el torrente sanguíneo, se acumula dentro de los glóbulos rojos, ocasionando anemia y en concentración alta un deterioro intelectual importante. Luego de aproximadamente un mes, se redistribuye en diferentes órganos y tejidos, generando alteraciones en el sistema nervioso, agresividad, daño hematopoyético, cardiovascular, reproductivo y renal. Finalmente, se deposita en tejidos duros como huesos, uñas y dientes en donde puede permanecer acumulado durante toda la vida (RSP, 2013; ATASDR, 2008).

**Zinc (Zn).** Es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre. Se encuentra en el aire, suelo y agua, y está presente en todos los alimentos. Se adhiere al suelo, sedimentos y a partículas de polvo en el aire y dependiendo del tipo de suelo, algunos compuestos de **Zn** pueden movilizarse al agua subterránea, lagos, arroyos y ríos. Se acumula en peces y en otros organismos, pero no en plantas.

La ingestión de grandes cantidades de **Zn** puede causar calambres estomacales, náuseas y vómito; si se ingiere por periodos largos ocasiona anemia y disminuye los niveles del colesterol benéfico.

La inhalación de grandes cantidades de polvos o vapores de **Zn** puede producir una enfermedad de corta duración llamada fiebre de vapores de metal (ATASDR, 2005).

### 3. ANTECEDENTES.

La contaminación de los suelos y del agua ha incrementado año tras año, debido al mal planteamiento de las políticas ambientales, crecimiento poblacional, descargas de aguas residuales sin un tratamiento hacia los lagos y ríos, el aumento del tráfico vehicular, así como por el uso de fertilizantes y otros artículos de uso cotidiano como cosméticos, juguetes y utensilios de cocina, entre otros, que contienen *MP*, dañinos para la salud de la población humana.

#### 3.1. Contaminación por metales pesados.

En muestras de polvos urbanos y suelos agrícolas de China, se obtuvieron concentraciones de **Cr**, **Ni**, **Cu**, **Pb**, **Zn** y **Cd** que resultaron ser más altas que sus concentraciones normales, siendo las principales fuentes de contaminación de los suelos urbanos, el tráfico y las industrias. Sin embargo, las fuentes de *MP* en los suelos agrícolas tienen su origen principalmente del material parental, minería, fertilización, aplicación de plaguicidas y actividades antrópicas. En dicho estudio concluyen que el ser humano adquiere los metales pesados por inhalación y contacto de la piel, aunque consideran que la vía predominante de exposición al medio ambiente es el suelo – cultivo (Binggan y Linsheng, 2010).

Por otra parte, en la ciudad de Zulia y Maracaibo, Venezuela existe contaminación en el aire por **Pb**, **Zn**, **Ni** y **Cr**, en sedimentos y en suelo de una zona de alto tráfico vehicular, sugiriendo que se asocian a un alto índice de muertes ocasionadas por problemas de cáncer pulmonar y enfermedades crónicas. Los límites de detección para metales de muestras de sedimentos viales y suelo fueron: **Pb**, 4.30 mg Kg<sup>-1</sup>;

**Zn**, 0.1 mg Kg<sup>-1</sup>; **Ni**, 2.16 mg Kg<sup>-1</sup> y **Cr**, 0.80 mg Kg<sup>-1</sup>, siendo el **Pb**, el principal marcador de las emisiones vehiculares (Machado *et al.*, 2008).

Pugna *et al.* (2006) realizaron un análisis en diez sitios en San Francisco del Oro, Chihuahua, en donde la contaminación del suelo por **Pb**, **Cd**, **Zn** y **As** en profundidades de cero a 80 cm y distancias de 300 m a partir de la presa de Jales, la concentración de **Pb**, **As** y **Zn** fue similar. En dos de los sitios cercanos a la presa, la concentración fue alta a mayor profundidad del suelo, lo que indica que dichos metales se perdieron del estrato superior y se acumularon en el subsuelo. En los demás sitios, los metales se concentraron en la capa superficial del suelo debido a que están más expuestos al depósito por medio del viento, extendiéndose a más de 3 km de distancia de los jales. Esta contaminación superficial provocó el abandono de las tierras de cultivo en la zona y la migración de los dueños por enfermedades crónicas degenerativas, muerte de animales y baja o nula productividad agrícola por la posible acumulación de los metales en las plantas.

En un estudio diagnóstico de la contaminación por *MP* en suelos urbanos de la ciudad de Mérida, Yucatán, la fuente de contaminación se atribuye a la presencia de dos parques industriales y cerca de 1900 productores de residuos peligrosos potenciales. Además, encontraron **Cd**, **Ni** y **Cr** en concentraciones bajas, y el **Cu**, **Pb** y **Zn** en concentraciones altas. A las primeras, no se les consideró contaminantes, pero a las segundas sí. En 47 muestras encontraron concentraciones entre 0.05 y 18.17 mg kg<sup>-1</sup> de **Pb**, de las cuales, 20 tuvieron valores superiores a 5 mg kg<sup>-1</sup>. También señalan que valores por arriba de 4 mg kg<sup>-1</sup> en la sangre son peligrosos para los seres humanos. En 13 muestras de suelo, el **Cu** se encontró entre 2.26 a 3.11 mg kg<sup>-1</sup> que rebasó el límite de cuantificación (0.32 mg

kg<sup>-1</sup>) permisible. El **Zn** se encontró en 110 muestras de suelo, cuya concentración fue superior a 0.056 mg kg<sup>-1</sup>. La concentración más alta de **Zn** se encontró en polvo en la zona centro de la ciudad de Mérida. El índice de contaminación mostró que el incremento de **Zn** lábil pasó de 0.1 a 48, por lo que éste metal es un indicador del comportamiento que pueden tener otros metales como posibles agentes contaminantes. Los autores señalan que son necesarios estudios más detallados enfocados a la posible toxicidad de suelos contaminados por *MP* (Bautista *et al.*, 2007).

Los *MP* constituyen un riesgo considerable para la salud por el contacto que se tiene con ellos, en especial, el **Cd** presente en los alimentos, cigarrillos, artículos de uso diario y agua. El **Cd** afecta principalmente a los riñones, huesos y pulmones, y se almacena en el hígado y en los riñones. Si una persona está expuesta a inhalar **Cd** por largo tiempo puede determinar la aparición de un síndrome que incluye enfisema pulmonar y enfermedad de los túbulos renales con proteinuria, anemia y alteraciones hepáticas, entre otras. Los síntomas por la ingesta de agua o alimentos contaminados con **Cd** en concentraciones de alrededor de 15 mg L<sup>-1</sup>, son náuseas, vómito, dolor abdominal, cefalea y en muchos casos diarrea intensa con colapso. Los autores resaltan por una parte que no existen reglas sobre el control de **Cd** en los artículos de uso diario y por otra, que ninguna organización internacional se ponen de acuerdo en identificar la concentración de **Cd** que provoca daños a la salud a corto o largo plazo (Pérez y Azcona, 2012).

### **3.2. Cuenca del Lago de Cuitzeo.**

En la desembocadura del río Grande de la cuenca del Lago de Cuitzeo se han encontrado *MP* cuyas concentraciones en µg L<sup>-1</sup>, tanto en agua como en sedimentos son para el **Cr** (11.3 y 124), **Cu** (26.2 y 122), **Ni** (13.270 y 51), **Pb** (27.52



y 57), **Zn** (246.04 y 366) y **As** (29.6 y 22.6), siendo más altas y de mayor toxicidad en sedimentos que en agua. Las concentraciones más altas se presentaron en los sitios cercanos a la desembocadura del río Grande y permiten suponer un aporte de contaminantes metálicos al lago que provienen de las descargas industriales de la ciudad de Morelia y que son arrastradas por el río (Alfaro, 2010).

Para el lago de Cuitzeo se tienen reportes de la biodisponibilidad y concentración del **As**, **Fe** y **Zn** en muestras de sedimentos y agua. El origen de las descargas de agua del río Grande al lago con estos metales se atribuye a la contaminación antropogénica. El **Fe** en los suelos de la región puede ser responsable de su presencia en los sedimentos y en el agua. En el caso del **As**, se cree que éste es de origen natural. La contaminación por **Fe** y **Zn** es poco significativa debido a que presentan una baja biodisponibilidad, en cambio la del **As** es moderada. Los autores mencionan que el riesgo a la contaminación antropogénica en el lago puede aumentar en el futuro si no se toman las medidas adecuadas para evaluarla. También señalan la necesidad de realizar estudios en relación con el riesgo de dichos metales hacia los seres humanos y los ecosistemas (Villalobos *et al.*, 2010).

Otra fuente probable de ingreso de *MP* hacia el agua superficial son los tiraderos. La problemática geológica ambiental en los basureros de los 25 municipios que integran la cuenca del lago de Cuitzeo, depende del ámbito social-político, el cual es limitante para minimizar el impacto ambiental y la salud pública, ya que no se cuenta con personal capacitado para la gestión. Con el fin de proponer medidas para un adecuado confinamiento, se caracterizó la geología superficial de los tiraderos y se hizo un levantamiento topográfico, resultando que todos los tiraderos reportan emisiones de gases que pueden ser tóxicos. El tiradero de Santa Ana Maya tiene

gran impacto en la retención de la basura, ya que en épocas de secas, los tulares localizados en la orilla del lago retienen las basuras y los lixiviados, mientras que en el tiradero de Copándaro al encontrarse en combustión constante contribuye a la contaminación del lago (Israde-Alcántara *et al.*, 2009).

La disminución de la superficie del vaso del lago de Cuitzeo está ligada con la reducción del volumen de agua en los cauces que drenan hacia el lago, debido al incremento en el consumo de agua, tanto para uso urbano como para riego de zonas agrícolas (López-Granados y Mendoza-Cantú, 2002).

La distribución del **Fe** y **Al** en suelos y sedimentos del lago de Cuitzeo se considera de origen natural por lixiviación de las rocas ígneas de la zona. La distribución del **Ti**, **Zn** y **As** implican tanto procesos geológicos y concentraciones mayores que los demás metales, mientras que la contaminación de **Pb**, **Cu**, **Ni** y **Cd** es de origen antrópico por actividad agrícola y aguas residuales. En cuanto a las propiedades químicas, mencionan que el carbono orgánico y la conductividad eléctrica son buenos indicadores de la contaminación de los sedimentos de lago, pero no así el pH (Kram-Heydrich *et al.*, 2010).

### **3.3.-Copándaro de Galeana.**

En las comunidades de Santa Rita y de Copándaro, municipio de Copándaro de Galeana, Michoacán, en marzo del 2015, se tuvo una plática con el médico David Guzmán quien comentó que la mayoría de las muertes de la gente de estos municipios y comunidades son principalmente por enfermedades crónicas degenerativas como diabetes e hipertensión arterial así como de infartos; sin embargo las enfermedades que se presentan con mayor frecuencia en marzo y abril

que es la época de tolvaderas, son infecciones de las vías respiratorias como la gripe y amigdalitis, gastrointestinales, de vías urinarias, diabetes mellitus, hipertensión arterial sistémica, dermatitis y conjuntivitis. Estas dos últimas, son las infecciones de piel y de ojos más comunes que la gente atribuyen al polvo que se levanta de la parte seca del lago y que llega a ellos por medio de las tolvaderas. Además mencionó que otras enfermedades presentes en las comunidades son el cáncer gástrico, pulmonar, cérvico-uterino, de mama, próstata y de piel.

#### **3.4.- Antecedentes históricos de la contaminación en el Lago de Cuitzeo.**

En época de estiaje, cuando una parte del lecho del lago queda expuesto a la intemperie, las principales consecuencias de la contaminación inciden seriamente en las condiciones de salud de las comunidades, ya que los sedimentos depositados sobre este lecho son levantados por los vientos y transportados al ambiente afectando a los pobladores y a las zonas agrícolas, causando la proliferación de enfermedades y el deterioro en algunos cultivos (Rodríguez *et al.*, 2012).

En el año 2012, el Lago de Cuitzeo pasó por uno de los peores momentos, más de 15 mil hectáreas del embalse perdieron su tirante de agua en la parte norte y poniente de la cuenca del lago, motivo de la crisis ambiental que vive la región de los 13 municipios ribereños cuyo efecto se ha manifestado en altas temperaturas y falta de agua. Por otra parte, las poblaciones al emitir grandes cantidades de aguas residuales y otros residuos industriales al lago, son los principales causantes de la desecación del lago en la zona poniente en donde se localizan los municipios de Cuitzeo, Huandacareo, Chucándiro y Copándaro de Galeana. A la orilla del lago de

éstos municipios se apreciaba la tierra húmeda con grietas como efecto de la pérdida total de la lámina acuosa, estas grietas de desecación se han incrementado debido a la urbanización y uso del agua subterránea a través de pozos, por lo tanto, ya no llega al lago. La modernidad y la construcción de la autopista Morelia-Salamanca y el cierre de la comunicación de ambos vasos produce en el vaso occidente, tolveneras que son factor de enfermedades gastrointestinales y respiratorias (Florentino, 2012).

La contaminación del Lago de Cuitzeo es de las más altas en la entidad, debido a que, menos del 50% de aguas residuales se tratan. Las actividades agrícolas, ganaderas y las descargas directas al lago son fuente de contaminación de sulfatos, nitratos y fosfatos, lo que impacta la calidad del agua y de la salud de la población. La desecación registrada será generadora de serios problemas gastrointestinales y respiratorios en toda la población que habita la ribera poniente del lago; además, con la sequía se forman tolveneras que arrastran todos los contaminantes sólidos que durante siglos se han almacenado como polvos mientras que el agua contiene distintos parásitos, entre los que destacan las amibas y las lombrices (Torres, 2012). El Lago de Cuitzeo, se encuentra afectado de manera irreversible por la contaminación debido a que es receptor de aguas residuales y agroquímicos de 13 municipios, además los habitantes de la región lo usan como basurero. En temporada de estiaje, cuando más vacío se encuentra el cuerpo de agua, provocan las tolveneras y con ellas ocasionan severos daños en la salud de los pobladores aledaños. Entre las enfermedades más comunes se presentan brotes o enfermedades gastrointestinales, dermatológicas, asma, conjuntivitis o inflamación en los ojos (Creades, 2012).

En octubre de 2015, Juan Mascote, presidente municipal de Cuitzeo, informó que el Lago de Cuitzeo se encuentra en un momento crítico ante el grado de contaminación y sequía que enfrenta desde hace varios años, para lo cual solicita apoyo de rescate y limpieza para el lago. El edil comentó que la desembocadura de aguas negras de Morelia y de las zonas circundantes durante varios años ha afectado la estabilidad en los alrededores del lago (Quadratín, 2015).

#### **4. JUSTIFICACIÓN.**

En la cuenca del Lago de Cuitzeo existen problemas de salud por infecciones de piel, irritación de ojos y de vías respiratorias que se detectan con mayor frecuencia en la época de secas. En ésta época se presentan las tolveneras compuestas de partículas que provienen de los suelos y que posiblemente llevan consigo metales pesados como el **Pb**, **Cr**, **Ni**, **Cd**, **Zn** y el metaloide **As**, elementos que pueden ser los responsables de los problemas de salud antes mencionadas. Los metales y el **As** también pueden estar presentes en el agua potable y en las residuales, ya que el drenaje se encuentra a cielo abierto en las comunidades y va directo al lago sin previo tratamiento del agua que puede estar pasando a los mantos freáticos, además los pozos de agua potable se localizan cerca de las zonas agrícolas contaminándose con los fertilizantes. De acuerdo con la problemática antes mencionada es de suma importancia realizar estudios que permitan identificar la presencia de metales pesados con el fin de relacionarlos con las enfermedades que aquejan a la población.

## **5. HIPÓTESIS.**

Los metales pesados presentes en el agua potable y aguas residuales, suelo, sedimentos y polvo, son los responsables de las enfermedades en la población humana del municipio de Copándaro, Michoacán.

## **6. OBJETIVOS.**

### **6.1. General.**

Analizar el impacto de los metales pesados del agua potable, aguas residuales, suelo, sedimentos y polvo con las enfermedades de la población humana del municipio de Copándaro, Michoacán.

### **6.2. Específicos.**

1. Determinar la concentración de metales pesados en agua (potable y residual), suelo, sedimentos y polvos.
2. Caracterizar las sales de la superficie del suelo.
3. Establecer la relación de los metales pesados con las enfermedades de la población humana.

## 7. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

### 7.1. Localización geográfica.

La zona de estudio pertenece al municipio de Copándaro de Galeana en la cuenca del Lago de Cuitzeo al norte de la ciudad de Morelia, Michoacán (Figura 1). Se encuentra entre las coordenadas geográficas 19°51' y 19°59' de latitud norte y, 101°08' y 101°18' de longitud oeste en una altitud promedio de 1900 m; ocupa 0.29% de la superficie del estado de Michoacán. Colinda al norte con el Lago de Cuitzeo y a su vez, al norte de Cuitzeo, con los municipios de Huandacareo y Cuitzeo; al este, con Cuitzeo y Tarímbaro; al sur, con Tarímbaro y Morelia; y al oeste, con Morelia, Chucándiro y Huandacareo (PIGM, 2009).



Figura 1. Localización del área de estudio.



La localidad de *Santa Rita* cuenta con 248 viviendas particulares habitadas y con el servicio de agua potable abastecida con un pozo profundo localizado al norte de la unidad deportiva (INEGI, 2010; Luna, 2014).

En particular, *San Agustín del Maíz* cuenta con 422 viviendas particulares habitadas, de las cuales 316 (74.88%) tenía el servicio de agua potable entubada que se abastecía de dos pozos (INEGI, 2010). En la actualidad, uno de los problemas de los habitantes de las áreas cercanas al lago, es la excavación de pozos clandestinos para obtener el agua sin pagarla, lo que pone en riesgo la salud de los habitantes, ya que estas aguas se localizan cerca del géiser que pueden contener altas cantidades de **S** y **As** (Luna, 2014).

## **7.2 Clima**

El clima de acuerdo a Köppen modificado por García es templado subhúmedo con lluvias en verano Cw1b(i')g (García, 2004).

En donde:

Cw1: templado subhúmedo con lluvias en verano

w: temperaturas medias para el mes más frío entre 3°C y 10°C

(i'): poca oscilación entre 5° y 7°

g: marcha de la temperatura tipo ganges

Se caracteriza por su temperatura media anual que oscila entre los 7.8 °C y 23.4 °C (Figuras 2). La precipitación pluvial anual varía de 800 mm a 1000 mm, y los vientos dominantes provienen de noreste a suroeste. Este clima se caracteriza por ser mesotérmico, debido a su estabilidad en la temperatura (Luna, 2014; Vidal, 2010).

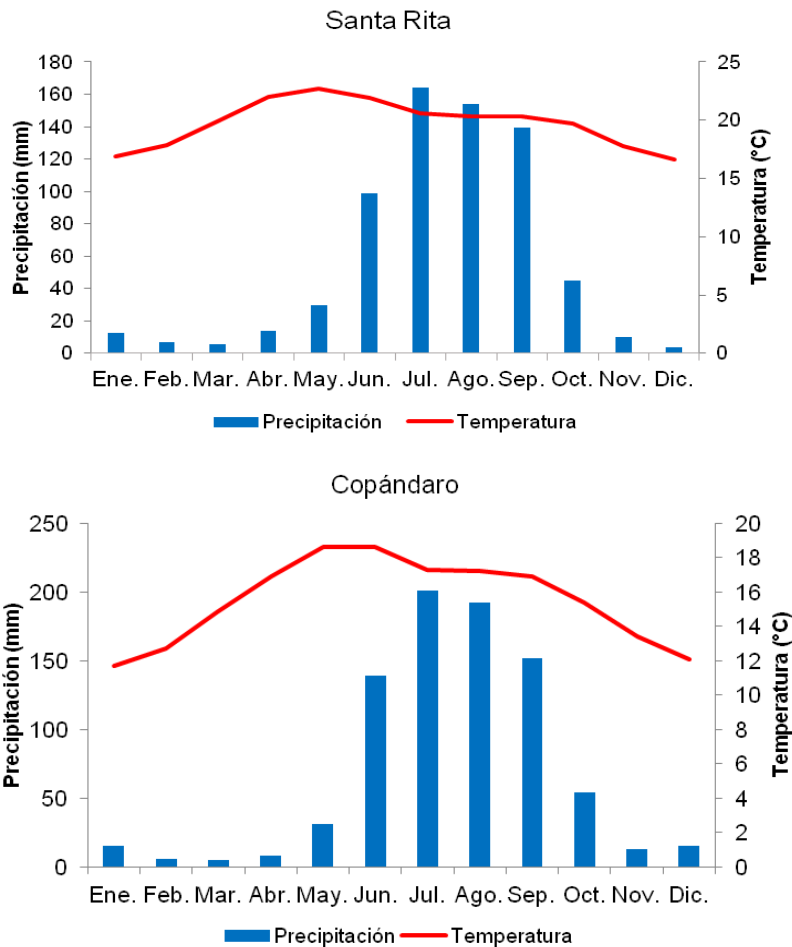


Figura 2. Climogramas, estaciones meteorológicas de Santa Rita y Copándaro para el periodo 1951-2010.

