



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**MCIAM**  
Maestría en Ciencias  
en Ingeniería Ambiental  
UMSNH

**FACULTAD DE BIOLOGÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“Evaluación de la acumulación de arsénico en especies comestibles del  
lago de Cuitzeo, Michoacán”**

**TESIS**

que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

presenta el

***Ingeniero químico Víctor Manuel Ruiz García***

Directora de Tesis:

***Doctora en ingeniería Ruth Alfaro Cuevas Villanueva***

Codirectora de Tesis:

***Maestra en ciencias biológicas Alejandra Páez Sánchez***

**Morelia, Michoacán, enero de 2014**

---

## RESUMEN

El lago de Cuitzeo se encuentra ubicado al norte del Estado de Michoacán, actualmente es considerado el segundo más grande de la República Mexicana. La contaminación antrópica ha impactado severamente este cuerpo de agua acelerando su eutroficación. Por otra parte, existe contaminación natural que aporta arsénico al lago. El arsénico (As) es un metaloide considerado como tóxico y cancerígeno. La disolución de este metaloide se da entre la roca volcánica del lugar y aguas termales. A su vez, existe en los sedimentos compuestos de arsénico que interactúan con los organismos que habitan en el lago, provocando que acumulen este elemento.

El lago de Cuitzeo es un ecosistema en donde interactúan parámetros físicos y químicos que muestran una relación con los compuestos de arsénico. Este estudio está enfocado en buscar relaciones entre el arsénico presente en el lago con tres especies de peces (*Oreochromis niloticus*, *Oreochromis aureus* y *Chirostoma jordani*). Para esto se realizaron cuatro campañas de muestreo en seis sitios del lago en los cuales se determinó arsénico en las especies de peces mencionadas, parámetros físicos, químicos y componentes mayores en agua y arsénico en sedimentos.

El lago de Cuitzeo es un cuerpo de agua salobre. Tiene riqueza de carbonatos y componentes mayores, que incrementan la alcalinidad y la salinidad respectivamente.

Se observó que la especie química dominante es el arsénico (V) en forma de  $\text{HAsO}_4^-$  en agua en todos los sitios. Las concentraciones de arsénico en agua superan la norma oficial (DOF 2001a y DOF 1996) con lo cual se determinó que el agua es solo apta para riego. El arsénico en los sedimentos se encuentra en la fase no disponible en su mayoría, pero las concentraciones disponibles son suficientes para favorecer la acumulación; el arsénico total en sedimentos supera las concentraciones recomendadas y de efecto probable (CCME) en

---

muchos de los sitios. En los organismos, la concentración de arsénico no supera la norma recomendada por la CCE (2006).

Se calcularon factores de acumulación (bioacumulación y bioconcentración) en los organismos de estudio y se realizó un análisis estadístico multivariado con el objetivo de relacionar las variables de interés mediante un análisis de componentes principales (PCA) y un análisis factorial (AF). Se observó que *Oreochromis niloticus* y *Oreochromis aureus* están relacionadas con la materia orgánica y rica en componentes mayores, mientras que *Chirostoma jordani* tiende a una relación con el arsénico total del sedimento.

**Palabras clave:** Arsénico, acumulación, parámetros físicos y químicos.

---

## ABSTRACT

Cuitzeo Lake is located north of the State of Michoacán, is currently considered the second largest in Mexico. Anthropogenic pollution has severely impacted this water body by accelerating its eutrophication. Moreover, there Natural arsenic contamination that contributes to the lake. Arsenic (As) is a metalloid considered toxic and carcinogenic. The solution of this metalloid is between volcanic rock and hot springs instead. In turn, exists in sediment arsenic compounds that interact with the organisms living in the lake, causing accumulate this element. The Cuitzeo lake is an ecosystem where interacting physical and chemical showing a link with parameters and arsenic compounds. This study is focused on finding relationships between arsenic in the lake three species of fish (*Oreochromis niloticus*, *Oreochromis aureus* and *Chirostoma jordani*). To this effect, four sampling campaigns were conducted at six sites of the lake in which arsenic was determined in fish species mentioned, physical, chemical parameters and major components in water and arsenic in sediments.

Cuitzeo Lake is a body of brackish water. It has rich carbonates and major components that increase alkalinity and salinity, respectively. It was observed that the dominant chemical species is arsenic (V) as water  $\text{HAsO}_4$  everywhere. Arsenic concentrations in water exceed official standard (DOF 2001a and DOF 1996) with which it was determined that the water is suitable for irrigation only. Arsenic in sediments is not available in phase mostly available but concentrations are sufficient to promote the accumulation, the total arsenic in sediments exceeds the recommended and probable effect concentrations (CCME) in many sites. In organisms, arsenic concentration does not exceed that recommended by the CDC (2006) standard. Accumulation factors (bioaccumulation and bioconcentration) in organisms study were calculated and multivariate statistical analysis in order to relate the variables of interest using a principal component analysis (PCA) and factor analysis (FA) was performed. It was observed that *Oreochromis aureus* and *Oreochromis niloticus* are related to the organic matter and rich in major components, while a *Chirostoma jordani* tends to total sediment arsenic.

**Keywords:** Arsenic, accumulation, physical and chemical parameters.

---

A Laura Isabel

---

<b>ÍNDICE</b>	
RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE DE CUADROS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. GENERALIDADES.....	3
2.1. Lagos.....	3
2.2. Contaminación de sistemas lénticos por metales pesados .....	4
2.3. Metales pesados en agua, sedimentos y organismos .....	6
2.3.1. Contaminantes en las redes tróficas .....	9
2.4. Arsénico .....	10
2.5. Lago de Cuitzeo .....	12
2.5.1. Descripción del área de estudio.....	14
2.5.1.1. Geología .....	14
2.5.1.2. Hidrología.....	16
2.5.1.3. Clima .....	16
2.5.1.4. Vegetación.....	17
2.5.1.5. Fauna .....	17
3. ANTECEDENTES .....	19
4. JUSTIFICACIÓN.....	20
5. HIPÓTESIS .....	21
6. OBJETIVOS.....	21
6.1. General.....	21
6.2. Particulares.....	21

---

7. METODOLOGÍA.....	22
7.1. Ubicación del área .....	22
7.2. Selección de los puntos de muestreo .....	22
7.3. Toma de muestras de material biológico .....	23
7.3.1. Manejo de las muestras .....	23
7.3.2. Transporte y almacenamiento .....	23
7.3.3. Secado .....	23
7.4. Toma de muestras de agua.....	24
7.4.1. Parámetros físicos y químicos.....	24
7.5. Toma de muestras de sedimento .....	25
7.6. Procedimiento general para el análisis de material biológico.....	25
7.7. Procedimiento general para el análisis de agua .....	25
7.8. Procedimiento general para análisis de sedimentos.....	26
7.8.1. Extracción secuencial de sedimentos .....	26
7.8.2. Distribución de arsénico en las fracciones geoquímicas.....	29
7.9. Análisis de datos .....	30
7.9.1. Factores de bioconcentración (FBC) y factores de bioacumulación (FBA). .....	30
7.9.1.1 Factores de bioconcentración .....	30
7.9.1.2 Factores de bioacumulación .....	31
7.9.2. Análisis estadístico.....	32
7.9.2.1. Prueba de Mantel.....	32
7.9.2.2. Análisis de componentes principales (PCA).....	32
7.9.2.3. Análisis de factores (FA).....	32
7.9.3. Modelación de las especies químicas.....	33
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	34