### 7.3. Fisiografía.

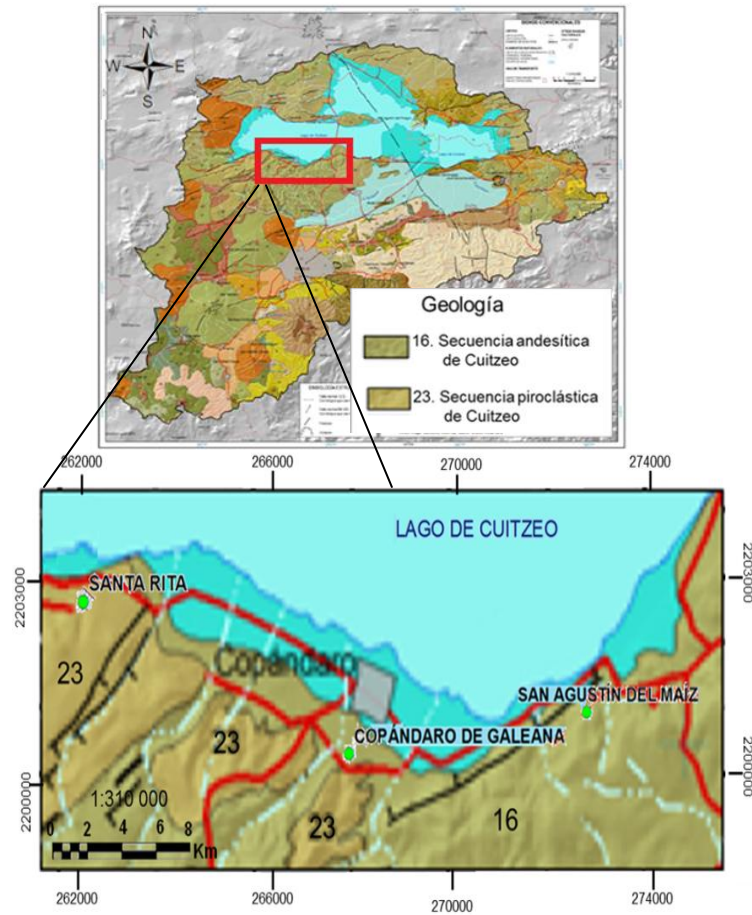
El área de estudio pertenece a la zona del área Cinturón Volcánico Transmexicano y a la subprovincia de sierras y bajíos michoacanos. Las topofomas son llanuras aluviales (17.08%), sierras andesíticas con laderas que conforman escarpes de falla (10.15%), sierras volcánicas constituidas por ignimbritas (9.92%) y lomeríos de basaltos (0.13%) (PIGM, 2009).

#### **7.4. Geología.**

En el municipio de Copándaro se distingue una serie de lomeríos alargados, limitados por fallas este-oeste correspondientes a bloques de rocas volcánicas muy fracturadas que limitan la porción norte y sur del lago de Cuitzeo. En la secuencia de rocas volcánicas se observan estructuras de lomeríos bajos y valles formados de andesitas, dacitas y flujos piroclásticos. En la secuencia de Tarímbaro-Copándaro destacan bloques con un intenso fallamiento noreste suroeste que por su morfología actual y las fallas que la enmarcan, forman una elevación (*horst*), las rocas que integran la secuencia de Tarímbaro-Copándaro tienen edades que van del Oligoceno al Mioceno, mientras que en localidades cercanas como Irámuco y Santa Ana Maya, las rocas volcánicas antiguas están cubiertas por un vulcanismo andesítico más joven del Plioceno (Garduño-Monroy y Israde-Alcántara, 2010) (Figura 3).

**Andesita.** Es una roca afanítica y con frecuencia porfirítica que se parece a la dacita, pero que no contiene cuarzo, predominan los feldespatos plagioclasas y tienen como componente ferromagnesiano el anfíbol o la biotita. La mayoría de las andesitas presentan estructuras bandeadas y el color varía de tendiente a gris verdoso a casi negro; esta roca es abundante en corrientes de lava y también en fragmentos de brechas volcánicas (Rico y Del Castillo, 2005).

**Dacitas.** Es semejante a la riolita con excepción de que las plagioclasas son las que dominan en lugar del feldespato de potasio, el color varía de blanco o amarillo claro, gris o rojo y presenta estructura bandeada (serie de capas alineadas). La dacita está compuesta por fenocristales, principalmente de cuarzo y plagioclasa sódica englobada en una matriz microcristalina (Rico y Del Castillo, 2005).



16: Secuencia andesítica de Cuitzeo; 23: Secuencia piroclástica de Cuitzeo  
 Figura 3. Geología del área de estudio, obtenido del mapa geológico de la cuenca de Cuitzeo, escala 1:310 000 (Garduño-Monroy y Israde-Alcántara, 2010).

**Flujo piroclástico.** En la cuenca de Cuitzeo los flujos piroclásticos son de color rosa (cantera de Morelia) que se cubren por secuencias de materiales terrígenos de origen lacustre o fluviolacustre formadas durante el periodo Mio-Pleistoceno (Garduño-Monroy y Israde-Alcántara, 2010).

## 7.5. Suelos.

En orden de dominancia se presentan las Unidades de suelo Vertisol, Leptosol y Solonchak (Cabrera *et al.*, 2010) (Figura 5).

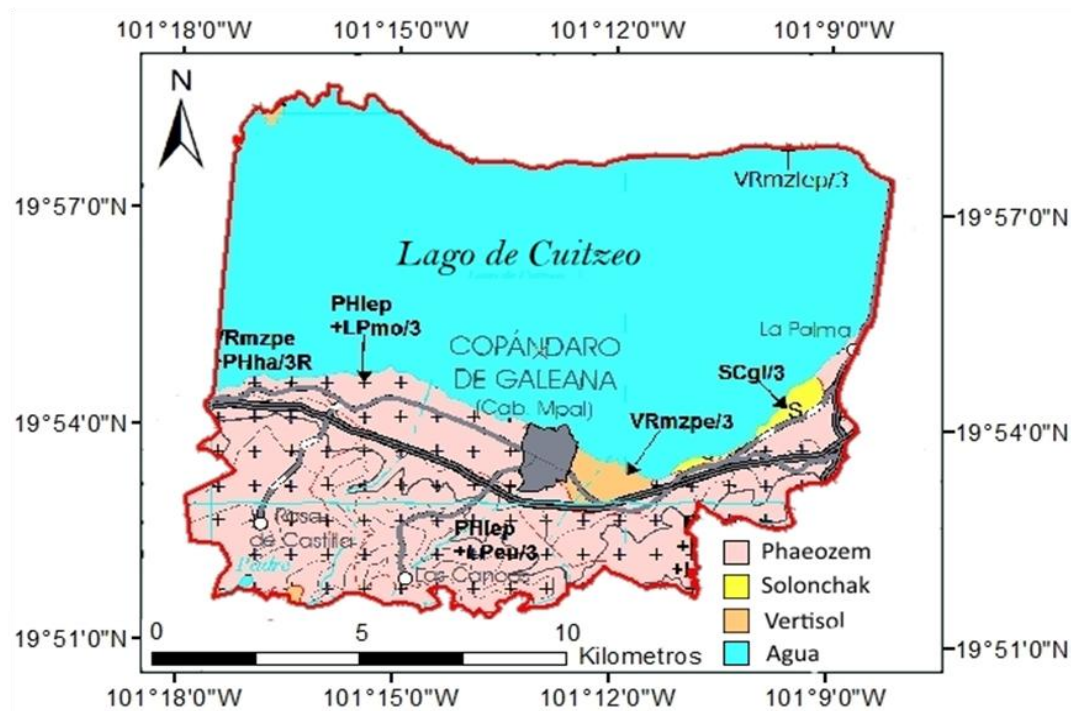


Figura 4. Suelos del municipio de Copándaro, Michoacán.

**Leptosol.** (Del griego: *leptos* = fino). Suelos poco desarrollados limitados en profundidad (20 cm) por roca dura continua. Se localizan en altitudes medias o altas, siendo áreas amenazadas por la erosión. Son un recurso potencial en la estación húmeda para el pastoreo, sin embargo, su escasa profundidad puede causar sequía aún en ambientes húmedos (WRB, 2007).

**Vertisol.** (Del latín: *vertere* = voltear). Suelo negro o gris oscuro, se caracteriza por su alto contenido de arcilla expandible (Montmorillonita) en húmedo y al secarse ocasiona que los suelos se contraigan y agrieten. Este proceso genera que se mezclen los horizontes al haber eluviación e iluviación del material arcilloso,

características que lo hacen difícil de manejar por su expansión contracción en periodos húmedos y secos, respectivamente (INEGI, 2008).

**Solonchak.** (Del latín: *sa*). Tienen un horizonte sálico de 15 cm dentro de los primeros 50 cm de espesor con una conductividad eléctrica de 15 dS m<sup>-1</sup>. Se localizan principalmente en la ribera del lago y en áreas en donde el agua subterránea asciende, disolviendo y arrastrando sales que se depositan en la superficie del suelos, afectando el crecimiento de las plantas, por lo que son de poco valor agrícola y son utilizados para pastoreo extensivo (INEGI, 2008; Cabrera *et al.*, 2010).

## **7.6 Vegetación.**

La principal vegetación del municipio de Copándaro es selva baja caducifolia, bosque, matorral subtropical, mezquital y tular. Los árboles son conocidos de manera local como acacia, tabachín, huamúchil, mezquite y mimosa, entre otras; las herbáceas y pastos son pata de león cabezona, navajita y zacate chino. La agricultura es el uso de suelo que predomina con cultivos de temporal y de riego (Atlas geográfico del estado de Michoacán, 2003; López *et al.*, 2010).

## 8. METODOLOGÍA.

Se realizó una investigación bibliográfica y cartográfica sobre el área de estudio para definir los sitios de estudio.

### 8.1. Selección de sitios de muestreo.

El presente estudio se realizó en el municipio de Copándaro, Michoacán que incluye a Copándaro como cabecera municipal, San Agustín y Santa Rita, los dos últimos, localizados a 4 km al oriente y 3 km al poniente de Copándaro, respectivamente. En estas localidades se tomaron muestras de agua potable, aguas residuales, suelo, sedimentos, polvos y sales (Cuadro1).

Cuadro 1. Localización y características de los sitios de estudio

Sitio	Localidad	Coordenadas		Suelo	Uso de suelo	P	Altitud
		LN	LW				
1	Santa Rita (P1-SR)	19°54'26.54"	101°15'38.53"	VER	Agrícola	5	1855
2	Santa Rita (AN-SR)	19°56'36.72"	101°15'32.64"	VER	Agrícola	5	1839
3	Santa Rita (P2-SR)	19°54'08.34"	101°15'35.63"	VER	Recreativa	5	1869
4	Copándaro (P1-C)	19°53'38.40"	101°12'58.23"	VER	Urbano	5	1849
5	Copándaro (P2-C)	19°53'28.87"	101°12'57.96"	VER	Urbano	5	1838
6	Copándaro (AN-C1)	19°53'58.55"	101°12'41.64"	VER	Pastoreo	5	1839
7	Copándaro (AN-C2)	19°54'0.58"	101°12'36.21"	VER	Pastoreo	5	1839
8	San Agustín (P-SA)	19°53'14.20"	101°10'45.15"	VER	Pastoreo	5	1839
9	San Agustín (AN-SA1)	19°53'52.53"	101°10'08.70"	VER	Sin uso	5	1838
10	San Agustín (AN-SA2)	19°53'56.44"	101°10'04.42"	VER	Sin uso	5	1838

LN = latitud norte, LW = Longitud oeste, P = Pendiente

## 8.2. Trabajo de campo.

### 8.2.1. Colecta de muestras

De acuerdo con la información mostrada en el Cuadro 2, en el campo se colectaron las siguientes muestras el número de éstas no coincide con lo reportado en el Cuadro1 debido a que las muestras de suelos y de sedimentos se tomaron a un lado de las aguas de pozos y residuales, lo cual se explica más adelante.

Cuadro 2. Sitios de estudio y toma de muestras.

Localidad	Aguas		Suelo	Sedimentos	Polvos	Sal
	Potable o de pozo	Residual				
Santa Rita	2	1	2	1	3	1
Copándaro	2	2	2	2	2	1
San Agustín del Maíz	1	2	1	2	2	1

**Agua potable y aguas residuales.** Se colectó 1.0 L de agua potable de manera directa de la llave de cinco pozos que abastecen de agua a la población. Para no tocar el agua residual se utilizó una pipeta de plástico y se colectó 1.0 L de agua en cada una de las cinco descargas a cielo abierto más representativas por su volumen en las localidades cercanas a la zona de mayor desecación del lago.

La toma de muestra tanto de agua potable como residuales para los parámetros físicos y químicos se realizó en botellas de plástico a las que se les marcó el número de muestra y fecha de colecta; las botellas se llenaron con cuidado para minimizar la entrada de aire y evitar cambios químicos.

Tanto al agua potable como a las aguas residuales se les agregaron cinco gotas de HNO<sub>3</sub> concentrado grado analítico con el fin de preservarlas para la lectura de *MP*; previo a la colecta, las botellas se desinfectaron con HNO<sub>3</sub>, las muestras se colocaron en una hielera para su traslado al laboratorio.



**Suelo y sedimentos.** Las muestras de suelo y de los sedimentos se tomaron a un lado de cada pozo de agua potable y de cada descarga de aguas residuales, respectivamente a una distancia aproximada de 1.0 m. Para colectar el suelo y los sedimentos, se hicieron cortes de 30 cm de alto por 30 cm de ancho y con la ayuda de una pala se colectó aproximadamente 0.5 kg de cada uno en bolsas de plástico.

**Polvo.** Se colectó en un área de 1.0 m<sup>2</sup> en las azoteas de seis sitios con el apoyo de una brocha de cerdas finas de acuerdo con la técnica utilizada por Bautista *et al.* (2007) las muestras de polvo se guardaron en bolsas de plástico para su traslado al laboratorio

**Sales.** Con ayuda de una espátula, se tomaron tres muestras de la sal localizada sobre la superficie de la zona de desecación del lago; se colectó únicamente la capa superficial y se almacenó en bolsas de plástico.

**8.2.2. Encuestas.** Con fin de conocer el tipo de enfermedades en el área de estudio y con el apoyo de un formato de encuesta diseñado para tal efecto (Anexo 1), se realizaron 100 encuestas a los residentes de las localidades: 40 en Copándaro, 30 en San Agustín y 30 en Santa Rita.

### **8.3. Parámetros físicos y químicos en agua potable y aguas negras**

#### **8.3.1. Físicos.**

**Color.** Se determinó mediante su comparación visual con una escala estandarizada de Platino-cobalto (Pt-Co) en un espectrofotómetro de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-017-1980 que establece el método de prueba espectrofotométrico. Con este método se determina el color verdadero y/o aparente en una muestra de agua (DOF, 1980a).

**Temperatura.** Se midió con un termómetro de inmersión *In situ* inmediatamente después de la colecta de agua potable y aguas negras, según la Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000 para la determinación de temperatura en aguas (DOF, 2000).

### **8.3.2. Químicos.**

**Conductividad eléctrica y pH.** Estos parámetros se midieron en campo con el apoyo de un potenciómetro portátil HANNA.

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5).** Éste parámetro se obtuvo a partir de la concentración de oxígeno requerido por los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica en aguas naturales y residuales de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001 (DOF, 2001b).

**Dureza total.** Se determinó a partir del principio de la formación de complejos por la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) con los iones **Ca** y **Mg** en aguas, según la Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001 (DOF, 2001c).

**Cloruros.** Se obtuvieron mediante la valoración del nitrato de plata con el indicador cromato de potasio señalado en la Norma Mexicana NMX-AA-073-SCFI-2001 (DOF, 2001d).

**Nitratos.** Se midieron con base en la reacción de los nitratos con el complejo brucina en condiciones ácidas y temperaturas altas, especificadas en la Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001 (DOF, 2001e).

**Sulfatos.** Se obtuvieron a partir de la precipitación del ión sulfato con cloruro de bario en un medio ácido (HCl) según la Norma NMX-AA-074-1981 (DOF, 1981).

#### **8.4. Parámetros físicos y químicos de los suelos y sedimentos.**

El suelo se dejó secar y se pasó por un tamiz de 2 mm de diámetro para obtener la fracción de tierra fina  $\leq 2.0$  mm de diámetro (IUSS, ISRIC, FAO, 2007). Las propiedades de los suelos se determinaron con base en la Norma Oficial Mexicana de suelos (NOM-023-SEMARNAT-2001) (DOF, 2003).

##### **8.4.1. Físicos.**

**Color.** Se estimó por comparación con la Carta de colores Munsell, previo al secado y tamizado del suelo.

**Textura.** Se estimó mediante la velocidad de caída de las partículas de suelo, método de la pipeta de Lowy.

##### **8.4.2. Químicos.**

**Conductividad eléctrica y pH.** Se determinaron en una relación suelo agua 1:2.5 medidos en potenciómetro marca Conductronic PC 45 y en un conductivímetro marca APHA-AWWA-WPCF, 1995.

**Materia orgánica.** Se realizó mediante el método de combustión húmeda de Walkley y Black.

**Capacidad de intercambio catiónico.** Por el método del acetato de amonio que consiste en la saturación del complejo coloidal del suelo, mediante el lavado sucesivo con soluciones salinas y éstas a su vez lavadas con etanol.

### 8.5. Metales pesados (*MP*) y arsénico (*As*).

Los *MP* **Cd**, **Cr**, **Ni** y **Pb**, **Zn** y el metaloide **As** en agua potable, aguas residuales, suelo, sedimentos y polvos se identificaron y cuantificaron mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) previa digestión ácida, excepto la del agua potable que se leyó de manera directa (NMX-AA-051-SCFI-2001) (DOF, 2001f). La identificación de todos los *MP* se realizó en un espectrofotómetro Perkin Elmer Analyst 2000. Además, con el fin de conocer la sensibilidad de los equipos, para los *MP* del agua potable se utilizó espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) (NMX-AA-131/1-SCFI-2008).

El **As** se obtuvo con la técnica de AAS a partir de la generación de hidruros (DOF, 2001f).

Para tener referencia de la concentración máxima permisible de los *MP* y del **As**, en el Cuadro 3 se muestran las referencias de acuerdo con las normas oficiales antes mencionadas.

Cuadro 3. Concentración máxima permitida para los *MP* y el **As**.

Metal	Norma	Norma 001 SEMARNAT 1996			Organización mundial
	127SSA-1994	Uso			de la salud
	Público urbano	Público urbano	Riego agrícola	suelo	Potable
	mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	mg Kg <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>
As	0.010	0.2	0.4	0.2	0.010
Cd	0.005	0.2	0.4	0.2	0.003
Cu	2.00	6.0	6.0	6.0	
Cr	0.05	1.0	1.5	1.0	0.05
Ni	-	4.0	4.0	4	0.07
Pb	0.025	0.4	1.0	1.0	0.01
Zn	5.00	10	10	20	

## **8.6. Mineralógicos.**

El análisis mineralógico se realizó de manera directa en las muestras de sal colectadas de la superficie de los sedimentos del lago desecado, lo más cercano a la proximidad del agua en este estudio se utilizó la técnica de Difracción de Rayos X (DRX).

## **8.7. Metales pesados y su relación con las enfermedades de la población.**

Los *MP* y sus concentraciones identificados en las comunidades de Copándaro, Santa Rita y San Agustín, se relacionaron con las enfermedades reportadas a partir de las encuestas y con el apoyo de una revisión bibliográfica sobre *MP* y las enfermedades que estos ocasionan en los humanos.

## 9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En el presente apartado se muestra la ubicación de los sitios de estudio (Figura 5), los parámetros físicos, químicos y la concentración de metales pesados del agua potable, de aguas residuales, suelos, sedimentos y polvos, así como la caracterización de las sales.

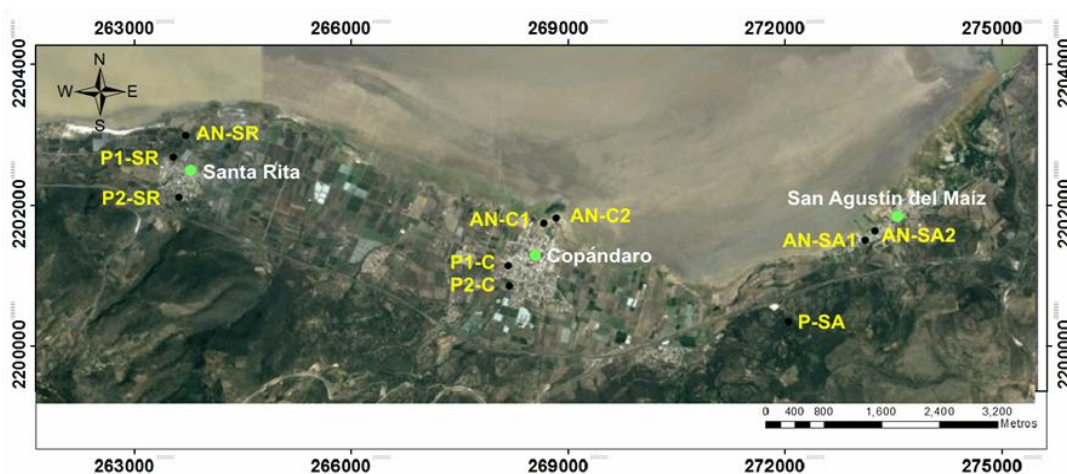


Figura 5. Ubicación de los pozos, de las descargas y sitios de muestreo.

### 9.1 Agua potable.

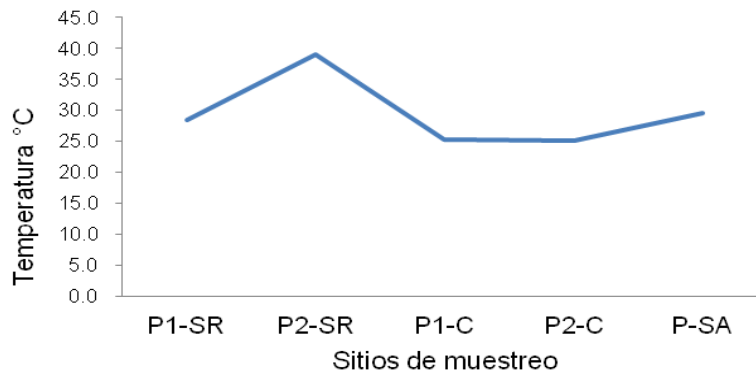
Una caracterización de los parámetros medidos tanto *in situ* como en el laboratorio se detalla en el siguiente párrafo (Cuadro 4).

**Temperatura.** La temperatura en las muestras de agua potable varió de 25.1 °C en el P2-C a 29.6 °C en P-SA, excepto en el pozo P2-SR con 39 °C (Figura 6), por lo que se podría suponer que se está generando una reactivación de la cámara magmática que incrementa la temperatura. Para el agua potable no existe un límite permisible; sin embargo, base en la temperatura se definen usos especialmente para aguas de temperatura alta que son utilizadas con fines domésticos y lugares recreativo (Páez,2008).

Cuadro 4. Parámetros físicos y químicos del agua potable y aguas residuales.

Muestra	Temperatura	Color	C.E	pH	DT CaCO <sub>3</sub>	DBO <sub>5</sub>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	°C	Platino/cobalto	μS cm <sup>-1</sup>		mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>
P1-SR	28.4	37	1260	7.00	337	20	126	20.18	1.018
P2-SR	39.0	50	540	7.20	61	28	28.4	<ld	0.334
P1-C	25.3	54	1790	6.85	481	20	238	26.85	2.385
P2-C	25.1	68	1240	7.12	307	22	98	23.52	2.610
P-SA	29.6	37	1340	7.20	163	24	70	27.74	<ld
AN-SR	24.7	353	1280	6.00	196	166	70	23.74	2.880
AN-C1	27.7	147	1380	7.30	384	140	210	18.52	1.062
AN-C2	26.8	230	1500	7.00	432	200	146	17.18	0.912
AN-SA1	25.5	200	3230	7.71	220	400	154	20.18	1.632
AN-SA2	27.0	229	2340	7.65	196	200	224	34.18	2.145

SANTA RITA: P1-SR, Pozo 1; P2-SR, Pozo 2; AN-SR, agua residual. COPÁNDARO: P1-C, Pozo 1; P2 C, Pozo 2; AN-C1, agua residual 1; AN-C2, agua residual 2 SAN AGUSTÍN DEL MAÍZ: P-SA; AN-SA1, agua residual 1; AN-SA2, agua residual 2; C.E = conductividad eléctrica; DT = dureza total; DBO<sub>5</sub> = demanda bioquímica de oxígeno; <ld = Inferior al límite de detección del método.



P1-SR y P2-SR: pozos de Santa Rita, P1-C y P2-C: pozos de Copándaro;  
P-SA: pozo de San Agustín del Maíz

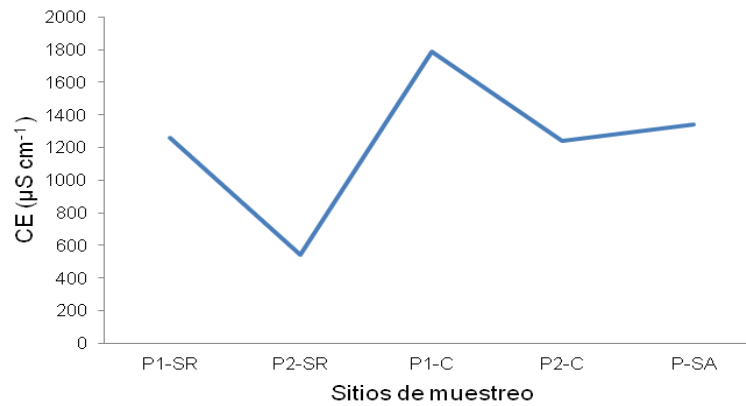
Figura 6. Temperatura del agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

Las temperaturas más altas del agua potable (P-SA y P2-SR) se pueden asociar a las condiciones geológicas naturales que se manifiestan en las aguas termales de la región del Lago de Cuitzeo.

**Conductividad eléctrica (CE).** La CE en el agua potable mostró una variación marcada, de  $540 \mu\text{S cm}^{-1}$  a  $1790 \mu\text{S cm}^{-1}$  (Figura 7), el valor más bajo corresponde al P2-SR y el más alto al P1-C. De acuerdo con Leonarte (2005) y Pérez (2008), la CE incrementa a mayor temperatura, proceso que no se cumple en las muestras estudiadas ya que el pozo con la temperatura mayor es el de CE más baja, esto ocurre quizá por la presencia de otros factores como la carga eléctrica y la movilidad de las sales.

La CE se relaciona con la dureza total en los pozos de Santa Rita y en el P1-C, relación que se debe principalmente a los carbonatos.





P1-SR y P2-SR: pozos de Santa Rita, P1-C y P2-C: pozos de Copándaro; P-SA: pozo de San Agustín del Maíz

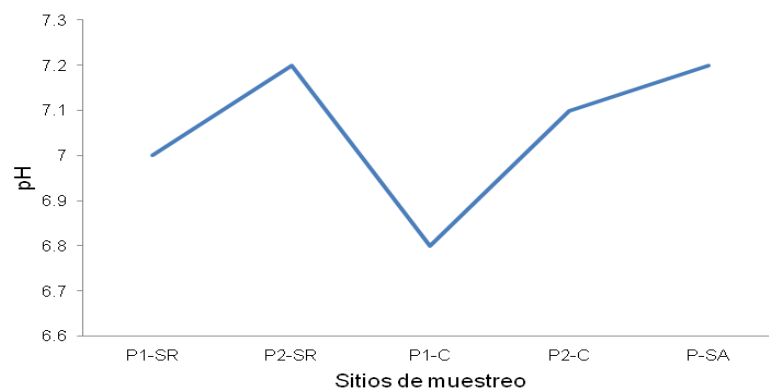
Figura 7. Conductividad eléctrica del agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

La CE se relaciona con la dureza total en los pozos de Santa Rita y en el P1-C, esta relación se debe principalmente a los carbonatos.

En cuanto a la CE, no existe normatividad mexicana que contemple un límite máximo permisible para este parámetro en el agua, por lo que sería de gran trascendencia incluir en la norma oficial del agua, valores de referencia.

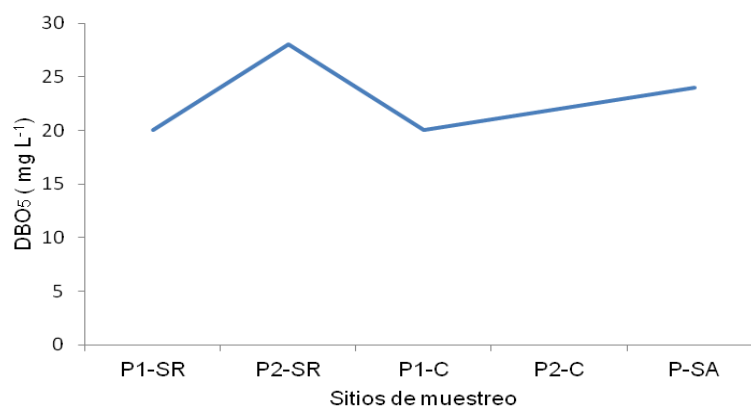
**pH.** El pH del agua potable es neutro (6.85 a 7.20) (Figura 8), parámetro que de acuerdo con Silveira *et al.* (2003) impide la disponibilidad de los *MP*, debido a que un porcentaje importante de estos se han precipitado como hidróxidos insolubles, carbonatos y complejos orgánicos, por lo contrario, si el agua presentara pH ácido, la solubilidad de los metales disueltos aumentaría.

El pH no rebasa el límite máximo de 8.5 establecido en la Norma Oficial (DOF, 2001a). El pH se relaciona con la DT, es decir, entre menor sea el pH mayor es la concentración de la DT.



P1-SR y P2-SR: pozos de Santa Rita, P1-C y P2-C: pozos de Copándaro; P-SA: pozo de San Agustín del Maíz  
 Figura 8. pH del agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

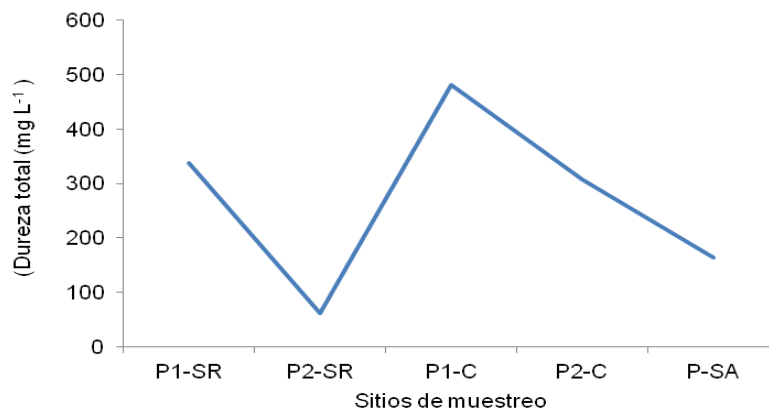
**Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>).** La DBO<sub>5</sub> del agua potable varió de 20 mg L<sup>-1</sup> a 28 mg L<sup>-1</sup> (Figura 9), es una estimación de la cantidad de oxígeno que se necesita una población microbiana para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua (DOF, 2001b), por lo que se infiere que todos los pozos de agua presentan contaminación por materia orgánica.



P1-SR y P2-SR: pozos de Santa Rita, P1-C y P2-C: pozos de Copándaro; P-SA: pozo de San Agustín del Maíz  
 Figura 9. DBO<sub>5</sub> del agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

La DBO<sub>5</sub> tiene una relación directa con el pH es decir al incrementar uno el otro también. Para la DBO<sub>5</sub> en agua potable no existe normatividad que establezca un límite permisible.

**Dureza total (DT).** El agua potable presentó valores de DT que van de 61.44 mg L<sup>-1</sup> en el P2-SR a 481 mg L<sup>-1</sup> en el P1-C (Figura 10), el primero se relaciona también con una conductividad eléctrica baja (540  $\mu$ S cm<sup>-1</sup>) debido a una baja concentración de sal en el agua.

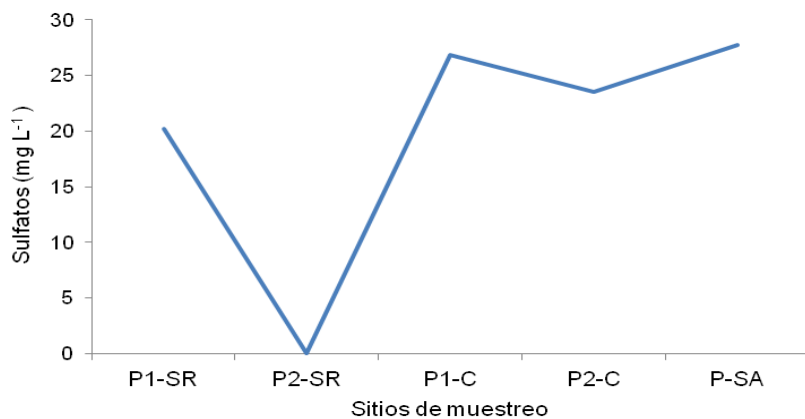


P1-SR y P2-SR: pozos de Santa Rita, P1-C y P2-C: pozos de Copándaro; P-SA: pozo de San Agustín del Maíz

Figura 10. Dureza total del agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

Aunque no se rebasa el límite permisible de 500 mg L<sup>-1</sup> (DOF, 2001 c), el agua de pozo de Copándaro están próximos al este límite.

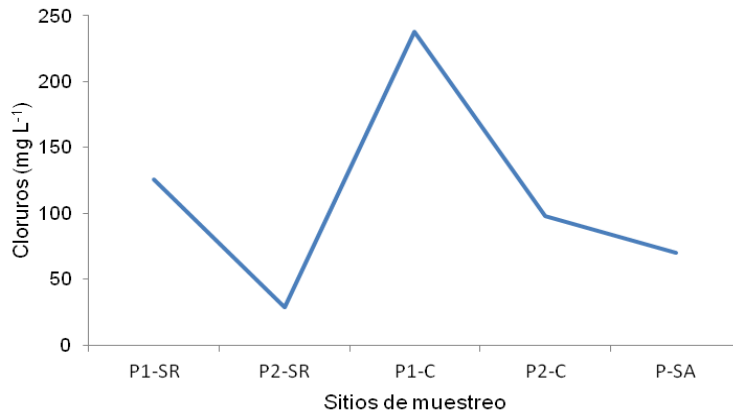
**Sulfatos.** Los sulfatos en agua de pozo variaron de 20.18 mg L<sup>-1</sup> en el P1-SR a 27.74 mg L<sup>-1</sup> en el P-SA (Figura 11). Los sulfatos no sobrepasan el límite máximo permisible de 400 mg L<sup>-1</sup>, por lo que el agua es apta para uso y consumo humano (DOF, 2001a)



P1-SR y P2-SR: pozos de Santa Rita, P1-C y P2-C: pozos de Copándaro; P-SA: pozo de San Agustín del Maíz  
 Figura 11. Sulfatos del agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

Los sulfatos de **Ca** y **Mg** contribuyen en la dureza del agua y constituyen la dureza permanente. Los sulfatos causan efectos laxantes en el ser humano. Debido a estos efectos y su influencia sobre el sabor del agua, la organización mundial de la salud recomienda que en aguas destinadas al consumo humano, el límite permisible no exceda 250 mg L<sup>-1</sup>, éste valor según Barrenechea (sin año) es un indicador de la probable corrosividad del agua (Barrenechea, sin año)

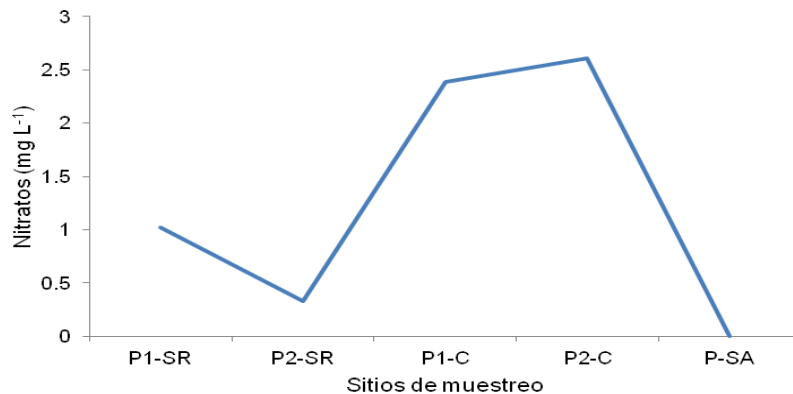
**Cloruros.** La concentración de cloruros en el agua potable osciló de 28.4 mg L<sup>-1</sup> en el P2-SR a 238 mg L<sup>-1</sup> en P1-C (Figura 12), éste último está próximo al límite máximo permisible que es de 250 mg L<sup>-1</sup>. Su presencia en aguas naturales se atribuye principalmente a la disolución de los depósitos minerales de sal, así como a la contaminación que proviene de diversos efluentes de la actividad industrial (Torres, 2007; Cabrera *et al.*, 2002).



P1-SR y P2-SR: pozos de Santa Rita, P1-C y P2-C: pozos de Copándaro; P-SA: pozo de San Agustín del Maíz  
 Figura 12. Cloruros del agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

Los cloruros provocan que los dientes de las personas se vuelvan amarillos, pero sus efectos dependen de la adaptación de cada persona.

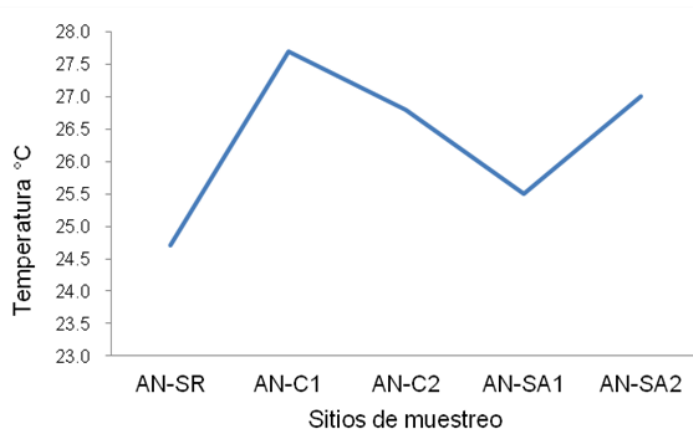
**Nitratos.** La concentración de nitratos osciló entre 0.334 mg L<sup>-1</sup> en el P2-SR a 2.61 mg L<sup>-1</sup> en el P2-C (Figura 13). Estos resultados son similares a los reportados por Torres (2007) para el municipio de Copándaro. Los nitratos son de los principales indicadores de contaminación orgánica mineralizada (Perdomo *et al.*, 2001)



P1-SR y P2-SR: pozos de Santa Rita, P1-C y P2-C: pozos de Copándaro; P-SA: pozo de San Agustín del Maíz  
 Figura 13. Nitratos del agua potable más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

## 9.2. Aguas residuales.

En las aguas residuales, la temperatura varió de 24.7 °C en AN-SR a 27.7 °C en AN-C1 (Figura 14), valores que de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF 1996) no rebasaron el límite máximo permisible de 40 °C, por lo que la temperatura es adecuada para el uso de riego agrícola y uso público urbano; sin embargo, deberá evitarse su uso.

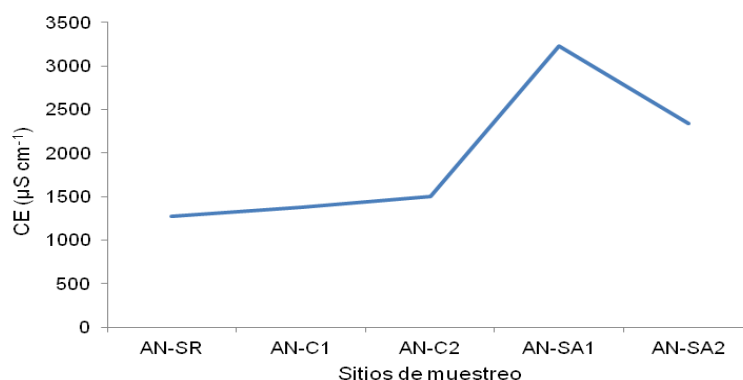


AN-SR: agua residual de Santa Rita; AN-C1 y AN-C2: agua residual de Copándaro; AN-SA1 y AN-SA2: agua residual de San Agustín de Maíz.

Figura 14. Temperatura del agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

De acuerdo con Alfaro (2010), la mayoría de las temperaturas (25.5 °C - 27.7 °C) de las aguas residuales en el presente estudio, pueden tener su origen en el tipo de residuos en los poblados. La autora señala que las altas temperaturas son un factor que favorece las reacciones de descomposición de la materia orgánica provocando malos olores y disminución del contenido de oxígeno, volviendo al agua más inestable, lo cual favorece que su evaporación sea más rápida por la reducción de su viscosidad y el aumento de la presión de vapor en la superficie que disminuye la solubilidad de los gases.