---

---

8.1 Concentración de arsénico en organismos.....	34
8.2 Agua.....	39
8.2.1 Arsénico total .....	39
8.2.2 Modelación de la especiación química del arsénico .....	40
8.3 Sedimentos.....	44
8.3.1 Concentración de arsénico .....	44
8.3.2 Distribución de arsénico en fracciones geoquímicas .....	46
8.3.3 Fase disponible (FD) y no disponible (FND).....	50
8.4 Factores de bioconcentración (FBC), bioacumulación (FBA) .....	54
8.5 Análisis estadístico .....	56
8.5.1 Prueba de Mantel.....	56
8.5.2 Análisis de componentes principales (PCA).....	58
8.5.3 Análisis de factores (FA).....	64
CONCLUSIONES.....	69
RECOMENDACIONES .....	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72
ANEXO A: Cuadros de los parámetros obtenidos en organismos, agua y sedimentos. ....	79



---

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo.....	23
<b>Cuadro 2.</b> Método de extracción secuencial propuesto por la oficina de referencias de la comunidad europea (BCR, 1997).....	27
<b>Cuadro 3.</b> Factores de bioconcentración y bioacumulación. ....	55
<b>Cuadro 4.</b> Factores para tipos de acumulación. ....	55
<b>Cuadro 5.</b> Coordenadas, factores de bioconcentración y bioacumulación para los sitios de muestreo. ....	57
<b>Cuadro 6.</b> Resultados de la prueba de Mantel en Tinn-R y R. ....	57
<b>Cuadro 7.</b> Resultados del PCA realizado en Minitab 15, Tinn-R y R. ....	58
<b>Cuadro 8.</b> Resultados del análisis de factores (FA) realizado en Minitab 15.....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización de los puntos de estudio: Irámuco (1), Andocutín (2), Estación Queréndaro (3), La Palma (4), San Agustín del Pulque (5) y Capacho (6). ....	22
<b>Figura 2.</b> Bioconcentración de arsénico.....	30
<b>Figura 3.</b> Bioacumulación de arsénico.....	31
<b>Figura 4.</b> Concentración de arsénico ( $\mu\text{g g-charal}^{-1}$ ) en seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio. ....	35
<b>Figura 5.</b> Concentración de arsénico ( $\mu\text{g g-tilapia}^{-1}$ ) en seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio. ....	35
<b>Figura 6.</b> Concentración de arsénico ( $\mu\text{g g-tilapia}^{-1}$ ) y ( $\mu\text{g g-charal}^{-1}$ ) en seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio. ....	36
<b>Figura 7.</b> Arsénico ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en agua de seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio. ....	40
<b>Figura 8.</b> Diagrama de especiación para el arsénico en función del pH y potencial redox. ..	41
<b>Figura 9.</b> Especies predominantes de arsénico en agua para los seis sitios en la campaña de agosto 2012. ....	42

---

<b>Figura 10.</b> Especies predominantes de arsénico en agua para los seis sitios en la campaña .42	.42
<b>Figura 11.</b> Especies predominantes de arsénico en agua para los seis sitios en la campaña .43	.43
<b>Figura 12.</b> Especies predominantes de arsénico en agua para los seis sitios en la campaña .43	.43
<b>Figura 13.</b> Concentración de arsénico ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en sedimentos de seis sitios del lago de ....45	.45
<b>Figura 14.</b> Distribución de las fracciones geoquímicas F1, F2 y F3 ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en seis sitios 48	48
<b>Figura 15.</b> Distribución de las fracciones geoquímicas ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en seis sitios del lago de..49	.49
<b>Figura 16.</b> Fase disponible (FD) y fase no disponible (FND) en $\text{mg kg}^{-1}$ en seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio. ....51	51
<b>Figura 17.</b> Porcentajes de fase disponible (FD) y fase no disponible (FND) en seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio. ....52	52
<b>Figura 18.</b> Porcentajes de fase disponible (FD) y fase no disponible (FND) en las cuatro ...53	53
<b>Figura 19.</b> Eigenvalues y porcentaje de variación para el análisis de PCA. ....59	59
<b>Figura 20.</b> Doble proyección sitios-variables respecto a los componentes principales. ....60	60
<b>Figura 21.</b> Relación entre las variables respecto de los componentes principales. ....62	62
<b>Figura 22.</b> Relación entre sitios respecto de los componentes principales. ....63	63
<b>Figura 23.</b> Gráfica de sedimentación. ....64	64
<b>Figura 24.</b> Cargas de factores rotados-rotación varimax. ....68	68

## ANEXO A

<b>Cuadro A1.</b> Concentraciones de arsénico en <i>Oreochromis niloticus</i> y <i>Oreochromis aureus</i> (As T) y <i>Chirostoma jordani</i> (As Ch). Las unidades están expresadas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) en los seis sitios de estudio. ....79	79
<b>Cuadro A2.</b> Concentraciones de arsénico en agua (As agua) en $\mu\text{g L}^{-1}$ en los seis sitios de estudio. ....80	80
<b>Cuadro A3.</b> Concentraciones de arsénico en sedimento total (As sed), fracción 1 (As F1), fracción 2 (As F2), fracción 3 (As F3), fracción residual (As FR). Las unidades están expresadas en $\text{mg kg}^{-1}$ para sedimentos y fracciones del sedimento en los seis sitios de estudio. ....81	81
<b>Cuadro A4.</b> Concentración de arsénico en sedimentos de la fase disponible (FD) y fase no disponible (FND) en $\text{mg kg}^{-1}$ para los seis sitios de estudio. ....82	82

---

<b>Cuadro A5.</b> Porcentaje de arsénico en sedimentos de la fase disponible (FD) y fase no disponible (FND) en los seis sitios de estudio. ....	83
<b>Cuadro A6.</b> Parámetros del agua <i>in situ</i> : Salinidad, temperatura (T°C), pH, oxígeno disuelto (O.D.) y conductividad eléctrica (C.E.) en los seis sitios de estudio. ....	84
<b>Cuadro A7.</b> Valores de DQO, DBO <sub>5</sub> , dureza total (Dza total), alcalinidad total (A.T), sólidos totales (S.T.), sólidos suspendidos totales (S.S.T.) y sólidos disueltos totales (S.D.T.) en mg L <sup>-1</sup> en los seis sitios de estudio. ....	85
<b>Cuadro A8.</b> Concentraciones de iones calcio (Ca <sup>2+</sup> ), magnesio (Mg <sup>2+</sup> ), sodio (Na <sup>+</sup> ) en (meq L <sup>-1</sup> ) y sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) y cloruro (Cl <sup>-</sup> ) en mg L <sup>-1</sup> en los seis sitios de estudio. ....	86
<b>Cuadro A9.</b> Concentraciones de iones carbonato (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ), bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), nitrógeno de nitratos (N-NO <sub>3</sub> ) y nitrógeno amoniacal (N-NH <sub>3</sub> ) en mg L <sup>-1</sup> en los seis sitios de estudio. ....	87
<b>Cuadro A10.</b> Valores de pH en sedimento para el muestreo de agosto en los seis sitios de estudio. ....	88
<b>Cuadro A11.</b> Color de las muestras de sedimento. ....	88
<b>Cuadro A12.</b> Distribución de tamaño de partícula y clase textural en sedimentos. ....	89

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La calidad del agua en las corrientes superficiales está determinada por la presencia de condiciones físicas, elementos y compuestos químicos, organismos vivos y por el aprovechamiento a que se encuentran sujetas. Los fenómenos naturales y las actividades humanas se encargan de alterar estas condiciones. Las modificaciones al ciclo hidrológico afectan la introducción y distribución del recurso dentro de una cuenca hidrográfica. De igual forma, la influencia antropogénica como el cambio en el uso de suelo, se encarga de acumular diferentes contaminantes que representan un riesgo para la calidad del agua superficial y subterránea (Herrera, 2007).