**Conductividad eléctrica (CE).** La CE varió de 1280  $\mu\text{S cm}^{-1}$  a 3230  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (Figura 15), valores que reflejan la presencia de compuestos disueltos que de acuerdo con Torres (2007) corresponden a sales e hidroxilos que ocasionan que un suelo se vuelva salino e infértil para cultivarse cuando es regado con agua de esta calidad. Así mismo, Alfaro (2010) señala que el agua con una conductividad eléctrica superior a 1500  $\mu\text{S cm}^{-1}$  debe limitar su uso para el riego y para usos industriales.

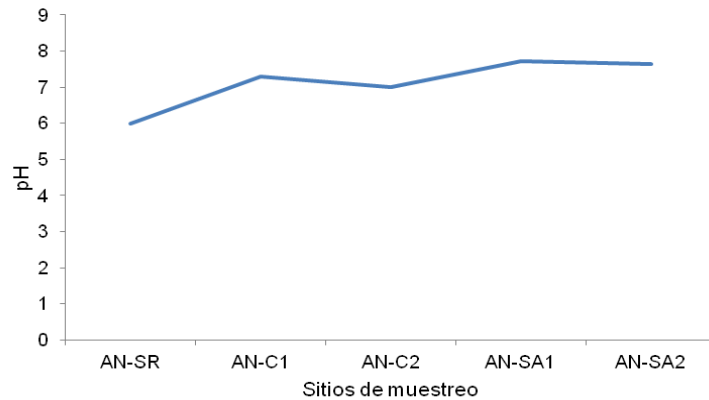


AN-SR: agua residual de Santa Rita; AN-C1 y AN-C2: agua residual de Copándaro; AN-SA1 y AN-SA2: agua residual de San Agustín de Maíz.

Figura 15. Conductividad eléctrica del agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

La CE se relaciona de manera directa en la mayoría de los sitios con el pH, la salinidad incrementa el pH y en pH ácidos la CE es menor.

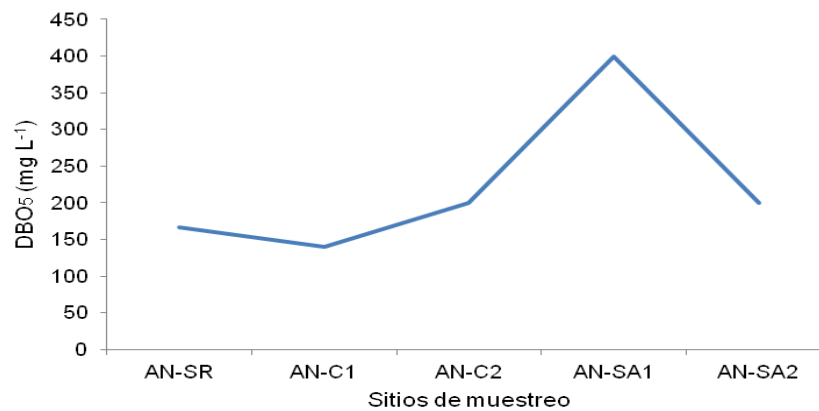
**pH.** El pH varía de medianamente ácido (6.00) a neutro (7.3) con tendencia a ser alcalino (7.7) en las muestras de San Agustín (Figura 16). El pH del agua utilizada para uso agrícola no debe ser mayor a 6.0 y para la protección de la vida acuática debe ser 6.5. En cuanto a los *MP*, El **Cd**, **Cr**, **Ni** y **Zn** son biodisponibles en pH que varían de 5.0 a 8.0 (Sánchez, 2003).



AN-SR: agua residual de Santa Rita; AN-C1 y AN-C2: agua residual de Copándaro; AN-SA1 y AN-SA2: agua residual de San Agustín de Maíz.

Figura 16. pH agua residual más importantes del municipio de Copándaro, Michoacán.

**Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>).** Las aguas residuales presentaron valores entre 120 mg L<sup>-1</sup> y 400 mg L<sup>-1</sup>, valores que excedieron el límite permisible (150 mg L<sup>-1</sup>) para riego (Figura 17). Para uso público urbano la concentración recomendada es 60 mg L<sup>-1</sup> (NOM-001-SEMARNAT-1996), debido a su alto contenido de materia orgánica

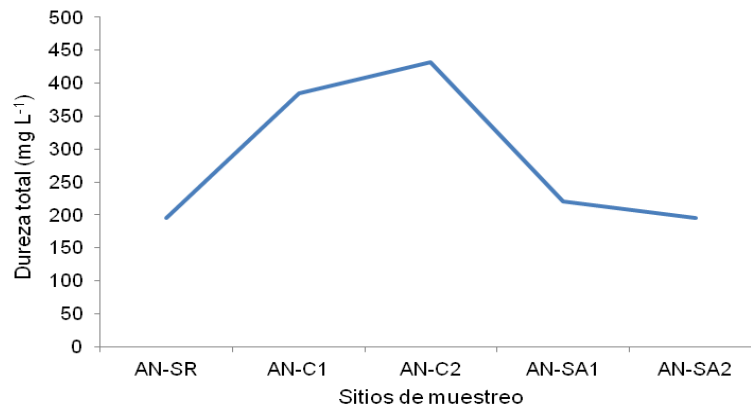


AN-SR: agua residual de Santa Rita; AN-C1 y AN-C2: agua residual de Copándaro; AN-SA1 y AN-SA2: agua residual de San Agustín de Maíz.

Figura 17. DBO<sub>5</sub> del agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.



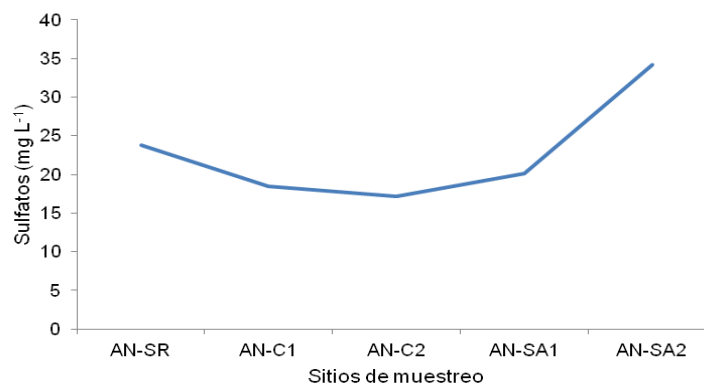
**Dureza total (DT).** En las aguas residuales, la DT varió de 196 mg L<sup>-1</sup> en AN-SR a 432 mg L<sup>-1</sup> en AN-C2 (Figura 18), concentraciones que aun son aceptables ya que el límite permisible de la DT en aguas en general es de 500 mg L<sup>-1</sup> (DOF, 2001a).



AN-SR: agua residual de Santa Rita; AN-C1 y AN-C2: agua residual de Copándaro; AN-SA1 y AN-SA2: agua residual de San Agustín de Maíz.

Figura 18. Dureza total del agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

**Sulfatos.** Los sulfatos en las aguas residuales fue de 17.18 mg L<sup>-1</sup> en el AN-C2 a 23.74 mg L<sup>-1</sup> en el AN-SR (Figura 19). La concentración más alta se presentó en la muestra AN-SA2 que alcanzó 34.18 mg L<sup>-1</sup> no rebasando el límite máximo permisible de 400 mg L<sup>-1</sup> (DOF, 2001).



AN-SR: agua residual de Santa Rita; AN-C1 y AN-C2: agua residual de Copándaro; AN-SA1 y AN-SA2: agua residual de San Agustín de Maíz.

Figura 19. Sulfatos del agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

**Cloruros.** En las aguas residuales, la concentración de cloruros fue de 70 mg L<sup>-1</sup> en el AN-SR a 224 mg L<sup>-1</sup> en el AN-SA2 (Figura 20). En varios sitios, rebasó los límites máximos permisibles (150 mg L<sup>-1</sup>) para el uso agrícola, esto indica que existe una alta concentración de cloruros disueltos en el agua.

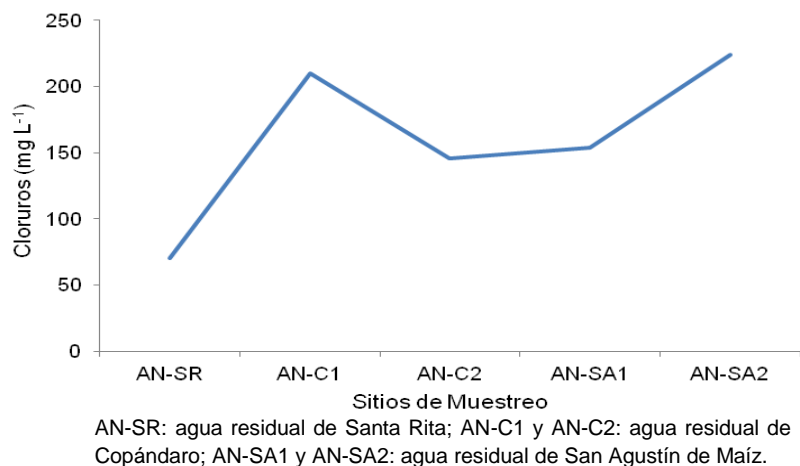
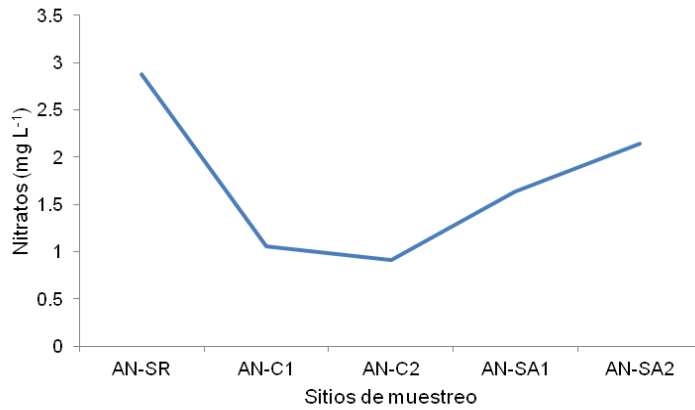


Figura 20. Cloruros del agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

Los cloruros son importantes porque se vuelven tóxicos a medida que el pH disminuye; sin embargo, el pH de las aguas estudiadas muestran una tendencia alcalina, razón por la que la variación de los cloruros sería poca; sin embargo, una alta concentración en el agua puede dañar la estructura metálica y evitar el crecimiento de las plantas (DOF, 2001d). La alta concentración de cloruros en aguas residuales cuando éstas son utilizadas para el riego en campos agrícolas, deteriora la calidad del suelo por la presencia de sales.

**Nitratos.** La concentración de nitratos en las aguas residuales van de 0.912 mg L<sup>-1</sup> en AN-C2 a 2.88 mg L<sup>-1</sup> en AN-SR (Figura 21) que están dentro del límite máximo permisible (10 mg L<sup>-1</sup>) (EPA, 1999).



AN-SR: agua residual de Santa Rita; AN-C1 y AN-C2: agua residual de Copándaro; AN-SA1 y AN-SA2: agua residual de San Agustín de Maíz.

Figura 21. Nitratos del agua residual más importante del municipio de Copándaro, Michoacán.

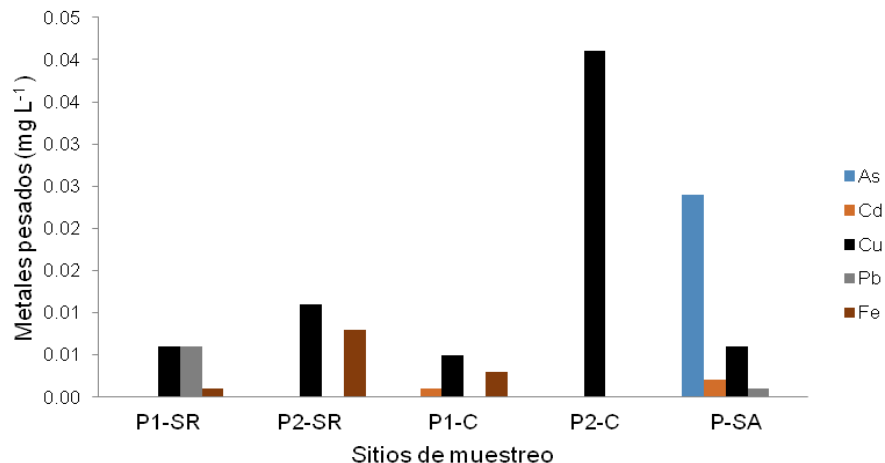
La presencia de nitratos se atribuye a las aguas desechadas por el uso doméstico y los desechos de la agricultura que lo aportan como nitrógeno orgánico, el cual se puede transformar en nitrógeno amoniacal, después de su oxidación en agua con pH alcalino es tóxico y llega a ser peligroso para los humanos al provocar cáncer de estómago y tumores cerebrales (Ward *et al.*, 2005). Estudios epidemiológicos y clínicos en el humano han demostrado que la principal manifestación tóxica que causa la ingesta de nitratos es metahemoglobinemia que afecta principalmente a los niños (Larios *et al.*, 2004).

Por sus efectos adversos para la salud de los lactantes y porque no se tienen procesos definitivos para su remoción, el contenido de nitratos en aguas de consumo público no debe exceder los límites permisibles (Barrenechea sin año).

### **Metales pesados en el Agua (MPA).**

Los *MP* presentes en el agua potable medidos por ICP-MS se muestran en la Figura 22. El **As** y **Cd** tienen una concentración de 0.024 mg L<sup>-1</sup> y 0.002 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente para el P-SA; el **Cu** tiene mayor concentración en el P2-C (0.041

mg L<sup>-1</sup>); el **Pb** en el P1-SR (0.006 mg L<sup>-1</sup>), el **Zn** en el P1- C (0.824 mg L<sup>-1</sup>) y el **Fe** en el P2-SR (0.008 mg L<sup>-1</sup>).



P1-SR y P2-SR: pozos de Santa Rita; P1-C y P2-C: pozos de Copándaro; P-SA: pozo de San Agustín

Figura 22. Concentración de *MP* en agua potable del municipio de Copándaro, Michoacán, medidos por ICP-MS.

Aunque la concentración de *MP* no rebasan los límites máximos permisibles establecidos por la norma oficial (DOF, 2001a) sin embargo el P-SA está próximo al límite de concentración del **As**, es importante su monitoreo debido a que estos elementos se acumulan en pequeñas cantidades, todos son potencialmente tóxicos y pueden dañar a los seres vivos en concentraciones tan pequeñas como de 1.0 mg L<sup>-1</sup>. Estos elementos son parte de la composición de rocas y minerales que pueden ser abundantes como resultado de erupciones volcánicas o fuentes de aguas termales (Barba, 2002). Algunos compuestos de estos metales pueden sufrir acumulación en la cadena trófica, en dosis muy bajas, pero pueden llegar a concentrarse en plantas o animales hasta provocar daños en la salud. El mayor riesgo de enfermedad por exposición al **As** se relaciona con el consumo prolongado de agua contaminada en bajas concentraciones (WHO, 2008).

La concentración de los *MP* medidos por absorción atómica se muestra en la Figura 23. La concentración más alta de *MP* se registró de la siguiente manera: **As** y **Cu** en el P-SA (0.0337 mg L<sup>-1</sup> y 0.030 mg L<sup>-1</sup>), **Cd** en el P1-SR (0.005 mg L<sup>-1</sup>), **Zn** en el P1-C (0.70 mg L<sup>-1</sup>) y **Ni** en el P1-SR (0.092 mg L<sup>-1</sup>), éste último elemento se encontró en el agua del manantial en la misma concentración. El **Cr**, **Fe** y **Pb** estuvieron ausentes en el agua potable.

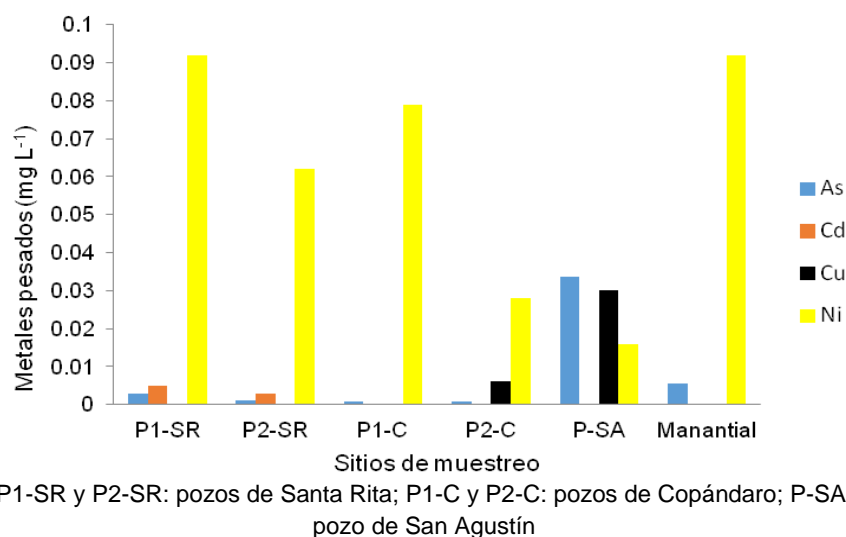


Figura 23. Concentración de *MP* en agua potable del municipio de Copándaro, Michoacán medidos por AAS.

La concentración de **As** en el P-SA sobrepasa el límite máximo establecido por la norma oficial (DOF, 2001 a) que es de 0.025 mg L<sup>-1</sup>, el Cd en el P1-SR esta en límite establecido por la norma antes mencionada, por lo que la población está expuesta y susceptible a presentar problemas de salud debido a que utilizan esta agua para consumo y preparación de alimentos.

Tanto las concentraciones determinadas con absorción atómica como con ICP-MS de *MP* no sobrepasan los límites máximos permitidos según las diferentes normas oficiales, lo cual indica que los *MP* presentes en el agua potable de los sitios de

estudio, actualmente no son riesgo de salud; pero su presencia debe poner en alerta a la población para que monitoreen de manera constante al agua potable porque los *MP* pueden llegar a acumularse y, causar problemas ambientales y de salud humana en el futuro.

El **As** medido por absorción atómica rebasó el límite máximo permitido en el pozo de San Agustín, por lo que la población está expuesta y susceptible a presentar problemas de salud debido a que utilizan esta agua para consumo y preparación de alimentos.

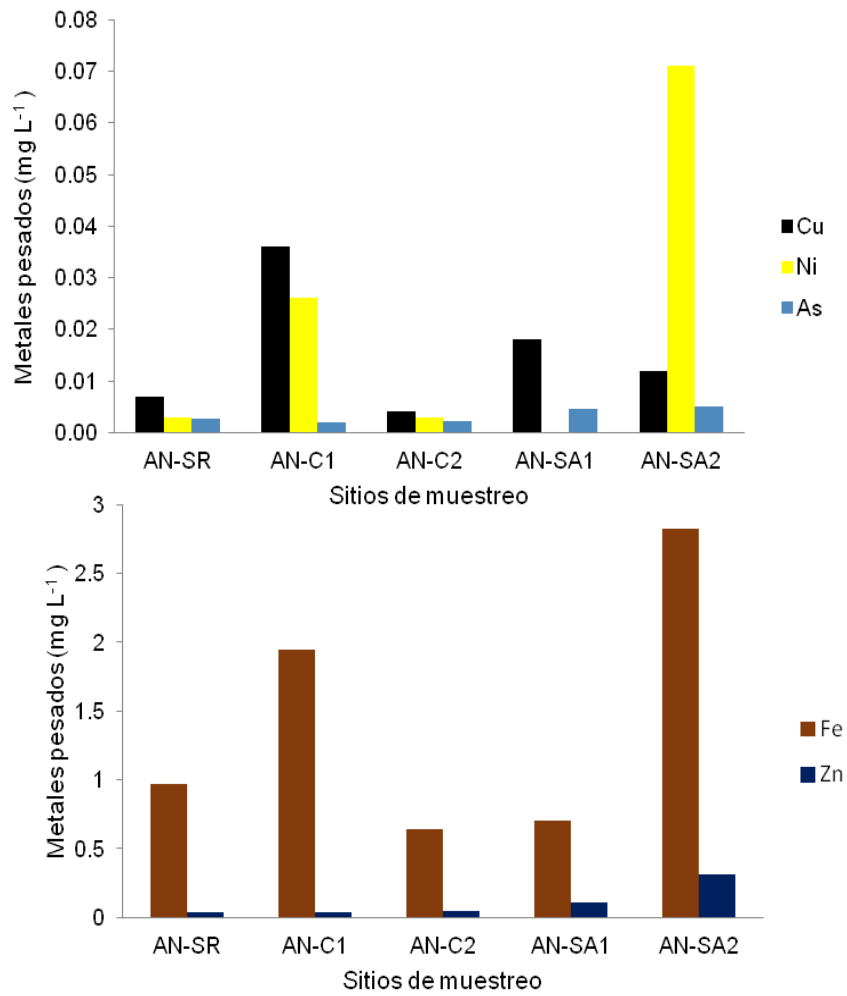
#### **Metales pesados en aguas residuales.**

La concentración de los *MP* en las aguas residuales se muestra en la Figura 24. Los sitios con mayor concentración de *MP* fueron: **As** en AN- SA2 (0.0051 mg L<sup>-1</sup>); **Cu** (0.036 mg L<sup>-1</sup>) y **Fe** (2.82 mg L<sup>-1</sup>) en AN-C1; **Zn** (0.31 mg L<sup>-1</sup>) y **Ni** 0.071 mg L<sup>-1</sup> en AN-SA2. El **Cd**, **Pb** y **Cr** no se detectaron en ningún sitio.