Conocer la calidad de los sedimentos es importante para proteger el agua, la vida silvestre y la salud humana. Los sedimentos son un componente integral de los ecosistemas acuáticos, proveen hábitat y alimentos para muchos organismos. También pueden llegar a ser un reservorio para contaminantes y con el tiempo, convertirse en una fuente potencial de éstos para los organismos acuáticos y los humanos consumidores de estos organismos, causando efectos letales y subletales en ellos. La contaminación de los sedimentos puede reducir y eliminar el número de especies comerciales, recreacionales y de importancia ecológica (Ceballos *et al.*, 1994, Pedraza, 2007; Alfaro, 2010). La importancia de analizar la presencia de metales pesados en agua y sedimentos radica en la persistencia y toxicidad que éstos presentan.

El lago de Cuitzeo es el segundo de mayor extensión en México. Actualmente tiene una extensión de 3780 km<sup>2</sup>. Es de gran importancia para la región, ya que contribuye a regular el clima de la cuenca, además de dar sustento y hábitat a diversas especies vegetales y animales (Alfaro *et al.*, 2002).

Del lago, los pescadores extraen tilapia, charales, rana, mosco y especies asociadas como la carpa dorada, la carpa común y la “chagua”; también los agricultores se benefician, ya sea por la recolección de tule o usando las aguas para regar los cultivos de maíz, sorgo, avena y hortalizas (Villalobos, 2010).

---

Estudios recientes (Alfaro *et al.*, 2002; Segovia *et al.*, 2005; Páez, 2008; Alfaro, 2010), indican la presencia de metales pesados y arsénico en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán y en algunos casos con concentraciones que rebasan la normatividad mexicana para agua potable (DOF, 2001).

En este trabajo se determinó la concentración de arsénico en tres especies de peces, agua y sedimentos con la finalidad de comprobar si dicho metaloide está siendo bioacumulado en estos organismos.

---

## 2. GENERALIDADES

### 2.1. Lagos

La abundancia de agua en una cuenca colectora depende de la precipitación ya sea de lluvia y de nieve que cae en la cuenca, el tamaño de la cuenca colectora, la naturaleza de la vegetación y el suelo que rodea el cuerpo de agua. Los suelos forman parte importante en el desplazamiento del agua hacia los causes. Agua que se desplaza sobre una cuenca de roca dura granítica, con cubierta de suelo poco profunda y escasa vegetación, podría incorporarse en minutos u horas a ríos y lagos después de iniciada la precipitación; por otro lado, suelos muy absorbentes o con mucha vegetación pueden acaparar gran cantidad de la precipitación pluvial por períodos cortos, hasta que se saturan y dejan fluir el agua hacia los ríos y lagos (Alfaro, 2010).

El grado de actividad humana en la cuenca afecta la calidad de las aguas superficiales así como de forma natural también lo hacen la lluvia, el tipo de suelo y vegetación. La tonalidad amarillenta en un cuerpo de agua se debe a la riqueza de ácidos húmicos proveniente muchas veces de zonas boscosas ya que son ricos en materia orgánica. Los desagües que cruzan suelos deforestados y erosionados aportan un color turbio a los causes. Nitrógeno, fósforo, materia orgánica, plaguicidas y bacterias que entran en un cuerpo de agua son principalmente aportadas por la actividad agrícola. Los metales en el agua, así como la acidez de la misma son aportes de la minería. La actividad industrial también incrementa los niveles de metales y acidez. El efecto de las descargas de aguas negras disminuye drásticamente la calidad del agua al aumentar la cantidad de materia orgánica (Ceballos *et al.*, 1994).

Los lagos contienen registros exactos de la evolución de una cuenca y proveen excelentes trampas sedimentarias de los depósitos autigénicos (formados dentro del mismo lago) y alogénicos (que provienen de zonas externas al lago). Estos sedimentos autigénicos y alogénicos funcionan como marcadores ambientales pudiendo distinguir eventos climáticos (fases áridas y húmedas), volcánicos (hidrotermalismo, aporte de materiales piroclásticos) y tectónicos, que modifican el patrón biológico, químico e hidrológico de la cuenca y como consecuencia, de la evolución del lago (Ceballos *et al.*, 1994; Pedraza, 2007; Alfaro, 2010).

---

El agua es un recurso natural importante en el planeta Tierra. Los lagos y las reservas de agua superficial son fuentes para el uso doméstico, riego, recursos para la industria por su fácil explotación a diferencia de las aguas subterráneas. Los lagos albergan gran cantidad de ecosistemas por lo que constituyen la diversidad biológica. Tienen beneficios de tipo cultural, estético, económico, turístico y social (Alfaro, 2010).

Los cuerpos de agua superficial pueden llegar a degradarse debido al incremento de sedimentos contaminados; los sedimentos suelen mostrar concentraciones mayores al agua, debido a que son el receptor final de los contaminantes naturales o antrópicos que han sido arrastrados a través de la cuenca (Jian-feng *et al.*, 2008; Harikumar *et al.*, 2009) aunque en ocasiones esto no se cumple.

La región central de México es una de las provincias más interesantes desde el punto de vista hidrológico debido a sus numerosos lagos y volcanes. Esta región se caracteriza por una gran cantidad de cuencas lacustres, muchas de ellas situadas en fosas tectónicas que hacen de esta provincia una región adecuada para el desarrollo de lagos que, en muchos casos, tienden a ser salinos, como el lago de Chapala en Jalisco y el de Cuitzeo en Michoacán.

## **2.2. Contaminación de sistemas lénticos por metales pesados**

Los cuerpos de agua se han contaminado desde que se tiene registro de las civilizaciones antiguas, entonces al pasar el tiempo la contaminación de estos cuerpos ha aumentado debido a que las poblaciones incrementan su tamaño. Se han realizado diversos estudios que evalúan la calidad del agua en cuerpos naturales (Censi *et al.*, 2006; Jian-feng *et al.*, 2008; Ozturk *et al.*, 2009; Jernstrom *et al.*, 2009; Harikumar *et al.*, 2009; Rizzo *et al.*, 2010; Azizur *et al.*, 2012). Muchos de estos se han enfocado en la presencia de metales y metaloides que son elementos persistentes y tóxicos.

Los contaminantes pueden estar presentes en el agua debido a las actividades humanas como descargas de aguas negras, actividades industriales, agrícolas, pecuarias, ganaderas, de construcción y urbanización alterando las características físicas y químicas en los escurrimientos naturales de las redes hídricas. Todas estas redes vierten en lagos, mares y depósitos de agua

---

subterránea. Estos cuerpos de agua acumulan materia y de esta manera pueden perturbar los ecosistemas acuáticos (Moreno, 2003; Wang *et al.*, 2012).

Los mayores impactos a los lagos por contaminación son antropogénicos debido a actividades económicas (Alfaro, 2010; Azizur *et al.*, 2012), pero también estos cuerpos de agua pueden presentar contaminación natural (Páez, 2008; Alfaro, 2010). Estudios preliminares indican la presencia de contaminantes en el lago de Pátzcuaro (Israde, 2000; Moreno, 2003) y en el lago de Cuitzeo (Páez, 2008; Alfaro, 2010; Villalobos *et al.*, 2010).

Los metales pesados son tóxicos potenciales, permanentes, acumulables y producen un riesgo ambiental. Por lo tanto es necesaria la investigación de la transformación y los mecanismos de distribución de metales pesados (Jian-feng *et al.*, 2008; Rizzo *et al.*, 2010; Azizur *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012). Debido a esto es que se han realizado investigaciones para conocer la historia de la contaminación del ecosistema acuático por los sedimentos (Jernstrom *et al.*, 2009; Harikumar *et al.*, 2009; Rizzo *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2012).

Las investigaciones en sistemas acuáticos toman importancia en los sedimentos de sistemas lénticos, ya que permiten monitorear contaminantes en el sistema. Estos sedimentos pueden mostrar la posible fuente de emanación de metales pesados que llegan al fondo de los lagos por diferentes formas (Jian-feng *et al.*, 2008; Harikumar *et al.*, 2009). Del estudio de los sedimentos puede interpretarse la información por contaminación de metales pesados, ya que estos no son degradables y pueden permanecer en los sistemas acuáticos por largos periodos (Harikumar *et al.*, 2009).

Los metales pesados en los sedimentos de lagos pueden aumentar su concentración con el tiempo debido a que cada vez más metales pesados son transportados por los ríos (Jian-feng *et al.*, 2008; Harikumar *et al.*, 2009; Huaranga *et al.*, 2012). Las actividades humanas locales producen descargas, las cuales representan los principales niveles de metales pesados en una distribución del lago de la entidad (Jernstrom *et al.*, 2009); aunque puede suceder que la presencia de metales en el lago se deba a las características propias del lugar, es decir, que el suelo sea volcánico y exista solubilidad entre las rocas del fondo y el agua del lago (Alfaro, 2010).



---

Entonces la concentración de metales en el fondo de los lagos también puede aumentar debido a la solubilidad.

### **2.3. Metales pesados en agua, sedimentos y organismos**

La contaminación por metales pesados se ha convertido en un problema perturbando el funcionamiento normal de ríos y lagos. La distribución de estos metales en un sistema acuático puede existir en las siguientes formas: concentraciones disueltas en el agua, en los sedimentos, en suspensiones y en los organismos vivos. Estas distribuciones pueden variar por características fisicoquímicas como el pH, la cantidad de materia orgánica dispuesta y la demanda de oxígeno (Jian-feng *et al.*, 2008).

Los niveles de contaminantes en los sedimentos pueden llegar a ser un firme criterio para la evaluación de la degradación de los cuerpos de agua.

Algunos residuos peligrosos se depositan en los sedimentos de los cuerpos de agua, incorporándose más tarde al agua mediante procesos físicos o químicos para entonces causar efectos contaminantes severos (Alfaro, 2010; Siriporn *et al.*, 2012). El agua puede ser el medio de transporte de los metales pesados antes de sedimentar y más tarde es posible que se bioacumulen en organismos del sistema acuático (Moreno, 2003).

Los metales son componentes naturales de la tierra y se encuentran en distintos minerales en combinación con otros elementos. En consecuencia, son parte inherente a nuestro ambiente. En los ecosistemas de la geosfera o litosfera: la hidrosfera; la atmósfera y la biosfera existe la presencia de metales. Estos son componentes naturales y se encuentran en los minerales y combinados con otros elementos (Jian-feng *et al.*, 2008; Alfaro, 2010; Rizzo *et al.*, 2010).

Se considera metal pesado, aquél elemento que tiene una densidad igual o superior a 5 g cm<sup>-3</sup> cuando está en forma elemental o cuyo número atómico es superior a 20 (Alfaro, 2010), pero en ciencias ambientales es aquél que se vuelve tóxico al superar los límites permisibles de las normas oficiales.

---

Los metales pueden y no ser esenciales en las funciones biológicas de los organismos, por lo cual los podemos diferenciar como:

1) Oligoelementos o micronutrientes, requeridos a nivel de trazas que se vuelven tóxicos al superar concentraciones límite (As, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni y Zn).

2) Metales pesados sin función biológica conocida, de forma que la presencia en organismos vivos conduce a disfunciones de su sistema biológico. Son altamente tóxicos y tienden a acumularse en los organismos. Los más conocidos son el Cd, Hg y Pb.

Los metales son resistentes a la degradación natural. Por lo tanto pueden afectar las funciones biológicas de los organismos. Para que un metal ejerza un efecto tóxico en un humano o en otro organismo, debe estar expuesto y además entrar en el cuerpo. Son tres rutas principales de absorción: inhalación, ingesta y dérmica (Harikumar *et al.*, 2009; Revenga *et al.*, 2012).

Los elementos traza pueden ser bioacumulados, bioconcentrados o biomagnificados debido a la interacción que existe entre estos con el agua, el aire, sedimentos, suelo y los organismos. El monitoreo de elementos traza provee información sobre los niveles históricos, exposición, lesión, caminos del agente contaminante y tendencias (Censi *et al.*, 2006; Ozturk *et al.*, 2009; Molina *et al.*, 2012).

Los órganos y tejidos finos acumulan preferentemente metales, por ejemplo el hígado (Zn y Cu), riñón (Cd), hueso (Pb), papada (Cu), o músculo (Hg). Esto puede variar en organismos de una misma especie. La carpa acumula el Zn en mayor grado que otros pescados y la perca blanca (Morone americana) acumula el Cu en el hígado. El Cu también se ha detectado en concentraciones de 0.35 al 3.84 mg g<sup>-1</sup>, siendo las más grandes reportadas en robalo blanco (Alfaro, 2010).

Respecto a las concentraciones de los oligoelementos (con énfasis sobre el aluminio, el arsénico, el cobre, el hierro, el plomo y el zinc) se han tomado muestras para determinar la química del agua, sedimento y las muestras bénticas de macroinvertebrados (Censi *et al.*, 2006; Ozturk *et al.*, 2009; Molina *et al.*, 2012).

---

Las concentraciones de metales traza dentro de los sedimentos son afectadas fuertemente por la distribución del tamaño de partícula y tienden a ser asociadas a sedimentos de grano fino (Censi *et al.*, 2006; Ozturk *et al.*, 2009; Rizzo *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2012). La composición de las comunidades bénticas de macroinvertebrados se ha utilizado para supervisar efectos de elementos traza, porque los macroinvertebrados se exponen continuamente al agua y al sedimento en corrientes, estos organismos acumulan los contaminantes en un cierto plazo y esto proporciona una medida de calidad del agua y del sedimento (Ozturk *et al.*, 2009; Harikumar *et al.*, 2009; Alfaro, 2010).

El tipo y los Eh/pH del suelo influyen perceptiblemente la valencia del arsénico. La toxicidad del arsénico depende del estado de oxidación siendo el arsénico (III) el más tóxico. La especiación del arsénico puede determinarse por espectrofotometría (absorción UV, visible, atómica, de emisión, generación de hidruros y horno de grafito) o por métodos electroquímicos. Por el contrario a muchos otros metales pesados que forman radicales orgánicos, el arsénico inorgánico es menos tóxico (Alfaro, 2010).