El **As** presentó mayor concentración en las aguas residuales de San Agustín y Santa Rita, lo que de acuerdo con Vázquez *et al.* (2015) puede deberse a la composición de la geología del área de estudio.

Los *MP* en las aguas residuales corresponden a cationes en solución acuosa y pueden ser precipitados en hidróxidos (Proal *et al.*, 1998).

La concentración de los *MP* en aguas residuales está dentro del límite establecido por las normas oficiales. Es importante señalar que la presencia de los *MP* en aguas negras con fines de uso, exige un tratamiento efectivo para evitar que los metales pesados lleguen a los ríos, lagos y lagunas.



AN-SR: agua residual de Santa Rita; AN-C1 y AN-C2: agua residual de Copándaro; AN-SA1 y AN-SA2: agua residual de San Agustín de Maíz.

Figura 24. Concentración de *MP* en aguas residuales del municipio de Copándaro, Michoacán medidos por AAS.

### 9.3. Suelos.

Las propiedades físicas y químicas de los suelos para el área de estudio se muestran en los Cuadros 5 y 6.

#### Propiedades Físicas.

**Color.** El color de los suelos estudiados son variables, gris, café y negro. Estos se deben principalmente a los materiales que los originan, los colores oscuros también se relacionan con la materia orgánica, y el tono café con los óxidos de Fe (Jaramillo, 2002).

Cuadro 5. Color de los suelos del municipio de Copándaro, Michoacán.

Muestra	Húmedo <sup>1</sup>		Seco <sup>2</sup>	
P1 H-1	7.5YR 4/1	Gris oscuro	7.5YR 5/1	Gris
P1 H-2	5YR 3/1	Gris muy oscuro	7.5YR 5/1	Gris
P2 H-1	7.5YR 3/1	Gris muy oscuro	7.5YR 4/1	Gris oscuro
P2 H-2	7.5YR 3/1	Gris muy oscuro	7.5YR 5/1	Gris
P3 H-1	7.5YR 2.5/1	Negro	7.5YR 3/1	Gris muy oscuro
P3 H-2	7.5YR 2.5/1	Negro	5YR 3/1	Gris muy oscuro
P4 H-1	7.5YR 3/2	Café oscuro	7.5YR 4/1	Gris oscuro
P4 H-2	7.5YR 2.5/2	Café muy oscuro	7.5YR 3/2	Café oscuro
P5 H-1	7.5YR 3/2	Café oscuro	7.5YR 4/1	Gris oscuro
P5 H-2	7.5YR 2.5/2	Café muy oscuro	7.5YR 4/1	Gris oscuro
P6 H-1	7.5YR 4/1	Gris oscuro	7.5YR 5/1	Gris
P6 H-2	7.5YR 3/1	Gris muy oscuro	7.5YR 6/1	Gris
P6 H-3	7.5YR 4/1	Gris oscuro	7.5YR 6/1	Gris
P7 H-1	7.5YR 3/1	Gris muy oscuro	7.5YR 4/1	Gris oscuro
P7 H-2	7.5YR 3/1	Gris muy oscuro	7.5YR 5/1	Gris
P8 H-1	7.5YR 3/4	Café oscuro	7.5YR 5/3	Café
P8 H-2	7.5YR 5/3	Café	7.5YR 6/1	Gris
P9 H-1	7.5YR 3/1	Gris muy oscuro	7.5YR 4/1	Gris oscuro
P9 H-2	7.5YR 4/1	Gris oscuro	7.5YR 6/1	Gris
P10	7.5YR 4/1	Gris oscuro	7.5YR 5/1	Gris

1: Condiciones de campo y 2: condiciones de laboratorio.

En los suelos estudiados, el color no muestra un patrón de distribución ya que el muestreo se realizó en las zonas bajas cercanas al lago en donde es común la presencia de sedimentos. De acuerdo con Córtes (2015), el color es un parámetro proxy en la evaluación del contenido de metales pesados porque permite obtener un diagnóstico rápido y económico para saber si un suelo presenta contaminación.



**Textura.** Las clases de textura que predominan son franco-limosa y franco-arcillo-limosa, principalmente en Copándaro y en San Agustín. En los primeros estratos de cada corte de suelos de Santa Rita, la textura fue arcillosa y franco arcillosa. En los sitios cercanos a las descargas de aguas negras, las partículas de las muestra son de tipo limo. Los suelos con el mayor contenido de arena son de textura franca y franca arenosa.

Cuadro 6. Análisis físicos y químicos de los suelos del municipio de Copándaro, Michoacán.

Horz	Textura			CT	MO	pH		CE	CIC
	A	L	R			1:2.5	1:50		
	-	%	-		%			dS m <sup>-1</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>
P1 H-1	0.0	34.8	65.2	AR	2.6	10.1	10.0	5.55	43.00
H-2	0.3	36.9	62.8	AR	1.2	10.0	9.83	3.75	22.36
P2 H-1	23.1	45.0	32.0	FR	4.8	7.25	7.54	0.228	44.72
H-2	21.9	44.9	33.2	FR	2.8	7.08	7.31	0.365	40.42
P3 H-1	14.4	46.9	38.8	FRL	4.3	6.87	7.16	0.125	42.14
H-2	12.2	48.7	39.2	FRL	3.6	6.83	7.00	0.109	39.56
P4 H-1	54.6	33.0	12.4	F	1.7	7.33	7.26	0.102	19.78
H-2	22.4	40.8	36.8	FRL	0.9	7.35	7.44	0.138	36.12
P5 H-1	22.6	55.8	21.6	FL	3.9	7.42	7.57	0.118	36.98
H-2	25.4	53.5	21.2	FL	3.6	7.63	7.56	0.231	36.12
P6 H-1	3.8	67.4	28.8	FL	9.7	7.04	7.20	0.776	38.7
H-2	42.7	46.6	10.8	FL	1.1	8.98	8.86	1.048	22.36
H-3	23.3	70.7	6.4	FL	0.2	9.05	8.95	0.734	18.06
P7 H-1	51.2	37.3	11.6	F	2.7	7.32	7.55	0.739	24.08
H-2	38.6	50.3	11.2	FL	9.1	7.18	7.19	0.856	34.4
P8 H-1	49.9	13.6	36.6	F	7.3	7.05	7.05	0.394	28.38
H-2	56.8	24.9	18.2	FA	1.1	7.92	7.50	0.127	30.96
P9 H-1	1.4	61.8	36.8	FRL	9.3	8.12	8.03	6.16	38.7
H-2	5.2	68.5	26.4	FL	3.1	8.54	8.55	2.69	36.12
P10	3.6	57.2	39.2	FRL	7.13	8.68	8.82	4.06	38.7

Horz = horizonte; A = arena; L = limo; R = arcilla CT= clase textural; AR = arcilloso; FR = franco arcilloso; F= franco; FRL= franco arcillo limoso; FL = franco limoso; MO = materia orgánica; CE = conductividad eléctrica; CIC = capacidad de intercambio catiónico.

A los suelos o sedimentos de partículas finas (arcillas) se les asocia con la contaminación de *MP* debido a que su carga positiva es atraída por la carga negativa de las arcillas (Sánchez, 2003). Los suelos arcillosos tienen una alta capacidad de autodepuración por su alta capacidad de intercambio catiónico que

proporciona a su vez alta capacidad amortiguadora al suelo al retener *MP* (Casillas, 2011), en cambio, los suelos arenosos carecen de capacidad para fijar a los *MP* y éstos se filtran a través de los poros y pueden llegar a contaminar a los mantos freáticos.

### **Propiedades químicas.**

**pH.** El pH de los suelos estudiados varía de neutros (6.8 a 7.35) a fuertemente alcalinos (8.68 a 10.14), predominando los primeros. Valores que de acuerdo con Manzione y Merrill (1989) citados en Sánchez (2003) permiten la disponibilidad de los *MP*, para el **Zn** y el **Co** el pH varía de 6.0 a 7.3 y para el **Ni**, de 6.5 a 8.3. Valores de pH de 6.2 a 6.9 en suelos se han reportado para la cuenca del lago de Cuitzeo (Ortiz-Villanueva y Ortiz 2010), favorables para que el **Zn** y el **Co** sean biodisponibles. Además Alfaro (2010) y Villalobos (2008) reportan pH de 7.0 a 10 para la cuenca del lago de Cuitzeo.

**Materia orgánica (MO).** La clase de MO varía de muy baja (0.10%) a muy alta (9.7%). El alto contenido de MO retiene a los *MP* ya sea mediante el intercambio catiónico o por la formación de complejos. Por una parte, la MO adsorbe a elementos tóxicos como el **Cu**, **Pb** y **Ni** que quedan no disponibles al formar complejos (Jaramillo, 2002; Sánchez, 2003). Por otra parte, la CIC, la MO y el pH se relacionan con una alta capacidad amortiguadora, esto significa la propiedad que tiene un suelo para resistir cambios en las concentraciones de metales en solución, es decir, mantiene a los *MP* dejándolos no disponibles por lo que a mayor capacidad amortiguadora menor será el riesgo a la exposición por metales (Ortiz-Villanueva y Ortiz 2010 y Casillas, 2011).

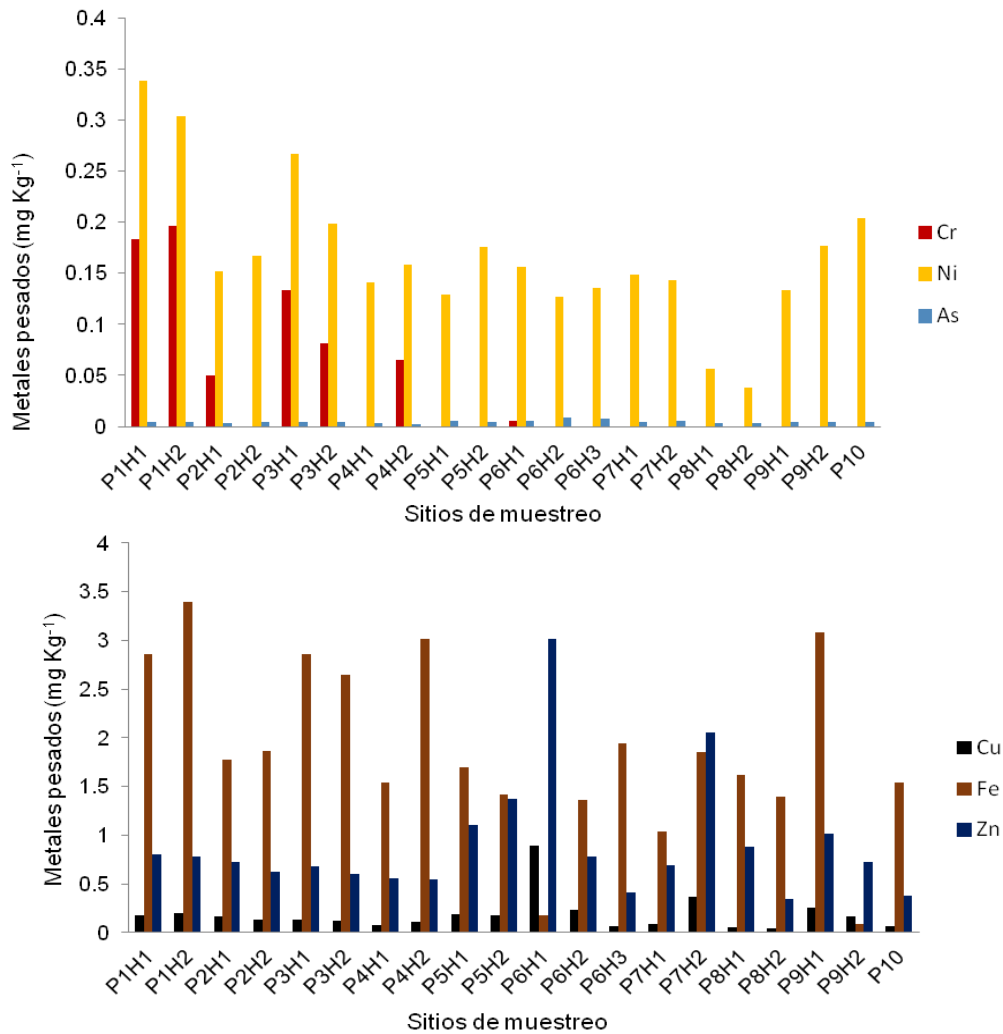
**La conductividad eléctrica (CE).** La mayoría de los suelos estudiados presentan efectos despreciables en salinidad ( $0.102 \text{ dS m}^{-1}$  –  $1.048 \text{ dS m}^{-1}$ ) y en menor proporción existen suelos salinos ( $5.55 \text{ dS m}^{-1}$  a  $6.16 \text{ dS m}^{-1}$ ). De acuerdo con Sánchez (2003), la salinidad de los suelos entre  $650 \mu\text{Scm}^{-1}$  y  $1150 \mu\text{Scm}^{-1}$  incrementa la movilización de los *MP*, además, estos aumentan la salinidad y como consecuencia, la estabilidad del suelo disminuye (Crosara, 2012).

**Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).** La CIC en los suelos estudiados varía de clase media ( $18.06 \text{ cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$ ) a muy alta ( $44.72 \text{ cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$ ), predominando valores en promedio de  $25 \text{ cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$  las clases de CIC más altas se encontraron en el P2 H-1 en la comunidad de Santa Rita. Entre más alto es el contenido de MO, incrementa la CIC (Ortiz-Villanueva y Ortiz 2010), relación que no se presenta en los suelos de estudio. Además, cuanto mayor sea la CIC, mayor será la capacidad del suelo para fijar metales (Sánchez, 2003), proceso presente principalmente en los suelos muestreados junto a las descargas

#### **Metales pesados en suelos.**

En general, los suelos estudiados del municipio de Copándaro presentan concentraciones bajas de metales pesados que no rebasan los límites permisibles descritos en las normas oficiales. La concentración del **As** varió de  $0.003 \text{ mg Kg}^{-1}$  en el P2 H-1 a  $0.009 \text{ mg Kg}^{-1}$  en P6 H-2, respectivamente. La baja concentración de **As** es natural, suposición basada en lo reportado por Alfaro *et al.* (2002), Páez (2008) y Kram-Heydrich *et al.* (2010) quienes señalan que el **As** presente en el lago y manantiales termales localizados en el vaso este del lago es de origen natural.

El **Pb** no se presentó en ningún suelo. El **Cr** se encontró en los Perfiles 1, 2, 3, 4 y 6, la concentración más baja ( $0.05 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) en el P2 H-1 y la más alta ( $0.196 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) en P1 H-2. Las concentraciones mayores de cada elemento son las siguientes: **Cd** ( $0.215 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) en el P6 H-3, **Ni** ( $0.338 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) en el P1 H-1, **Cu** ( $0.892 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) en el P6 H-1, **Zn** ( $2.050 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) en el P6 H-1, y **Fe** ( $3.40 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) en el P1 H-2 (Figura 25).



P: Perfil; H: Horizonte

Figura 25. Concentración de *MP* en suelos del municipio de Copándaro, Michoacán medidos por ASS.

Los sitios de mayor concentración sobre **Zn** y **Cu** son los más cercanos al lago y los de **Ni**, **Cr** y **Fe** se encontraron en las tres localidades. Aunque no rebasan el límite que establecen las diferentes normas, se observa que las concentraciones de estos metales en los suelos son mayores que las obtenidas en el agua, por esta razón se debe poner atención debido a que los metales son acumulables y las concentraciones pueden incrementar y estar disponibles, así mismo los pH que presentan los suelos son favorable para la absorción de algunos metales como **Zn** y **Co**.

El **As** presenta su mayor concentración en los suelos de San Agustín en donde el pH es alcalino, condición favorable que de acuerdo con Galán *et al.* (2010) permite que el **As** sea más móvil.

El **Cd** está presente en dos sitios y el de mayor concentración se relaciona con un alto contenido tanto de limos como de MO, relación similar a lo reportado por Méndez-Romero *et al.* (2003). La MO es capaz de absorber el Cd para formar complejos organometálicos e inhibir la solubilidad y movilización de los *MP* (Kabata-Pendias y Pendias, 2000).

El **Cu** presenta relación con el alto contenido de MO, CIC y pH alcalino. Este metal es considerado como el más móvil de los *MP*. Es un catión traza muy versátil y en el suelo tiene gran capacidad para interactuar químicamente con los componentes minerales y orgánicos, al formar complejos con la MO y las arcillas hace que tenga poca movilidad en el suelo (Kabata-Pendias y Pendias, 2000).

La CIC presenta una clara relación con la concentración del **Ni** a mayor CIC más **Ni**, con la materia orgánica presente en los horizontes superficiales puede estar

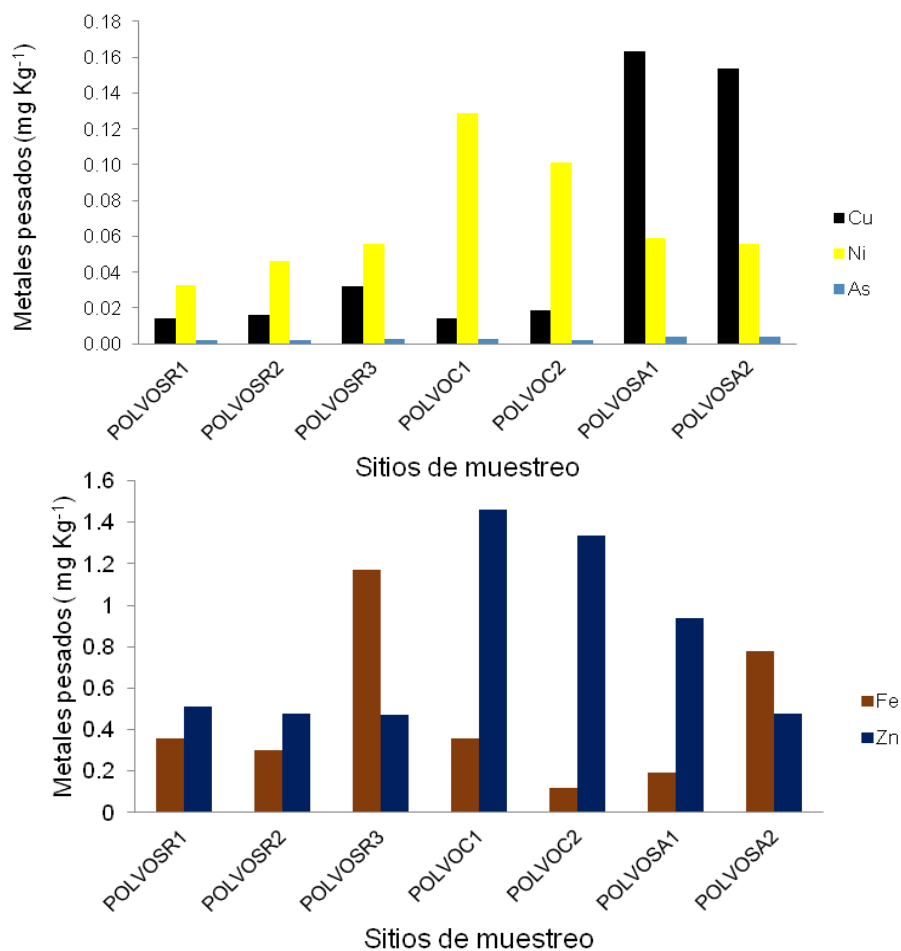
quelatizado y con la arcilla puede formar complejos estables (Kabata-Pendias y Pendias, 2000).

El **Zn** tiene su mayor concentración en suelos que presentan pH medianamente alcalinos y CIC alta. Este metal se relaciona con las fracciones orgánicas y minerales (arcilla).