El estado de oxidación del arsénico en el agua no se conoce con exactitud, pero es probable que sea el pentavalente arsénico (V). En estado natural se libera al medioambiente por erupciones volcánicas o la lixiviación de minerales que lo contienen (como en el caso del lago de Cuitzeo); mientras que antropogénicamente, es liberado por procesos industriales que implican el tratamiento de productos que contienen arsénico o generan un gas tóxico conocido como arsina ( $\text{AsH}_3$ ). También las aportaciones de arsénico al aire y agua potable son significativas. Dependiendo del tipo y tiempo de exposición, han sido detectadas diferentes patologías. La inhalación de arsénico puede asociarse al cáncer de pulmón, mientras que su ingesta se asocia al cáncer de hígado y piel. Se destaca la exposición del arsénico por ingesta debida a los alimentos (Alfaro, 2010; Mateos *et al.*, 2012).

El arsénico tiende a acumularse en un alto grado en especies de planctívoros más que en otros peces y puede ser acumulado más a fondo por los piscívoros, por la presencia de peces planctívoros en algunos sitios y la dinámica de los ecosistemas en estos sitios se puede confundir

---

las tendencias para arsénico. Concentraciones de arsénico en peces de agua dulce (0.5 a 1  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) son niveles naturales relativamente bajos (Alfaro, 2010).

### **2.3.1. Contaminantes en las redes tróficas**

Si existen contaminantes en cuerpos de agua y estos no son degradables, puede presentarse la acumulación en sedimentos y después la bioacumulación que interviene en la transferencia hacia estatus superiores de la red trófica (Molina *et al.*, 2012). Los metales pesados se bioacumulan en tejidos y órganos de especies y pueden manifestar problemas fisiológicos (Villalobos, 2010; Azizur *et al.*, 2012).

Existen metales pesados que no tienen una función biológica conocida y que su presencia en organismos vivos conduce a disfunciones de su sistema biológico como consecuencia de la acumulación que existe en los organismos (Alfaro, 2010).

Los contaminantes acumulados en especies de estatus inferiores pueden seguir acumulándose en estatus superiores de la cadena trófica hasta llegar a especies consideradas de consumo humano (Villalobos, 2010; Alfaro, 2010; Siriporn *et al.*, 2012; Molina *et al.*, 2012).

Los metales pesados por lo general poseen una toxicidad importante para los organismos acuáticos. Si los organismos de un ecosistema acuático son portadores de metales pesados pueden afectar la salud humana (Censi *et al.*, 2006; Ozturk *et al.*, 2009; Siriporn *et al.*, 2012; Stancheva *et al.*, 2013) ya que el hombre consume los recursos que el ecosistema ofrece.

El arsénico proveniente de fuentes naturales y antropogénicas es acumulado por vegetales y animales; posteriormente llega al ser humano a través de los alimentos (Alfaro, 2010; Huaranga *et al.*, 2012). El ser humano es el consumidor final dentro de una cadena trófica, por lo tanto es de importancia saber si organismos que componen niveles previos contienen concentraciones consideradas como dañinas en la ingesta humana.

---

## 2.4. Arsénico

Es un metaloide tóxico, su número atómico es 33. Comparte grupo en la tabla periódica con el nitrógeno, fósforo, antimonio y bismuto. El arsénico ocupa el lugar 52 en abundancia entre los elementos naturales de la corteza terrestre. Cuando se calienta, se sublima, pasando directamente de sólido a gas a 613 °C. Una de las formas más comunes del arsénico es gris, de apariencia metálica y tiene una densidad relativa de 5.7. Existe también una forma amarilla no metálica con una densidad relativa de 2.0. La masa atómica del arsénico es 74.92 (Alfaro, 2010; Mateos *et al.*, 2012). Los compuestos orgánicos de arsénico son menos tóxicos que sus sales minerales. A pesar de que la Norma Oficial Mexicana indica un límite máximo permisible de 0.025 mg L<sup>-1</sup> (DOF, 2001a).

En el pasado, el arsénico y sus derivados fueron populares como agentes de intoxicación intencional, después se sumaron las intoxicaciones accidentales, profesionales y endémicas (Bello y López de Cerain, 2001). Las fuentes del arsénico son:

*Naturales.* En la naturaleza se encuentra libre y combinado con más de 150 minerales como la arsenolita, la cobaltita, el mispíckel, el oropimento, el rejalgar y los arseniuros. En promedio, el contenido de arsénico en la corteza terrestre es de 2 a 5 mg kg<sup>-1</sup>. Sin embargo, su distribución es heterogénea; en los suelos localizados sobre depósitos de sulfuros se ha encontrado en concentraciones hasta de 8000 mg kg<sup>-1</sup>. Este metal se encuentra con frecuencia en aguas naturales a las que llega por la erosión de rocas superficiales y volcánicas. Comúnmente, las aguas superficiales tienen bajos contenidos de arsénico, en cambio, en manantiales calientes dichas concentraciones pueden ser muy altas (Bello y López de Cerain, 2001; Mateos *et al.*, 2012).

*Antropogénicas.* La mayor parte del arsénico que existe en el agua y en el medio ambiente proviene de la actividad humana. Los productos generados por el hombre incluyen el arsénico metálico, el pentóxido y el trióxido, además de los arsenatos de calcio y plomo. Estas sustancias llegan al medio ambiente durante su uso como insecticidas o herbicidas; también se emplean como esterilizantes de suelo, como preservadores de maderas o antiparasitarios en baños para ovejas y cabras (Bello y López de Cerain, 2001; Azizur *et al.*, 2012).

---

El arsénico metálico se usa en aleaciones de cobre y plomo. Debido a su frecuente presencia en los minerales, es común encontrar descargas importantes de arsénico al medio ambiente a partir de los gases de chimeneas y líquidos de descarga industrial provenientes de fundiciones de minerales.

Dadas las diversas fuentes de arsénico, tanto naturales como antropogénicas, es probable que los vegetales y animales lo capten y llegue al hombre a través de los alimentos (Bello y López de Cerain, 2001; Stancheva *et al.*, 2013).

*Absorción.* Cuanto más liposoluble sea un compuesto, más fácil penetrará las distintas membranas biológicas. Algunos compuestos de arsénico como la lewisita y los fenilarsenóxidos que son liposolubles, penetran rápido. Los compuestos inorgánicos de arsénico (no liposolubles) pueden ser absorbidos por inhalación, ingesta y en menor proporción a través de la piel (Bello y López de Cerain, 2001; Mateos *et al.*, 2012).

*Transporte y distribución.* Una vez absorbidos, el arsénico o sus derivados se distribuyen en distintos órganos corporales. El modo de distribución depende del compuesto y del tiempo después de la administración.

En el organismo humano, el arsénico se concentra en los leucocitos y se acumula en el hígado, riñón, pulmón, cabello, dientes, uñas y piel (Bello y López de Cerain, 2001).

*Eliminación.* El arsénico y sus compuestos difieren entre sí en cuanto a las velocidades y las vías de excreción. Los arsenicales pentavalentes se excretan rápidamente por el riñón, lo cual se debe a que interactúan poco con los tejidos. En cambio, los trivalentes son excretados en forma más lenta, ya que se encuentran de manera combinada en los tejidos (Bello y López de Cerain, 2001; Mateos *et al.*, 2012).

---

## 2.5. Lago de Cuitzeo

Hidrológicamente Michoacán es un Estado de gran importancia, se encuentra drenado por varios sistemas fluviales, destacando por su influencia la cuenca Balsas - Tepalcatepec al sur y la cuenca Lerma - Chapala al norte. Dentro de la cuenca Lerma - Chapala se localizan los principales lagos del Estado como son Pátzcuaro, Zirahuén y Cuitzeo. El lago de Cuitzeo es de gran impacto para la región, ya que contribuye a regular el clima de la cuenca, además es sustento y hábitat de diversas especies vegetales y animales. Al lago de Cuitzeo le alimentan tres afluentes permanentes: el río Grande, que es el de mayor caudal en la zona, al cual se unen el río Chiquito de Morelia y el arroyo San Marcos de Chiquimitío; los ríos Queréndaro y Zinapécuaro que dan origen a la presa de Malpais (Ceballos *et al.*, 1994). El primero es receptor de las descargas residuales e industriales de la ciudad de Morelia, los cuales contienen grandes cantidades de materia orgánica y nutrientes, así como microorganismos patógenos que afectan la salud del ser humano.

El lago de Cuitzeo se considera un sistema maduro y en vías de extinción de acuerdo a su evolución natural (Israde-Alcántara, 1999). Sin embargo, tal evolución se ha acelerado debido a las actividades humanas que se llevan a cabo dentro de su cuenca.

Las descargas residuales de la ciudad de Morelia recorren alrededor de 40 km a través del río grande de Morelia, además de recibir las de la zona agrícola de Queréndaro, Álvaro Obregón, Indaparapeo y Zinapécuaro. Sumado a este problema se presenta la deforestación de la cuenca, factor que contribuye al azolve del vaso lacustre.

Las actividades antropogénicas en el lago de Cuitzeo datan de antes de la colonia, con el establecimiento de culturas cuya principal actividad ha sido la pesca y el uso de elementos no pesqueros para la fabricación de artesanías (Ceballos *et al.*, 1994). Se ha identificado que el lago de Cuitzeo se encuentra contaminado de manera primordial por la naturaleza del lago (Alfaro, 2010) y en menor medida por las actividades industriales, agrícolas y recreativas (Alfaro 2002; Villalobos *et al.*, 2010).

---

El lago de Cuitzeo se compone por el vaso oeste y el vaso este. El primero presenta problemas de desecación y recupera temporalmente cierto nivel de agua debido a que existe un desequilibrio entre la evaporación y la precipitación; un proceso acelerado de la degradación y envejecimiento del lago es ocasionado por la sobreexplotación y el deterioro de la cuenca.

La temperatura del agua del vaso este del lago es templada y presenta una circulación constante durante todo el año sin un gradiente térmico vertical. El agua se considera alcalina por las altas concentraciones de carbonatos y bicarbonatos; con relación a su dureza es un agua poco dura y por su contenido de cloruros, es un lago salobre. Al vaso este del lago de Cuitzeo se le considera como un lago tropical polimítico, cálido continuo en estado eutrófico con tendencia a la hipertrofia (Israde-Alcántara, 1999).

El lago de Cuitzeo forma parte de una gran fosa tectónica formada por distensión (Israde-Alcántara 1999) cuyo material de relleno es de tipo granular, lo que produce que parte del agua almacenada se infiltre y sea aprovechada por todas aquellas perforaciones someras que se encuentran en las riberas del lago, infiriéndose también su relación con el campo geotérmico de Los Azufres. Los cambios de la cuenca han provocado el azolve prematuro del lago, lo que ha repercutido en su volumen de almacenamiento. La relación entre el agua del lago y el acuífero en explotación ha quedado de manifiesto durante las temporadas de recarga y más aún, durante los fenómenos de desecación, se observa un considerable abatimiento en el nivel del agua subterránea (Paéz, 2008).

El desequilibrio ha provocado la desecación periódica del lago, situación que se presenta en forma cíclica. Estos factores y la acción del viento manifiestan una baja transparencia e incrementan la turbidez (Alfaro *et al.*, 2002). La poca transparencia no permite la penetración eficiente de la luz aún en la poca profundidad del lago, lo que impide el desarrollo de la diversidad fitoplanctónica que establece condiciones favorables para el incremento monoespecífico y por consecuencia una deficiencia en los procesos de fotosíntesis y productividad primaria. Una característica importante del lago es su alta concentración de sales que provienen de la disolución de la roca, evidenciándose en la alta conductividad eléctrica (entre 900 y 5500  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) que es mayor en comparación con el lago de Zirahuén y Pátzcuaro (Moreno,



---

2003; Ceballos *et al.*, 1994). El arsénico también está presente en altas concentraciones en el lago de Cuitzeo debido a que el relieve de la cuenca está conformado de material volcánico siendo el arsénico un elemento mayoritario.

Comúnmente, las aguas superficiales tienen bajos contenidos de arsénico. En cambio, en vertientes calientes, dichas concentraciones pueden ser altas.

Las rocas que se encuentran en el fondo del lago de Cuitzeo presentan solubilidad y existen sitios termales donde esta solubilidad aumenta debido a las altas temperaturas del agua. Un ejemplo de ello son varios pozos de la cuenca de Cuitzeo donde el agua presenta temperaturas cercanas a los 90°C (Alfaro, 2010).

### **2.5.1. Descripción del área de estudio**

La palabra Cuitzeo, proviene del vocablo "cuiseo" (cuis=tinaja) que significa "lugar de agua" o "junto al agua". En la cuenca de Cuitzeo, se encuentra el segundo lago más grande de México, localizado en el Cinturón Volcánico Mexicano, al noreste del Estado de Michoacán de Ocampo y sureste de Guanajuato (Figura 1), con una superficie de 3977 km<sup>2</sup>. Se ubica entre las coordenadas geográficas 19°53'15" y 20°04'34" Norte 100°50'20" y 101 °19'34" Oeste, a una altitud de 1820 m. Comprende parte de los municipios de Galeana, Santa Ana Maya, Zinapécuaro y Álvaro Obregón en Michoacán y Acámbaro en Guanajuato (Alfaro *et al.*, 2002; Alfaro, 2010).

Esta cuenca tectónica está conformada por colinas, lomeríos altos y planicies, es decir, es una cuenca relativamente plana y con poca amplitud de relieve, la cual se desarrolla sobre materiales volcánicos de composición intermedia a básica que han sido emitidos a partir del Neógeno hasta el Pliocuaternario (Israde-Alcántara, 1999; Alfaro, 2010).

#### **2.5.1.1. Geología**

El lago de Cuitzeo es actualmente (después de Chapala), el más extenso a nivel nacional. En el límite septentrional de la cuenca, al norte de Michoacán, se localiza el lago de Cuitzeo que actualmente ocupa una gran depresión dividida en dos subcuencas de forma asimétrica. El lago

---

está tectónicamente delimitado y constituido principalmente de rocas volcánicas y productos fluviolacustres que tienden a depositarse hacia el lago, el cual presenta en el vaso este un espejo de agua permanente, mientras que en el vaso oeste el desecamiento es más pronunciado (Israde-Alcántara 1999).

La cuenca de Cuitzeo presenta varios tipos de sustratos, los cuales van de acuerdo al relieve de la zona, destacando la planicie fluviolacustre con el área más extensa (585.79 km<sup>2</sup>) con depósitos superficiales y lacustres, la planicie lacustre inundable con un área de 136.39 km<sup>2</sup> y la planicie lacustre inundable con vegetación acuática con un área de 39.17 km<sup>2</sup> contienen depósitos superficiales y cuerpos de agua, la planicie inundable con depósitos de sal presenta un área de 8.71 km<sup>2</sup> con depósitos superficiales, lacustres y de caída (Alfaro, 2010).