### **Metales pesados en polvos.**

El metaloide **As** se encontró en los polvos de las tres localidades en concentraciones bajas ( $0.0011 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) para POLVOC3 a  $0.0039 \text{ mg Kg}^{-1}$  para el POLVOSA2. Las concentraciones más altas de metales pesados en polvos se registraron de la siguiente manera: **Ni** en ( $0.129 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) POLVOC1, **Cu** ( $0.163 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) en el POLVOSA, **Fe** ( $1.17 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) POLVOSR3 y **Zn** ( $1.46 \text{ mg Kg}^{-1}$ ) en el POLVOC1. El **Pb**, **Cd** y **Cr** no se presentaron en ningún polvo (Figura 26).

Los *MP* en los polvos tienen relación con el contenido de tráfico vehicular y con las actividades que se realizan en los diferentes sitios. Los polvos son un factor que aumenta con el crecimiento y la dinámica de las ciudades, puede ser responsable de numerosos impactos ambientales (Trujillo-González y Torres-Mora, 2015), principalmente si contienen *MP*.



POLVOSR1, POLVOSR2, POLVOSR3: polvos Santa Rita; POLVOC1 y POLVOC2: polvos Copándaro; POLVOSA1 y POLVOSA2: polvos San Agustín del Maíz

Figura 26. Concentración de metales pesados en polvos del municipio de Copándaro, Michoacán medidos por AAS.

#### 9.4. Caracterización de sales.

Los minerales identificados en las localidades estudiadas se presentan en el Cuadro 7 y en las Figuras 27 a 29.

Tanto la muestra de Copándaro como la de San Agustín del Maíz presentaron la misma mineralogía con excepción de la calcita en San Agustín. El cuarzo y la cristobalita se encontraron en las tres localidades y, la albita y anortita sólo en Santa

Rita. La mineralogía corresponde a diferentes tipos de roca, por lo que, a partir de esto, se infiere que los materiales tienen distinto origen.

Cuadro 7. Minerales en muestras de sal del municipio de Copándaro, Mich.

Especie mineral	Fórmula química	Sitios de muestreo		
		Copándaro	Santa Rita	San Agustín
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$		X	
Andesina	$(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$	X		X
Anortita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$		X	
Calcita	$\text{CaCO}_3$	X		
Clinoptilolita	$(\text{Ca,K,Na})_6(\text{Si}_{30}\text{Al}_6)\text{O}_{72} \cdot 20\text{H}_2\text{O}$	X		X
Cristobalita	$(\text{SiO}_2)$	X	X	X
Cuarzo	$\text{SiO}_2$	X	X	X
Magnetita	$\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$	X		X
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$	X		X

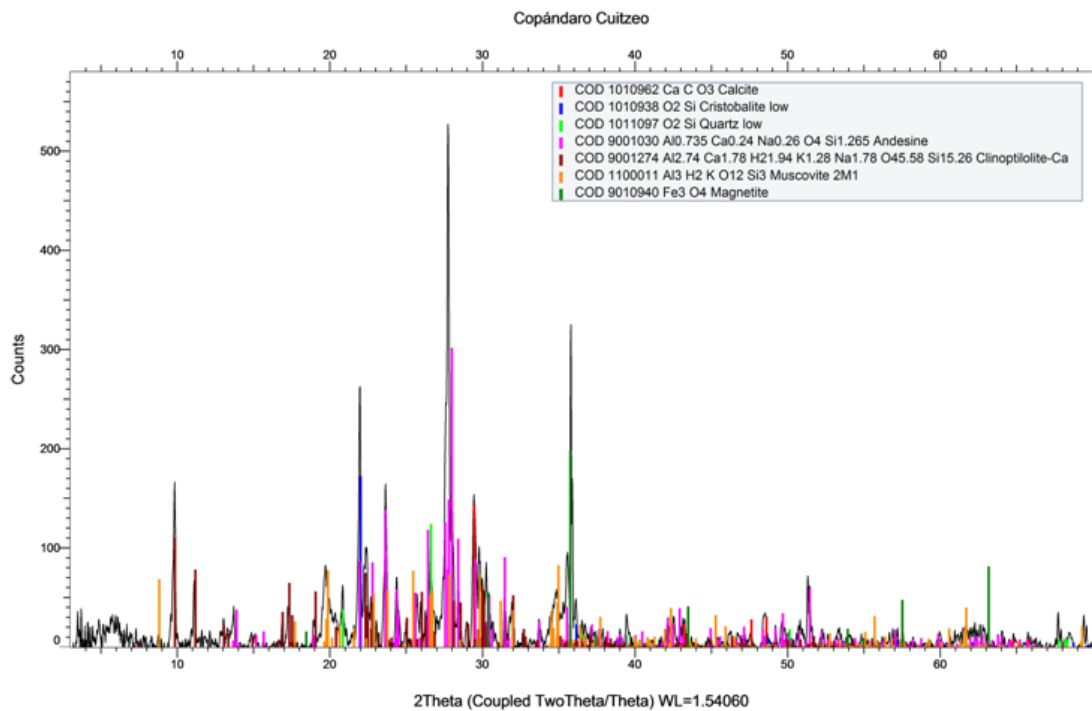


Figura 27. Difractograma de los minerales en la muestra de sal de Copándaro, Michoacán.



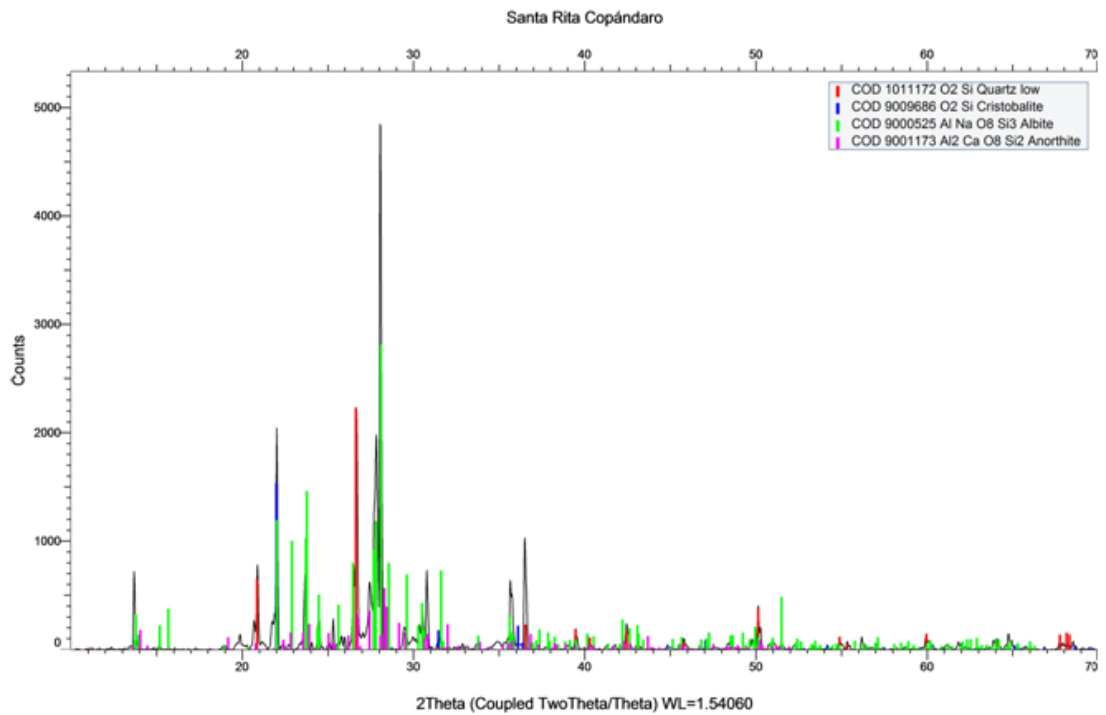


Figura 28. Difractograma de los minerales de muestra de sal de Santa Rita, Michoacán.

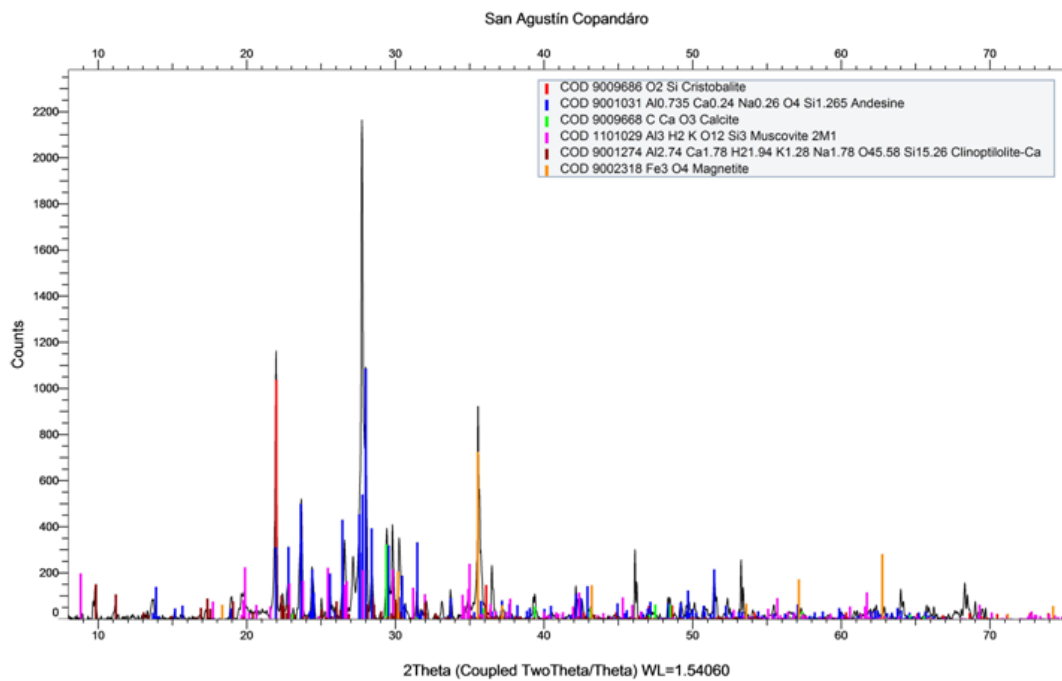


Figura 29. Difractograma de los minerales de muestra de sal de San Agustín, Michoacán.

De acuerdo con la información de los difractogramas, la mineralogía de las muestras de sal de las tres localidades se presenta en forma de picos con una definición variable entre los 15 y 40  $\theta$ . Para Copándaro, el pico con mejor definición (28  $\theta$ ) corresponde a la andesina; la magnetita, a 36  $\theta$ ; cristobalita, a 22  $\theta$ ; moscovita, a 20  $\theta$ ; clinoptilolita, a 30  $\theta$  y calcita, a 10  $\theta$ .

En Santa Rita, el pico con mejor definición lo presentó la albita a los 28  $\theta$ ; cuarzo, a 27  $\theta$ ; cristobalita, a 22  $\theta$  y anortita, a 28  $\theta$ .

En el caso de San Agustín, la mejor definición de los picos fueron para la andesina, a los 28  $\theta$ ; cristobalita, a 22  $\theta$ ; magnetita, a 36  $\theta$ ; moscovita, a 35  $\theta$ ; cuarzo, a 28  $\theta$  y clinoptilolita, a 10  $\theta$ .

La mineralogía antes mencionada indica que su origen proviene de rocas de composición tendiente a intermedia. La clinoptilolita es un mineral derivado de la alteración de rocas zeolíticas que se encuentran en el escarpe cercano a Copándaro, la calcita es un mineral asociado a la evaporación del margen oeste del lago que es bianual y por último no se observaron mineralogías asociadas a Yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) y Trona  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , por lo que consideramos que a pesar de la alta evaporación que presenta el lago no ha llegado a tener una elevada concentración de iones.

#### **9.5. Resultados de las encuestas.**

De acuerdo con la información derivada de las encuestas realizadas (Cuadro 8) se obtuvo la siguiente información:

a) Las enfermedades que aquejan a la población humana son principalmente infecciones gastrointestinales (vómito y diarrea), respiratorias (garganta reseca, estornudos y anginas), alergias en la piel y ojos llorosos.

Cuadro 8. Encuestas realizadas en la población de Copándaro, Michoacán.

Localidad	Habitantes	Encuestas
Copándaro	3834	40
Santa Rita	1070	25
San Agustín	1445	25

b) Estas enfermedades son más frecuentes en las personas que viven próximas a la orilla del lago, debido a que están más expuestas a las partículas de polvo en la temporada de secas cuando son frecuentes las tolvaneras.

c) San Agustín fue la comunidad en donde se registró el mayor número de casos de las enfermedades antes mencionadas, lo cual se atribuye a su cercanía con el lago y con las descargas de aguas negras localizadas en la parte norte, en los límites de la localidad. También mencionan que cuando se presentan las tolvaneras, evitan que los niños jueguen en la calle, indicando de manera textual lo siguiente: “los encerramos para evitar infecciones”. En las personas asmáticas, su enfermedad se complica en esta época. Un problema adicional registrado y relacionado con las aguas residuales es el brote de dengue ocasionado por los “mosquitos” que viven en las zonas en donde el agua se estanca.

d) Los problemas antes mencionados desaparecen a medida que aumenta la distancia del lago a las viviendas, por ejemplo, la plaza central de Copándaro divide a la localidad en dos zonas, la parte norte está más expuesta a las infecciones

debido a su cercanía con el lago, en cambio, la zona sur, por su lejanía y la barrera que representan las viviendas, evita que el polvo llegue en mayor proporción.

e) Otras enfermedades reportadas por la población son cáncer de estómago, de matriz, de pulmón, leucemia, asma, diabetes, hipertensión y gastritis.

f) Más del 50% de la población que padece de alguna enfermedad, no acude al centro de salud y el resto visita a un médico particular o se cura con remedios caseros.

#### **9.6. Relación entre metales pesados y las enfermedades humanas.**

En la comunidad de San Agustín se encontró **As** ( $0.0337 \text{ mg L}^{-1}$ ) en agua potable, además en las tres localidades se presentó en aguas residuales, suelos y polvos. De acuerdo con Castro de Esparza (2006) y Jiménez (2011) este metaloide causa alteraciones en la piel con efectos secundarios en el sistema nervioso, respiratorio y gastrointestinal, además de ocasionar hiperqueratosis (engrosamiento de la capa externa de la piel). De acuerdo con las encuestas, estas enfermedades son las principales que aquejan a los pobladores del municipio de Copándaro, por lo que se considera que el **As** a pesar de estar dentro de los niveles permisibles, su acumulación puede ser el responsable de los problemas de salud indicados.

El **Cr** se registró en los suelos de las tres localidades en concentraciones bajas ( $0.05 \text{ mg L}^{-1}$ ), sin embargo, se debe tomar en cuenta que de acuerdo con el RSP (2013) y ATSDR (2008) puede acumularse y provocar efectos en la salud como dermatitis (úlceras nasales y de piel), bronquitis y asma; además, la presencia de **Cr** se asocia con el cáncer de pulmón. De estas enfermedades, la dermatitis y el cáncer de pulmón se registraron en las tres localidades de estudio.

El **Ni** se encontró en el agua, en suelo y polvos en concentración permisible, sin embargo al estar expuestos, el **Ni** es acumulable y ocasiona dermatitis, bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar, cáncer de pulmón y de senos nasales (ATSDR, 2005). La dermatitis y el cáncer son enfermedades que se presentan en las personas de las tres comunidades.

El **Zn** que se presentó en mayor concentración en el agua, suelo y en polvos no rebasó el límite máximo establecido de  $5 \text{ mg L}^{-1}$  y  $10 \text{ Kg L}^{-1}$  respectivamente, sin embargo la ingesta de **Zn** provoca calambres estomacales, náusea y vómito. La inhalación de grandes cantidades de polvos o vapores de **Zn** puede producir una enfermedad de corta duración llamada fiebre de vapores de metal (ATASDR, 2005).

## 10. CONCLUSIONES.

La Temperatura del agua potable está dentro de los límites permisibles. Los valores mayores CE del agua potable se encontraron en los pozos de Copándaro y en el P1 es mayor de  $1500 \mu\text{S cm}^{-1}$  por lo que se debe limitar para uso de riego.

La DBO<sub>5</sub> presenta concentraciones altas ( $20 \text{ mg L}^{-1}$ ) que indican contaminación por materia orgánica.

Las concentraciones de la dureza total son altas debidas principalmente a la presencia de cloruros, los cuales rebasan el límite permisible en el P1 de Copándaro. Los sulfatos y nitratos del agua potable presentan bajas concentraciones.

La temperatura en las aguas residuales no sobrepasa el límite establecido, la CE y dureza total son altas lo que refleja la cantidad de sales en las aguas principalmente de cloruros que rebasan los  $150 \text{ mg L}^{-1}$  para uso agrícola. Los sulfatos y nitratos están dentro de lo permitido.

La DBO<sub>5</sub> rebasa el límite máximo permitido para uso agrícola que es  $150 \text{ mg L}^{-1}$ .

El pH en agua potable, aguas residuales suelos y sedimentos presentó un patrón de comportamiento con tendencia alcalina lo que ayuda a dar una estabilidad química.

El agua potable del municipio de Copándaro presenta concentraciones de **As** en el pozo de San Agustín que sobrepasa el límite establecido de  $0.025 \text{ mg L}^{-1}$  y de Cd ( $0.005 \text{ mg L}^{-1}$ ) P2 de Santa Rita. Los *MP* **Cu**, **Fe**, **Pb** y **Zn** no rebasan los límites permisibles por las normas oficiales, estos metales son bioacumulables y al estar en contacto con las personas podrían causar problemas de salud.

La concentración de **As, Ni, Cu, Fe** y **Zn** en aguas residuales, suelos y polvos de las tres localidades no rebasan el límite máximo permisible, pero al estar en contacto constante con ellos provocan problemas de salud.

La concentración de *MP* en suelos y polvos es más alta que en agua.

La mineralogía encontrada en muestras de sal de las tres localidades es similar, no se observaron mineralogías asociadas a Yeso y Trona, por lo que a pesar de la alta evaporación que presenta el lago no ha llegado a tener una elevada concentración de iones.

Las enfermedades gastrointestinales, respiratorias y dermatológicas que aquejan a la población humana del municipio de Copándaro de acuerdo a la literatura se relacionan con los metales **As, Cr, Ni**, y **Zn** encontrados en las tres localidades.

## **11. RECOMENDACIONES.**

Es necesario monitorear el agua de los pozos debido a que presentan concentraciones de metales pesados que pueden llegar a acumularse y traer graves problemas de salud.

Se requiere la construcción de plantas tratadoras de aguas residuales debido a que las aguas estudiadas presentan metales pesados que se están acumulando en los sedimentos de la zona de desecación del lago, de lo contrario, ésto provocará una acelerada contaminación afectando a las familias que viven a las orillas del Lago de Cuitzeo.

Se requiere dar seguimiento médico de las enfermedades que presentan los pobladores, en especial sobre las relacionadas con los metales pesados.

Realizar estudios más a detalle entre los metales pesados y la relación con las enfermedades que presentan los pobladores.

Es necesario contar con políticas públicas y ambientales que atiendan este tipo de problemática.



## 12. REFERENCIAS.

- Alfaro R., V. Martínez, N. Segovia, M.B.E. López, M.A. Armienta, P. Peña, J. Rangel y J. L. Seidel. 2002. Radon behavior in springs and wells around Cuitzeo Lake, Lerma River Basin, Mexico. *Geofísica Internacional*, 41 (4): 439-445.
- Alfaro R. 2010. Estudio de la movilidad y toxicidad de metales pesados y arsénico en agua y sedimentos del lago de Cuitzeo, Michoacán. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Atlas geográfico del estado de Michoacán. 2003 2ª ed. EDDISA, S.A. de C.V. Impreso en México
- ATSDR. Agencia para sustancias Tóxicas y el registro de enfermedades Resumen de salud pública Níquel CAS#: 7440-02-0 Níquel 2005  
Disponible en: [http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs15.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs15.html)
- ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2008. Disponible en <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp7.pdf>
- ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2012. Disponible <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp.asp?id=48&tid=15/>
- AgenciaQuadratín.2015.Disponible:<https://www.quadratin.com.mx/principal/Critico-estado-del-lago-de-Cuitzeo-por-contaminacion-y-sequia/>
- Bautista-Zúñiga F. 1993. Los suelos salinos y su recuperación. *Rescate ecológico* (37): 36-39 G.
- Barajas y Sánchez R. T. 2008. La Cuenca del Lago de Cuitzeo: problemática, perspectivas y Retos Hacia su desarrollo sostenible. Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología. Michoacán. 32 p.
- Barba H., L. 2002. Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Universidad del valle. Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/conceptos.pdf>.
- Barrenechea A. sin año. Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. Capítulo 1. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manuall/tomol/uno.pdf>
- Bautista F. 1999. Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Bautista F., Y. Aguilar, R. Marrufo, D. Cabañas-Vargas, M. Gamboa-Marrufo. 2007. A Fast Diagnostic of urban soils contamination by heavy metals in Merida, Yucatán, México.