La morfología de la región de Cuitzeo presenta altos y fosas tectónicas Este-Oeste y Noreste-Suroeste en las que se han observado espesores de sedimentos lacustres de hasta 1500 m. En la secuencia lacustre y fluviolacustre que aflora en las inmediaciones meridionales del lago de Cuitzeo sobreyace el sustrato volcánico de composición andesítica. Estudios paleoambientales de este lago indican que ha sido un vaso con episodios de marcada desecación (Israde-Alcántara *et al.*, 2002). Presenta una longitud de 20 km aproximadamente y un salto de más de 200 m de bloque alto (Israde-Alcantara, 1999).

La cobertura vegetal y el uso del suelo corresponden de manera predominante a las clases de matorrales, bosque y cultivos. Los suelos registrados en la región son Vertisoles, Luvisoles, Andosoles y Acrisoles, los primeros tres son de textura fina y el último de textura media. Los suelos son importantes en el aporte de los sedimentos. La precipitación incrementa desde el norte hacia el sur, mientras que la temperatura asciende desde el sur hacia el norte. La distribución espacial de estos parámetros indica que el área de estudio se ubica en una zona de transición, entre los climas templado-seco a templado-húmedo. La precipitación y la temperatura tienen un comportamiento estacional (Ceballos *et al.*, 1994).

---

### **2.5.1.2. Hidrología**

La cuenca endorreica de Cuitzeo pertenece a la región hidrológica Lerma-Chapala-Santiago (Páez, 2008). Manantiales termales afloran en la parte suroeste del lago de Cuitzeo; existen temperaturas de 90°C en el agua y desprendimiento de gases (Páez, 2008). Al lago de Cuitzeo le alimentan tres afluentes permanentes: el río Grande, que es el de caudal en la zona, al cual se unen el río Chiquito de Morelia y el arroyo San Marcos de Chiquimitío; el río Queréndaro y el río Zinapécuaro. Se presentan cauces de afluentes cuyas corrientes se definen en época de precipitación pluvial. El lago de Cuitzeo es somero, producto del azolvamiento del vaso del lago y del desequilibrio hidrológico entre la evaporación y la precipitación, lo cual provoca desecación periódica de manera cíclica (Ceballos *et al.*, 1994).

El río Chiquito de la ciudad de Morelia recoge las descargas residuales industriales y domésticas, las cuales se agregan al río Grande de Morelia que desemboca en el lago de Cuitzeo (Ceballos *et al.*, 1994; Villalobos *et al.*, 2010).

El río Queréndaro es el segundo afluente del lago de Cuitzeo, nace en el cerro de la Guajololotera (Sierra de Oztumatlán), pasa por la población de Queréndaro y recoge las aguas de los ríos Frío y Caliente, su caudal se dirige a la presa Malpais para luego pasar al lago de Cuitzeo por la parte sur y cerca de su desembocadura se integran las aguas del río Zinapécuaro. Algunos aportes de agua hacia el lago se presentan a partir de manantiales localizados en las islas Tecuena y Las Palmas, además de aguas termales de la isla Los Puercos, de los poblados Araró, Huandacareo, Copándaro y San Juan Tararameo entre otros (Ceballos *et al.*, 1994). En el año de 1980 el dren "La Cinta" fue cerrado, este dren era el único efluente (Ceballos *et al.*, 1994).

### **2.5.1.3. Clima**

Cuitzeo del Porvenir presenta clima cálido del grupo templado, el más seco de subhúmedos, con lluvias en verano, la precipitación anual es de 300 mm, el porcentaje de lluvia invernal es menor a 5% del total anual, la oscilación térmica es extrema, la temperatura del mes más caliente se presenta en verano (Alfaro, 2010).

---

#### 2.5.1.4. Vegetación

Flora característica: *Huizache*, *cazahuate*, *mezquite*, *pirul*. Vegetación halófila: *Checame*, y *romerito*. Vegetación acuática: *Ceratophyllum demersum*, *Lemna gibba*, *polygonum sp.*, *Potamogeton illinoensis*, *P. pectinatus*, *Sagittaria latifolia* y *S. macrophylla*, *Oxycaryum cubense*, *Typha angustifolia*, *T. domíngensis* y el lirio acuático (CONABIO, 2002).

Actualmente la vegetación predominante han sido los matorrales. La vegetación que caracteriza a la cuenca es *matorral xerófilo*, especialmente de asociaciones de *huizache-mezquite*. Los matorrales y los cultivos de temporal se encuentran en lomeríos, lugares pedregosos y con suelos poco profundos, lo que se traduce en arduas labores de labranza y bajos rendimientos de las cosechas (principalmente maíz y frijol).

Campañas de reforestación por parte del gobierno estatal han reducido la erosión. La alta salinidad que presentan las aguas de los vasos oeste y central es una limitante para el establecimiento de plantas acuáticas típicas de agua dulce; sin embargo, la desembocadura de afluentes, la ribera sur, así como extensas áreas del vaso, son habitadas por varias especies de plantas acuáticas (CONABIO, 2002).

#### 2.5.1.5. Fauna

La fauna de la región está representada por las siguientes especies:

Crustáceos: *Cambarellus montezumae*.

Peces: *Algansea tincella*, *Allophorus robustus*, *Hubbsina turneri*, *Xenotoca variata*, *Oreochromis niloticus* y *O. aureus*.

Aves: *Vencejo frente blanca*.

Mamíferos: *Zorrillo*, *tlacuache*, *comadreja*, *tejón*, *ardilla de tierra*, *conejo* y *zorra gris*.

Peces endémicos: *Algansea lacustris*, *C. jordaní*, *Goodea atripinnis*, *Poecilopsis infans*.

Aves endémicas: *Geothlypis speciosa* (CONABIO, 2002).

La población característica de la cuenca de Cuitzeo presenta una variedad de organismos que se relacionan de manera directa o indirecta con el efecto de los contaminantes debido al medio en el cual habitan.

---

Las especies amenazadas por causa de la contaminación, desecación de los cuerpos de agua y por la extracción de acuíferos son los peces *Hubbsina turneri*, *Lampetra spadicea*, *Skiffia bilineata*, *S. Lermae*. Anfibios como la rana. Las aves *Anas acuta*, *Accipiter striatus*, *Geothlypis speciosa*, *Ixobrychus exilis* y *Vireo Nelson* (CONABIO, 2002).

---

### 3. ANTECEDENTES

Estudios en diversos lagos muestran la distribución de metales pesados en el agua al igual que en los sedimentos. Jernstrom (2009) la determinó mediante espectrofotometría usando un espectrofotómetro de absorción atómica, mismo método que usaron Uaboi (2010) e Inengite (2010) en sus investigaciones para lagos en África. Para el caso del arsénico en el lago Avsar Dam de Turquía, se encuentran concentraciones considerables en sedimentos y peces (músculo, intestinos, branquias y corazón) y no en agua (Ozturk *et al.*, 2009); por otra parte, las concentraciones de este metaloide determinadas en lagos de diversas partes del planeta favorecen la acumulación en especies debido a la eutroficación (Azizur *et al.*, 2012).