- Binggan W y Y. Linsheng. 2010. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dust and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*. 94 (2010) 99-107. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/microc](http://www.elsevier.com/locate/microc).
- Cabrera S. A., J. Pacheco, E. Cuevas, J. Ramírez, M. Comas y A. Cámara. 2002. Hidrogeoquímica del Agua que Subyace a la JAPAY I, en Mérida, Yucatán, México. *Revista de Ingeniería*. Disponible en <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen6/hidrogeoquimica.pdf>
- Cabrera A., L. E. Medina, M. Alcalá, J. F. Sánchez y J. M. Ayala. 2010. Suelos. pp 42-45. In: Cram S., L. Galicia, I. Israde-Alcántara. Atlas de la cuenca del lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socio ambiental.
- Calderón S. F. y M. Pavlova. 1999. Metodología para análisis químico del suelo. Disponible en <http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/AnalisisDeSuelos/MetodosQuimicosSuelos.htm> (Revisado el 6 de abril de 2014).
- Casillas C. M. 2011. Caracterización y Análisis Espacial de las Propiedades de Suelos Contaminados por Metales pesados. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología. U.M.S.N.H.
- Castro de Esparza M. L. 2006. Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. International congress. Mexico City, 20-24 June 2006.
- CNA. 2009. Ley Federal de Derechos y Normas Aplicables en Materia de Aguas Nacionales y sus Bienes Públicos Inherentes. CNA, México D. F.
- Córtés E., J. L. 2015. Color de polvos urbanos como indicadores de contaminación por elementos potencialmente tóxicos el caso de Ensenada, Baja California. Tesis de maestría. U.M.S.N.H.
- Crosara A. 2012. El suelo y los problemas ambientales. Disponible <http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Suelos%20y%20problemas%20ambientales.pdf>.
- Creades. 2012. Cuitzeo, el lago que muere. Atl el portal del agua desde México. Disponible en: [http://atl.org.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4729:cuitzeo-el-lago-que-muere-&catid=50:eventos-extremos&Itemid=466](http://atl.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=4729:cuitzeo-el-lago-que-muere-&catid=50:eventos-extremos&Itemid=466)
- Díaz R. L. 2013. Evaluación de la calidad en aguas y sedimentos del Río Grande de Morelia, Michoacán. Tesis. Maestría en ciencias de Ingeniería Civil. U.M.S.N.H.
- DOF. 1980a. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-AA-017-1980. Aguas. Determinación de color. México.

- DOF. 1981. Norma Mexicana NMX-AA-074-1981. Análisis de agua - Determinación del ion sulfato. México.
- DOF. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México.
- DOF. 2000. Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000. Análisis de agua – Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. México.
- DOF. 2001a. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSAI-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. México.
- DOF. 2001b. Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO<sub>5</sub>) y residuales tratadas - Método de prueba. México.
- DOF. 2001c. Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. México.
- DOF. 2001d. Norma Mexicana NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. México.
- DOF. 2001e. Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de aguas - Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. México.
- DOF. 2001f. Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. México.
- DOF 2003. Norma Oficial Mexicana. 2003 (23 de abril) NOM-023-SEMARNAT-2001. p 73.
- DOF 2008. Norma Mexicana NMX-AA-131/1-SCFI-2008. Water analysis – determination of metals by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICPMS) in natural, potable and wastewaters – test metho.
- EcuRed. 2015. Efecto de los metales pesados en la salud humana. Disponible en:[http://www.ecured.cu/Anexo:Efecto\\_de\\_los\\_metales\\_pesados\\_en\\_la\\_salud\\_humana](http://www.ecured.cu/Anexo:Efecto_de_los_metales_pesados_en_la_salud_humana).
- EPA (Environmental protection agency). 1999 Óxidos de Nitrógeno (NOx), ¿Por qué y cómo se controlan? Preparado por Clean Air Technology Center (MD-12),

Information Transfer and Program Integration Division, Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina 2711.

Finkelman J., G. Corey y R. Calderón. 1993. Environmental epidemiology: A Project for Latin America and the Caribbean. Metepec. Eco. 1993.

Florentino. 2012. El sol de Morelia. Severa crisis vive el lago de Cuitzeo: Urge la intervención Conagua, ante el irracional gasto en agricultura y pozos profundos. Publicado el 14 de mayo del 2012

Fontana D., V. Lascano, N. Sola, S. Martínez, M. Virgolini, M. Mazzieri. 2012. Intoxicación por plomo y su tratamiento farmacológico. Departamento de Farmacia, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Franquet B, J. M. 2001. Con el agua al cuello: 55 respuestas al Plan Hidrológico Nacional 3.

Galán H., E y A. Romero. 2010. Contaminación del suelo por metales pesados. Departamento de Cristalografía y Mineralogía. Universidad de Sevilla.

Garduño-Monrroy V. H. y Israde-Alcantara I. 2010. Geología. Capítulo 1. Características físicas. *In*: Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su Geografía y Entorno Socioambiental. ISBN: 978-607-02-1830-9.

García E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. Series de libros. Núm.6. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F. Disponible en [http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo\\_siglo21/serie\\_lib/modific\\_al\\_sis.pdf](http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf)

García I., C. Dorronsoro. 2005. Contaminación por metales pesados. En Tecnología de Suelos. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada, Granada. Disponible en <http://www.edafologia.net/>

Henry J. G. y G. W. Heinke 1999. Ingeniería Ambiental, 2a edi. Editorial Prentice Hall, México. Disponible [https://www.u-cursos.cl/usuario/0e280fd639ac6a63c42fb8d3ed7c6f04/mi\\_blog/r/ingenieria-ambiental\\_glynn.pdf](https://www.u-cursos.cl/usuario/0e280fd639ac6a63c42fb8d3ed7c6f04/mi_blog/r/ingenieria-ambiental_glynn.pdf)

Israde-Alcántara, I., O. Buenrostro-Delgado; V. H. Garduño-Monroy; V. M. Hernández-Madrigal y E. López G. 2009. Problemática geológico-ambiental de los tiraderos de la cuenca de Cuitzeo, norte del estado de Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61: 203-211.

INEGI. 2008. Guía para la interpretación de cartografía. 2ª edi. 28 pp.

INEGI. 2010. Censo de población y vivienda. 248 pp.

- IUSS-ISRIC-FAO (Unión Internacional de las Ciencias del Suelo-Centro Internacional e Información de Suelos-Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2007. WRB: Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización. Traducción al español de M. S. Pazos. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos. No. 103. FAO, Roma.
- Jaramillo J, D. F. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Medellín. 613 pp.
- Jiménez C., B. E. 2011. La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada México: Limusa.
- Kabata-Pedías A., H. Pedías. 2000. Trace elements in soils and plants. CRC Michigan, USA. Disponible en [http://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=Nowwb0xl9fYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=trace+elements++in+soil+and++plants+&ots=JHbKeg7cvw&sig=O9FRQKp3k8Yh4ZVL\\_I-0as1UqBU#v=onepage&q=trace%20elements%20%20in%20soil%20and%20%20plants&f=false](http://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=Nowwb0xl9fYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=trace+elements++in+soil+and++plants+&ots=JHbKeg7cvw&sig=O9FRQKp3k8Yh4ZVL_I-0as1UqBU#v=onepage&q=trace%20elements%20%20in%20soil%20and%20%20plants&f=false). Revisado el 26 de julio 2014.
- Kabata-Pedías A. 2011. Trace elements in soils and plants. Fourth edition CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business. Disponible en [http://www.petronet.ir/documents/10180/2323242/Trace\\_Elements\\_in\\_Soils\\_and\\_Plants](http://www.petronet.ir/documents/10180/2323242/Trace_Elements_in_Soils_and_Plants)
- Kram-Heydrich S., C. Ponce de León, P. Fernández-Lomelín y I. Sommer-Cervantes. 2010. Geogenic and Anthropogenic Differentiation of Potentially Toxic Elements In Superficial Sediments From Cuitzeo Lake, Mexico. River Sediments. pp 37-75. ISBN: 978-1-60741-437-7.
- Larios O. L., R. Cañas, A. Sánchez y A. Capote. 2004. La contaminación del agua de pozo como causa de metahemoglobinemia en niños. Cama-güey 1985-2001. AMC Vol.8 No.2. Camagüey marzo.-abril.
- Leonarte P. 2005 Calidad de aguas subterráneas de Gerona y La Fe. Maestría en Análisis y Tecnología Ambiental ISCTA.
- Li G., Zhimin C., Lan D., Xu J., Wang S. y Yin W. (2007). Spatial variations in grain size distribution and selected metal contents in the Xiamen Bay, China. Environmental Geology, 52: 1559-1567.
- López-Granados, E. y M. Mendoza-Cantú, 2002. Cambio de la cobertura vegetal y uso de la tierra. El caso de la cuenca endorreica del Lago de Cuitzeo, Michoacán. Gaceta Ecológica, INE, SEMARNAT, México 64. p.19-64.

- López G, E., M. Mendoza y G. Bocco. 2010. Cobertura vegetal y uso de terreno. Atlas de la cuenca de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental.
- Lucho, C.A., Álvarez M., Beltrán, R.I., Prieto, F. and Poggi, H. 2005a. A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater. *Environmental International*, On Line: 0160- 4120-D 2004 doi:10.1016/j.envint.2004.08.002.
- Luna M. I. 2014. Periódico Oficial del gobierno constitucional del estado de Michoacán de Ocampo. H. Constitucional del Municipio de Copándaro Michoacán. Tomo CLIX. Núm.15.
- Machado A., N. García, C. García, L. Acosta, A. Cordova, M. Linares, D. Giradoth, y Y. Velásquez. 2008. Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Rev. Int. Contam. Ambient* 24:4 México.
- Manahan E. Stanley. 2007. Introducción a la Química Ambiental. Editorial Reverté. 221. ISBN 968-36-6707-4, página 647. Disponible en [https://books.google.com.mx/books?id=5NR8Dlk1n68C&pg=PA148&dq=METALES+PESADOS+EN+EL+AGUA&hl=es-419&sa=X&ved=0CBwQ6wEwAGoVChMlnI\\_li6qlxwIVw8yACh2EfQb1#v=onepage&q=METALES%20PESADOS%20EN%20EL%20AGUA&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=5NR8Dlk1n68C&pg=PA148&dq=METALES+PESADOS+EN+EL+AGUA&hl=es-419&sa=X&ved=0CBwQ6wEwAGoVChMlnI_li6qlxwIVw8yACh2EfQb1#v=onepage&q=METALES%20PESADOS%20EN%20EL%20AGUA&f=false)
- Méndez-Romero F., J. Gisbert-Blanquer, J. García-Díaz y A. Marqués-Mateu. 2003. Relación estadística entre metales pesados y propiedades de suelos de cultivo regados con aguas residuales no depuradas. *INCI*. Vol. 28 N. 5.
- Murray K. S., Cauvet D., M. Lybeer y J. C. Thomas 1999. Particle size and chemical control of heavy metals in bed sediment from the Rouge river, southeast Michigan. *Environmental Science and Technology*, 33: 987-992.
- Nava-Ruíz C y M. Méndez-Armenta. 2011. Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurocién (Mex)* Vol. 16, No. 3: 140-147.
- Ortíz-Villanueva, B., C. A. Ortiz S. 2010. Edafología. 7ª ed. en español. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. México, D. F. V. A Gómez C (Ed).
- Páez S. A. 2008. Evaluación de la concentración de arsénico y calidad del agua subterránea en función de su manejo en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Facultad de biología.U.M.S.N.H.
- Perdomo C.C., N. Casanova y S. Ciganda. 2001. Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay. *Agrociencias Volumen 5 Número.1* Página 10-22.

- Pérez G. G. 2005. Disponibilidad de metales tóxicos en sitios contaminados aplicados y limitados de la fracción en la determinación de gradientes de polución. Memoria para aspirar al grado de Doctor en Química, Universidad Autónoma de Barcelona.
- Pérez V. J. 2008. Caracterización Hidrogeoquímica del Agua Subterránea del Valle de Querétaro para el Estudio de Sistemas de Flujo. Maestría en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Pérez G. P., Azcona. M. I. 2012. Los efectos del Cd en la salud. Revista de especialidades Médico-Quirúrgica México Vol.17, No. 3. pp. 199-205. ISSN: 1665-7330.
- Pineda H. R. 2004. Presencia de Hongos Micorrízicos Arbusculares y Contribución de *Glomus Intraradices* en la Absorción y Translocación de Cinc y Cobre en Girasol (*Helianthus Annuus* L.) Crecido en un Suelo Contaminado con Residuos de Mina. Tesis para Obtener el Grado de Doctor en Ciencias Universidad de Colima. Tecoman, Colima.
- Porta C. J., M. López-Acevedo R. y C. Roquero de L. 2003. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. 3ª ed. Editorial Mundi-Prensa, España.
- Prieto M. J., C A. González, A D Román G, F Prieto G. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, Vol. 10, Núm. 1, 2009, pp. 29-44, Universidad Autónoma de Yucatán México.
- PIGM. (Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos). 2009. Copándaro, Michoacán. Clave geoestadística 160182009.
- Proal N. B., L. Martínez y M. Mueller. 1998. Estudio sobre la Remoción de Metales Pesados en Aguas de Desecho bajo la Técnica de Aglomeración Esférica. Instituto Politécnico Nacional.
- Pugna S., M. Sosa, T. Lebgue, C. Quintana y A. Campos. 2006. Contaminación por metales pesados en suelo provocado por la industria minera. *Ecología Aplicada* 5 (1,2) 2006. ISSN 1726-2216. Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Perú.
- Quadratin. 2015. Crítico el estado del lago de Cuitzeo por contaminación y sequía. En prensa. Disponible en: <https://www.quadratin.com.mx/principal/Critico-estado-del-lago-de-Cuitzeo-por-contaminacion-y-sequia/>
- RSP XVII. (Revista de Salud Pública). 2013. 1:49-59. Disponible en: <http://www.innovita.com/pdf/training%20pdf/HM-spanish%20print.pdf>
- Rico R. A y H Del Castillo. 2005. La ingeniería de los suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas. Limusa Noriega editores. Volumen 1. ISBN: 968-18-0054-0. Disponible en:

[https://books.google.com.mx/books?id=rU\\_pA257zUEC&pg=PA106&dq=and esita&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi808vehpLLAhWGSiYKHq3BR0Q6AEIJzAC#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=rU_pA257zUEC&pg=PA106&dq=and esita&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi808vehpLLAhWGSiYKHq3BR0Q6AEIJzAC#v=onepage&q&f=false).

Rodríguez J. M y Rafael M.1999. Físicoquímica de aguas. Ediciones Díaz de Santos. S.A. Madrid, España. ISBN: 84-7978-382-6. Disponible <https://books.google.com.mx/books?id=0gt-ra9MHHwC&printsec=frontcover&dq=quimica+del+agua+gratis&hl=es419&sa=X&ved=0CDIQ6wEwBGoVChMI2NXCyo2lxwIVSJyACh01Zg2r#v=onepage&q&f=false>.

Rodríguez C., J. A., R. García y R. Ruíz. 2012. Simulación del impacto de las descargas de agua residual en el río grande de Morelia. Facultad de ingeniería civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Romero M, M. Álvarez y A. Álvarez. 2007. Los factores ambientales como determinantes del estado de salud de la población. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología. **Versión On-line** ISSN: 1561-3003.

Ruiz-Gallardón A. 2001. Clasificación del suelo. *In*. Ley del suelo de la comunidad de Madrid.(Ley 9/2001/ del 17 de Julio) Disponible en: <http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=ContentDisposition&blobheadername2=cadena&blobheadervalue1=filename%3DCMLe000901.pdf&blobheadervalue2=language%3Des%26site%3DPortalVivienda&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1310603570798&ssbinary=true>

Sánchez B., M. I. 2003. Determinación de metales pesados en suelos de Medina del campo (Valladolid). Contenidos extraíbles, niveles fondo y de referencia. Tesis de Doctorado. Universidad de Valladolid. Disponible en: [http://bvc.s3.dev.cervantesvirtual.com/pdfparser/00101\\_48e-82b2-11df-acc7-002185ce6064.pdf](http://bvc.s3.dev.cervantesvirtual.com/pdfparser/00101_48e-82b2-11df-acc7-002185ce6064.pdf) (Revisado el 14 de febrero de 2014).

Sauquillo A., A. Rigol y G. Rauret. 2003. Overview of the use of leaching/extraction tests for risk assessment of trace metals in contaminated soils and sediments. Trends in Anal. Chem. 22: 152–159.

Sauve S., Henderson, W. and Allen, H.E. 2000. SolidSolution Partitioning of Metals in Contaminated Soils: Dependence on pH, Total Metal Burden, and Organic Matter. Environmental Science Technology [http://www.researchgate.net/publication/223569158\\_Overview\\_of\\_the\\_use\\_of\\_leaching\\_extraction\\_tests\\_for\\_risk\\_assessment\\_of\\_trace\\_metals\\_in\\_contaminated\\_soils\\_and\\_sediments.\\_Trends\\_Anal\\_Chem](http://www.researchgate.net/publication/223569158_Overview_of_the_use_of_leaching_extraction_tests_for_risk_assessment_of_trace_metals_in_contaminated_soils_and_sediments._Trends_Anal_Chem)

SIAPA (Sistema de información del principado de Asturias). 2004. Disponible en: <http://tematico.asturias.es/mediambi/siapa/web/residuos/contaminados/index.php> (Revisado el 4 de marzo de 2014).



- Singh A.K., S.I. Hasnain y. D.K. Banerjee 1999. Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of Damodar River – a tributary of the lower Ganga, India. *Environmental Geology*. 39(1): 90-98.
- Silveira M. L.A., R.F. Alleoni L. y R.G. Guilherme L. 2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Sci. Agr.* 60: 793-806.
- Soil Survey Staff. 2007. Claves para la taxonomía de suelos. 10ª ed. Edición, 2006. Traducción al español por Ortiz Solorio, C. A y Ma. C. Gutiérrez-Castorena. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Campus Montecillo, México 331 p.
- Tamayo C. 2009. Metodología para calcular el índice de calidad de suelo. Caso de estudio. Escuela Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería Marina y Ciencias del Mar. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6182/3/Índice%20calidad%20suelo%20Carlos%20Tamayo.pdf>. 2009 (Revisado el 20 de Marzo de 2014).
- Torres M. 2007. Salud de veinte embalses de la cuenca Lerma-Chapala. Proyecto de investigación. Instituto Mexicano de tecnología del agua Jiutepec, Morelos
- Torres F. J. 2012. Contaminación del lago de Cuitzeo. *La Voz de Michoacán*. Disponible en <http://www.centrodelagua.org/centrodelagua.org/www/documentos/Contaminaci%C3%B3n-del-lago-de-Cuitzeo.aspx>.
- Trujillo-González J. M. y M. A. Torres-Mora. 2015. Evaluación de metales pesados acumulados en polvo vial en tres sectores de la ciudad de Villavicencio, Colombia. *Luna Azul* ISSN 1909-2474.
- Vázquez V. M. J., R. Cortés-Martínez, R. Alfaro-Cuevas-Villanueva. 2015. Arsenic occurrence and water quality in recreational thermal springs at Araró, Mexico. *International Journal of Science and Technology*. Volume 5. No.1. ISSN 2224-3577
- Vidal. R. 2010. *Clima In: Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su Geografía y Entorno Socioambiental*. ISBN: 978-607-02-1830-9.
- Villalobos-Castañeda B., R. Alfaro-Cuevas, R. Cortés-Martínez, V. Martínez-Miranda y L. Márquez-Benavides. 2010. Distribution and Partitioning of iron, zinc, and arsenic in surface sediments in the grande river mouth to Cuitzeo lake, México. *Springer Science. Environ Monit Assess* 2010. 166:331-346. DOI: 10.1007/10661-009-1005-7

Ward M H., T M De Kok, P. Levallois, J. Brender, G. Gulis y B T. Nolan. 2005. Workgroup report: drinking water nitrate and health—recent findings and research needs. *Environ Health Perspect.* 113 (11):1607–14.

WHO. (World Health Organization). 2008. Guidelines for drinking-water quality. Vol. 1. Recommendations. 3th ed. Geneva: WHO; 2008.

Wild, A. 1993. Soils and environment: An introduction. Cambridge University Press. Cambridge, Great Britain. Disponible en <http://www.amazon.com/Soils-Environment-Alan-Wild/dp/0521438594>. Revisado el 29 de Julio de 2014.

Zhang J., T. Cai, F. Zhao, T. Yao, Y. Chen, X. Liu, W. Luo y J. Chen .2012.. The Role of  $\alpha$ -synuclein and Tau Hyperphosphorylation-Mediated Autophagy and Apoptosis in Lead-induced Learning and Memory Injury. *International J Biol Sci* 8: 935-944.

<http://quimica.laguia2000.com>

# ANEXOS

## **ANEXO 1. Marco conceptual**

En el present apartado se anota una serie de conceptos relacionados con el tema de estudio.

### **1. Agua.**

El agua es el compuesto principal de la materia viva, es una molécula compuesta de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno H<sub>2</sub>O (Franquet, 2001). El agua está expuesta a ser contaminada principalmente por el vertido de las aguas residuales de los hogares y los establecimientos comerciales que al descomponerse ocasionan la desoxigenación. La agricultura y la ganadería son otra fuente de contaminación no sólo de las aguas superficiales, sino también de las subterráneas; los residuos animales como los fertilizantes químicos y orgánicos con alto contenido en **N**, **P**, **K** y **Mg** también contaminan el agua a través de percolaciones. Otros agentes contaminantes son los sedimentos formados por partículas del suelo transportados por tormentas y escorrentías procedentes de tierras de cultivo o derribos urbanos.

**2. Aguas residuales municipales.** Las aguas residuales producidas del consumo humano se conocen como aguas negras sanitarias. Las aguas residuales de áreas residenciales, se conocen como aguas negras domésticas e incluyen residuos que provienen de cocinas, baños, lavado de ropa y pisos. Éstas junto con los residuos líquidos de los establecimientos comerciales e industriales, se denominan aguas residuales municipales, normalmente se recogen en un sistema de alcantarillado público y en ocasiones son enviadas a plantas de tratamiento para su limpieza y reciclaje sin peligro.

## **Parámetros físicos y químicos del agua.**

**Temperatura.** Influye sobre las tasas de crecimiento biológico, las reacciones químicas, la solubilidad de los contaminantes o de los compuestos requeridos (sólidos, líquidos o gases) y en el desarrollo de la vida (Díaz, 2013).

**Color.** El color del agua se debe a sustancias coloreadas existentes en suspensión o disueltas en ella como materia orgánica procedente de la descomposición de vegetales, así como de diversos productos y metabolitos orgánicos que de habitual manera se encuentran en ella (Díaz, 2013).

**pH.** Este parámetro depende de las especies químicas presentes y las reacciones que se llevan a cabo entre ellas y con el agua. El pH es una de las variables que más influyen en la solubilización de los metales. Debido a que la actividad fotosintética de las algas demanda un consumo grande de **CO<sub>2</sub>**, el uso del carbono a partir del **HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>** y la producción de **OH<sup>-</sup>** hacen que se obtengan intervalos de pH altos en los cuerpos de agua. El desarrollo de un pH alto hace que la actividad bacteriana disminuya y reduzca la producción de **CO<sub>2</sub>** y se limite el proceso simbiótico. El pH influye en la estabilidad de los metales modificando la movilidad, por ejemplo, la solubilidad de **Cd**, **Pb**, **Cu** y **Zn** aumenta al disminuir el pH (Alfaro, 2010).

**Conductividad eléctrica del agua.** Esta propiedad se atribuye a los iones en solución como los cloruros y sulfatos. La corriente eléctrica se transporta a través de las soluciones por el movimiento de los iones y dependerá en este caso de la cantidad de iones disueltos y de la viscosidad del medio en el que se hallan (Rodríguez y Marín, 1999; <http://quimica.laguia2000.com/>).

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).** Es el parámetro más importante en el control de la contaminación del agua, se utiliza como una medida de contaminación orgánica como una base para estimar la cantidad de oxígeno necesario y como indicador del rendimiento de los procesos biológicos (Henry, 1999).

**Dureza total.** Determina la presencia de los iones **Ca** y **Mg**. El contenido de estos elementos en el agua subterránea, en general se debe al contacto de esta agua con depósitos de dolomita, yeso y caliza. El grado de dureza tiene una relación directa con la concentración de sales metálicas presentes en el agua (Alfaro, 2002).

**Suelo.** El suelo es un cuerpo natural que comprende a sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en la superficie de la tierra, ocupa un espacio y se caracteriza por presentar horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o por la habilidad de soportar plantas, también se le considera un recurso natural no renovable a corto plazo (Soil Survey Staff, 2007).

**Calidad del suelo.** La calidad del suelo es utilizada para referirse a la percepción de diferentes cualidades en los suelos para distintos fines, siendo básica su calidad en materia de cultivo. El concepto ha estado ligado con aspectos relacionados con el manejo y la productividad de los suelos agrícolas (Tamayo, 2009). Un suelo con alta concentración de contaminantes será un suelo de mala calidad, ya que supone un riesgo para la salud, para el medio y no resulta productivo para la agricultura (Porta *et al.*, 2003).

**Propiedades físicas y químicas de los suelos.** Las propiedades físicas y químicas del suelo tienen relación con la absorción o disponibilidad de los *MP*, ya sea reteniéndolos por medio de enlaces o complejos órgano-minerales (García y Dorronsoro, 2005). Las características que influyen en la movilización de los *MP* son pH, capacidad de intercambio catiónico, carbonatos, materia orgánica y textura entre otras (Sauve *et al.*, 2000; Sauquillo *et al.*, 2003).

**Color.** Es una de las características morfológicas más notorias del suelo que tiene una amplia relación con sus principales componentes sólidos. Los colores oscuros, en suelos con bajo contenido de materia orgánica, sugieren la presencia de complejos de materia orgánica con óxidos de hierro, de carbón, de óxidos de manganeso o de magnetita. Los rojos indican buen drenaje y aireación, así como intensa meteorización y evolución del suelo. Los grises a blancos muestran contenidos importantes de cuarzo, caolinita u otras arcillas silicatadas, carbonatos de **Ca** o de **Mg**, yeso, sales y óxido ferroso, mal drenaje y bajos contenidos de coloides en el suelo (materia orgánica, arcillas y óxidos de **Fe** y **Al**), característicos de horizontes sometidos a procesos intensos de eluviación. Los moteados, en general, se presentan en suelos con problemas de mal drenaje (Jaramillo, 2002).

**Textura.** Es la propiedad que establece las cantidades relativas en que se encuentran las partículas de diámetro menor a 2 mm en el suelo; las cuales por tamaño se agrupan en tres clases: arena, limo y arcilla (Jaramillo, 2002). La textura tiene relación con la retención de los metales pesados; un suelo arcilloso tendrá mayor retención de metales que un arenoso, aunque el arcilloso dependerá del tipo de arcilla.

La arcilla tiende a adsorber a los *MP* que quedan retenidos en sus posiciones de cambio, por el contrario, los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los *MP*, los cuales pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos (Pineda, 2004; García y Dorronsoro, 2005).

**pH.** Este parámetro tiene gran influencia en algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, por ejemplo, la disponibilidad de los nutrimentos de las plantas está controlada por el pH del suelo (Jaramillo, 2002). El pH también influye en la movilidad de los contaminantes. La concentración de un metal en la disolución del suelo, su biodisponibilidad y la toxicidad potencial está controlada por las reacciones de adsorción y desorción que ocurren en el material coloidal del suelo (Sánchez, 2003). La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto el **As**, **Mo**, **Se** y **Cr** que tienen mayor disponibilidad en pH alcalino (García y Dorronsoro, 2005).

Algunos metales son tóxicos cuando se encuentran en pH muy ácidos como en el caso del **Al**, pero también hay deficiencia de **Ca** y de **K**. En un suelo con abundantes carbonatos, por lo general el pH es mayor de 9.0 y por ello, sus condiciones físicas y químicas son desfavorables. Por lo tanto, la acidez y la basicidad de un suelo afectan a sus propiedades, su comportamiento y el crecimiento de las plantas (Porta *et al.*, 2003).

**Materia Orgánica (MO).** La MO del suelo, llamada también humus, es la fracción orgánica del suelo, excluyendo los residuos vegetales y animales sin descomponer. La MO influye en el oscurecimiento del suelo, facilita su calentamiento, mejora la



germinación de las semillas, el desarrollo radicular, la nutrición de las plantas y la capacidad de intercambio catiónico incrementan su valor. La MO adsorbe tan fuerte a algunos elementos tóxicos como el **Cu**, **Pb** y **Ni** quedando no disponibles, por este motivo, algunas plantas de suelos ricos en MO carecen de **Cu** (Sánchez, 2003; Jaramillo, 2002). Los complejos de MO en el suelo son uno de los procesos que dominan la solubilidad de *MP* al retenerlos. La toxicidad de los *MP* se fortalece en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión. La estabilidad de estos complejos frente a la degradación por los organismos del suelo es una causa importante de la persistencia de la toxicidad. La presencia de abundantes quelatos también puede reducir la concentración de otros iones tóxicos en la solución del suelo (García y Dorronsoro, 2005).

**Conductividad eléctrica (CE).** La CE de los extractos obtenidos de un suelo permite establecer una estimación cuantitativa de las sales que contiene (Calderón, 1999). El aumento de salinidad incrementa la movilización de los *MP* por dos mecanismos: 1) Los cationes asociados con las sales de **Na** y **K** pueden reemplazar a los *MP* en los sitios de adsorción y 2) Los aniones **Cl** pueden formar complejos solubles estables con los *MP* **Cd**, **Zn** y **Hg** con lo cual tienden a dar pH básicos (Sánchez, 2003; García y Dorronsoro, 2005).

**Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).** Es la capacidad que tiene un suelo de adsorber cationes y es equivalente a la carga negativa del suelo. Esta propiedad define la cantidad de sitios disponibles para almacenar los cationes en el suelo. Los cationes sometidos a esta retención, algunas veces quedan protegidos contra los

procesos que tratan de evacuarlos del suelo como la lixiviación, evitando que se pierdan nutrientes para las plantas. Además, como la retención se hace en forma superficial a diferencias de carga electrostática, los cationes adsorbidos pueden ser intercambiados por otros de la solución del suelo, convirtiéndose en cationes intercambiables, necesarios en los procesos de nutrición de las plantas. El valor de la CIC de un suelo es afectado por el pH (Jaramillo, 2002). Cuanto mayor sea la CIC, mayor será la capacidad del suelo para fijar metales. El poder de adsorción de los distintos *MP* depende de su valencia y de su radio iónico hidratado; a mayor tamaño y menor valencia, la retención es más débil (Sánchez, 2003).

**Sedimentos.** Los sedimentos son materiales detríticos que incluyen arena, arcilla, limo y otras partículas sueltas del suelo que se depositan en el fondo de una masa de agua o por la erosión de taludes o intemperismo. Pueden provenir de la erosión del suelo o de la descomposición de plantas y animales. El viento, el agua y el hielo pueden transportar estas partículas hasta los ríos, lagos y arroyos.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) considera que en los ríos, arroyos, lagos y embalses es común encontrar contaminantes en sedimentos.

## ANEXO 2. Cuestionario para rescatar información

### CUESTIONARIO PARA EL MUNICIPIO DE COPÁNDARO

Fecha \_\_\_\_\_ Entrevistador \_\_\_\_\_ N° cuestionario \_\_\_\_\_  
Domicilio \_\_\_\_\_ Zona \_\_\_\_\_ Manzana \_\_\_\_\_  
Jefe de familia \_\_\_\_\_ Originario \_\_\_\_\_  
de \_\_\_\_\_  
Ocupación \_\_\_\_\_ Tiempo de residencia \_\_\_\_\_  
N° total habitantes en casa \_\_\_\_\_ Mujeres \_\_\_\_\_  
Hombres \_\_\_\_\_  
Rango de edad y sexo 0-10 años \_\_\_\_\_ 10-15 años \_\_\_\_\_ 15 \_\_\_\_\_ 25 años \_\_\_\_\_ 25-40 años \_\_\_\_\_  
40-60 años \_\_\_\_\_ Mayores de 60 años \_\_\_\_\_

#### **Abastecimiento de agua:** conectado a la red

\_\_\_\_\_ otro \_\_\_\_\_  
Características del agua  
Sabor \_\_\_\_\_  
Olor \_\_\_\_\_ Color \_\_\_\_\_ suspendidos \_\_\_\_\_ sedimentables \_\_\_\_\_  
Continuamente \_\_\_\_\_ ocasionalmente \_\_\_\_\_ Frecuentemente \_\_\_\_\_ desde cuando? \_\_\_\_\_

#### Manejo interno.

Cisterna \_\_\_\_\_ Volumen \_\_\_\_\_  
Uso constante \_\_\_\_\_ Ocasional \_\_\_\_\_  
Mantenimiento \_\_\_\_\_  
Tinaco \_\_\_\_\_ Volumen \_\_\_\_\_ Hermeticidad \_\_\_\_\_ Mantenimiento \_\_\_\_\_  
Patrón de consumo  
Garrafón \_\_\_\_\_ unidades semanales \_\_\_\_\_

Preparación de alimentos garrafón \_\_\_\_\_ Directo de red \_\_\_\_\_ Tinaco red interna \_\_\_\_\_ otro \_\_\_\_\_

#### **Relación de las enfermedades con el polvo.**

Tipo de enfermedad \_\_\_\_\_

Niños \_\_\_\_\_ Jóvenes \_\_\_\_\_ Adultos \_\_\_\_\_

#### Enfermedades por polvos

¿Qué enfermedades se presentan en tiempos de tolvánas?  
¿Más frecuentes? \_\_\_\_\_  
¿A que se lo atribuyen? \_\_\_\_\_  
¿Como las atienden? \_\_\_\_\_  
¿Quién las presenta con más frecuencia?

### ANEXO 3. Cuestionario para registrar antecedentes médicos en el municipio de Copándaro, Michoacán.

#### Antecedentes médicos

##### Antecedentes familiares

Enfermedades crónicas

Defunciones por cancer (\_\_\_\_) tipo \_\_\_\_\_ relación familiar \_\_\_\_\_

Hipertensión \_\_\_\_\_

Diabetes \_\_\_\_\_

##### Antecedentes individuales de salud

Fuma (\_\_\_\_) Cuentos(\_\_\_\_), con filtro (\_\_\_\_) sin filtro (\_\_\_\_)

Ingesta regular de bebidas alcoholicas \_\_\_\_\_

##### Antecedentes ginecoobstétricos

Nº de embarazos

Nº de partos normales (\_\_\_\_)

Nº de abortos (\_\_\_\_)

Cesáreas (\_\_\_\_)

##### En niños(as):

##### Estado de salud

¿Sufre el niño de : ( 1) Oídos, (2) Nariz, (3) Garganta? \_\_\_\_\_

¿Qué padecimiento ? \_\_\_\_\_ (1)Asma , (2) Rinitis , (3) Amigdalitis , (4) Infección de vías respiratorias .

¿El niño toma alguna medicina ? \_\_\_\_\_ ¿Qué medicina ? \_\_\_\_\_

¿Debido a que se le recetó esta medicina? \_\_\_\_\_

¿El niño cuenta con todas las vacunas? (1) Si (2) No \_\_\_\_\_

¿Cuál le falta? \_\_\_\_\_

##### Aspectos Pedagógicos

¿Cómo es la conducta del niño? \_\_\_\_\_ (1) Normal, (2) Tranquilo, (3) Inquieto, (4) Otros.

¿Cómo es su aprendizaje ? \_\_\_\_\_ (1) Bueno, (2) Regular, (3) Malo.

¿Como es el sueño del niño? \_\_\_\_\_ (1) Duerme tranquilo , (2) Duerme inquieto . (3 ) Padece de insomnio.

¿Cuántas horas duerme ? \_\_\_\_\_ (1) de 8 o más horas, (2) de 6 a 8 horas, (3) menos de 6 horas.

#### ANEXO 4. Concentración de metales pesados en agua potable, aguas residuales, suelos o sedimentos y polvos.

Cuadro 9. Concentración de *MP* en el agua potable del municipio de Copándaro, Michoacán medidas por ICP-MS

Sitio	Metales pesados						
	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe
	-	-	-	mg L <sup>-1</sup>	-	-	-
P1-SR	<ld	0.000	0.006	<ld	0.006	0.018	0.001
P2-SR	<ld	0.000	0.011	<ld	<ld	0.005	0.008
P1-C	<ld	0.001	0.005	<ld	<ld	0.824	0.003
P2-C	<ld	0.000	0.041	<ld	<ld	0.024	<ld
P-SA	0.024	0.002	0.006	<ld	0.001	0.006	<ld

P1-SR y P2-SR: pozos de Santa Rita; P1-C y P2-C: pozos de Copándaro; P-SA: pozo de San Agustín; <ld menor al límite de detección del equipo; - mg L<sup>-1</sup>.

Cuadro 10. Concentración de *MP* de aguas residuales del municipio de Copándaro, Michoacán.

Sitio	Metales pesados							
	As	Cd	Pb	Cu	Fe	Zn	Cr	Ni
	-	-	-	mg L <sup>-1</sup>	-	-	-	-
AN-SR	0.0026	<ld	<ld	0.007	0.973	0.04	<ld	0.003
AN-C1	0.0019	<ld	<ld	0.036	1.95	0.034	<ld	0.026
AN-C2	0.0023	<ld	<ld	0.004	0.643	0.045	<ld	0.003
AN-SA1	0.0046	<ld	<ld	0.018	0.705	0.109	<ld	<ld
AN-SA2	0.0051	<ld	<ld	0.012	2.821	0.311	<ld	0.071

AN-SR: agua residual de Santa Rita; AN-C1 y AN-C2: agua residual de Copándaro; AN-SA1 y AN-SA2: agua residual San Agustín; - mg L<sup>-1</sup>.

Cuadro 11. Concentración de *MP* en suelos del municipio de Copándaro, Michoacán.

Sitio	Metales pesados							
	As	Cd	Pb	Cu	Fe	Zn	Cr	Ni
	-	-	-	mg Kg <sup>-1</sup>	-	-	-	-
P1H1	0.004	<ld	<ld	0.178	2.860	0.800	0.183	0.338
P1H2	0.005	<ld	<ld	0.196	3.400	0.780	0.196	0.304
P2H1	0.003	<ld	<ld	0.162	1.780	0.720	0.050	0.152
P2H2	0.005	<ld	<ld	0.129	1.860	0.620	<ld	0.167
P3H1	0.004	<ld	<ld	0.135	2.860	0.680	0.134	0.267
P3H2	0.004	0.054	<ld	0.120	2.650	0.600	0.081	0.199
P4H1	0.003	<ld	<ld	0.082	1.540	0.560	<ld	0.141
P4H2	0.003	<ld	<ld	0.108	3.020	0.550	0.065	0.158
P5H1	0.005	<ld	<ld	0.183	1.700	1.100	<ld	0.129
P5H2	0.004	<ld	<ld	0.179	1.420	1.370	<ld	0.176
P6H1	0.005	<ld	<ld	0.892	0.180	3.010	<ld	0.156
P6H2	0.009	<ld	<ld	0.232	1.360	0.780	<ld	0.127
P6H3	0.007	0.215	<ld	0.060	1.940	0.410	<ld	0.136
P7H1	0.004	<ld	<ld	0.088	1.040	0.690	<ld	0.149
P7H2	0.005	<ld	<ld	0.367	1.850	2.050	<ld	0.143
P8H1	0.004	<ld	<ld	0.052	1.620	0.880	<ld	0.057
P8H2	0.004	<ld	<ld	0.042	1.390	0.350	<ld	0.038
P9H1	0.005	<ld	<ld	0.252	3.080	1.020	<ld	0.133
P9H2	0.004	<ld	<ld	0.162	0.090	0.720	<ld	0.177
P10	0.004	<ld	<ld	0.060	1.540	0.380	<ld	0.204

<ld: por debajo del límite de detección del equipo; - mg Kg<sup>-1</sup>.

Cuadro 12. Concentración de *MP* en polvos del municipio de Copándaro, Michoacán

Sitio	Metales pesados							
	As	Cd	Pb	Cu	Fe	Zn	Cr	Ni
	-	-	-	mg Kg <sup>-1</sup>	-	-	-	-
POLVOC1	0.0025	<ld	<ld	0.014	0.360	1.460	<ld	0.129
POLVOC2	0.0017	<ld	<ld	0.019	0.120	1.338	<ld	0.101
POLVOC3	0.0011	<ld	<ld	0.018	-0.060	1.350	<ld	0.082
POLVOSA1	0.0032	<ld	<ld	0.163	-0.005	0.910	<ld	0.072
POLVOSA2	0.0039	<ld	<ld	0.163	0.190	0.940	<ld	0.059
POLVOSA3	0.0039	<ld	<ld	0.154	0.780	0.480	<ld	0.056
POLVOSR1	0.0023	<ld	<ld	0.014	0.360	0.510	<ld	0.033
POLVOSR2	0.0023	<ld	<ld	0.016	0.300	0.480	<ld	0.046
POLVOSR3	0.0029	<ld	<ld	0.032	1.170	0.470	<ld	0.056

POLVOC1 y POLVOC2: polvos de Copándaro; POLVOSA1, SA2 y SA3: polvos de San Agustín y POLVOSR1, SR2 y SR3: polvos de Santa Rita; - mg Kg<sup>-1</sup>