La acumulación depende de los parámetros físicos y químicos (Inengite, 2010) y puede incrementar su concentración con el tiempo tanto en agua, sedimentos y organismos (Harikumar, 2009). Los procesos de biomagnificación pueden incrementar o decrecer a lo largo de la cadena trófica, esto como resultado de la dilución del arsénico tal como sucedió en el lago Poopó en Bolivia. La variación temporal, las actividad antropogénica y la transferencia metálica en la cadena trófica influyen en los patrones de acumulación en los peces (Molina *et al.*, 2012).

Los metales pesados y el arsénico se determinaron en agua subterránea del estado de Michoacán (Páez, 2008). El arsénico se encuentra presente en concentraciones superiores a la normatividad mexicana en agua (DOF 2001a) y a las recomendaciones en sedimentos (CCME, 2002). La contaminación en el lago de Cuitzeo es por fuente natural debido al suelo volcánico (Israde-Alcántara 1999). Los últimos estudios muestran que existe movilidad, disponibilidad y toxicidad del arsénico en el lago (Alfaro, 2010). No existen referencias sobre concentraciones de arsénico en organismos de este lago, por lo tanto se desconoce si existe acumulación en las especies de peces comerciales.

---

#### **4. JUSTIFICACIÓN**

La economía de las poblaciones de la cuenca de Cuitzeo depende de este lago, los pescadores del lugar extraen charal, tilapia, carpa, rana, mosco y tule, siendo la tilapia y el charal los de mayor valor comercial. De esta manera, la contaminación por arsénico puede afectar la salud tanto de pescadores como de consumidores; los agricultores de las zonas aledañas al lago aprovechan su agua para regar cultivos de maíz, sorgo, avena, trigo y hortalizas (Ceballos *et al.*, 1994; Alfaro *et al.*, 2002).

Se ha observado en estudios previos la presencia de arsénico en agua y sedimentos del lago y es importante investigar si las especies comestibles lo acumulan.

---

## 5. HIPÓTESIS

El arsénico presente en el lago de Cuitzeo es bioacumulado en las especies de peces comestibles.

## 6. OBJETIVOS

### 6.1. General

Evaluar los niveles de arsénico en la tilapia (*Oreochromis niloticus* y *Oreochromis aureus*) y el charal (*Chirostoma jordani*), que son especies representativas y de interés comercial en el lago de Cuitzeo.

### 6.2. Particulares

- Determinar el contenido de arsénico en las especies de peces (*Oreochromis niloticus*, *Oreochromis aureus* y *Chirostoma jordani*).
- Calcular los factores de bioacumulación y bioconcentración de arsénico propuestos por la EPA.
- Explorar las relaciones entre los factores de acumulación de arsénico.
- Determinar si existen relaciones entre las concentraciones de arsénico encontradas en *Oreochromis niloticus*, *Oreochromis aureus* y *Chirostoma jordani*, en sedimentos, en agua y en los parámetros físicos y químicos.



---

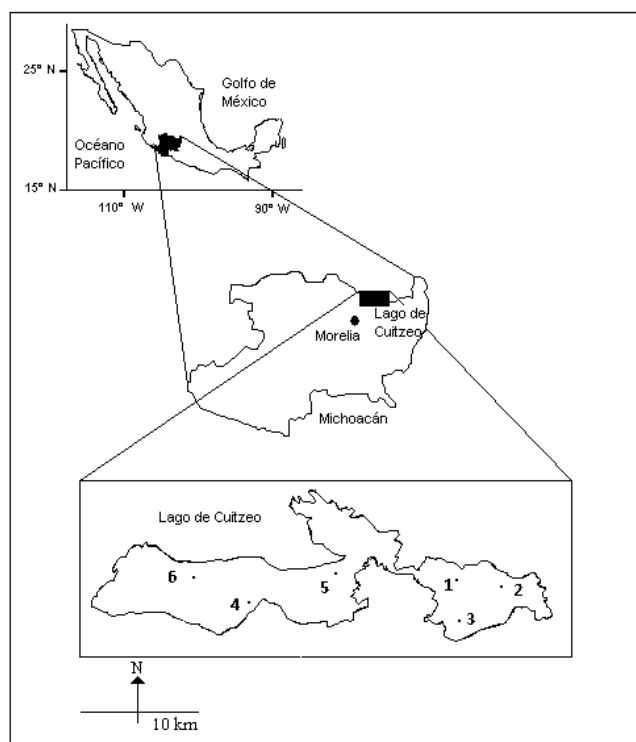
## 7. METODOLOGÍA

### 7.1. Ubicación del área

El lago de Cuitzeo se ubica en el norte del Estado de Michoacán y forma parte del Cinturón Volcánico Mexicano. Tiene una superficie aproximada de 4000 km<sup>2</sup> lo que lo posiciona como el segundo lago más grande en el país, después de Chapala. Su cuenca es relativamente plana con un relieve moderado (INEGI, 2011).

### 7.2. Selección de los puntos de muestreo

Se seleccionaron seis puntos de muestreo, que cubren ambos vasos del lago de Cuitzeo y con base en información reciente sobre contaminación del lago por arsénico. Para determinar la ubicación exacta de cada sitio se utilizó un geoposicionador (GPS). La ubicación de la zona de estudio y la de los puntos de muestreo se aprecian en la Figura 1 y en el Cuadro 1.



**Figura 1.** Localización de los puntos de estudio: Irámuco (1), Andocutín (2), Estación Queréndaro (3), La Palma (4), San Agustín del Pulque (5) y Capacho (6).

---

**Cuadro 1.** Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo.

No.	Nombre	Clave	Ubicación
1	Irámuco	IRA	19°57'25.9"Norte - 100°55'27.1"Oeste
2	Andocutín	AND	19°56'46"Norte - 100°51'50.6"Oeste
3	Estación Queréndaro	EQ	19°53'15.5"Norte - 100°56'38.2"Oeste
4	La Palma	LP	19°55'23.9"Norte - 101°08'20.6"Oeste
5	San Agustín del Pulque	SAP	19°57'29.6"Norte - 101°04'29.6"Oeste
6	Capacho	CAP	19°57'44.1"Norte - 101°11'44"Oeste

### **7.3. Toma de muestras de material biológico**

Se realizaron cuatro campañas de muestreo en el lago de Cuitzeo en los meses de agosto y diciembre del 2012, y marzo y junio del 2013. Las muestras de especies comestibles fueron tilapia (*Oreochromis niloticus* y *Oreochromis aureus*) y charal (*Chirostoma jordani*), las cuales se obtuvieron mediante el uso del chinchorro como arte de pesca para la recolección de las especies en los sitios seleccionados. Para el caso de la tilapia, se obtuvieron en cada campaña muestras de filete sin piel y en el caso de los charales, se obtuvieron muestras por sitio de organismos completos (Trasande *et al.*, 2010). Las porciones cumplieron con la cantidad necesaria para los análisis de las muestras biológicas.

#### **7.3.1. Manejo de las muestras**

Se utilizaron bolsas de plástico para almacenar muestras de material biológico. Las condiciones para el manejo de muestras biológicas es de gran importancia ya que éste no debe promover la alteración de los parámetros de interés.

#### **7.3.2. Transporte y almacenamiento**

Las muestras se mantuvieron a 4°C en un contenedor en el campo y en laboratorio ya que su transporte y almacenamiento adecuados son necesarios para mantener la calidad estructural y química del material biológico.

#### **7.3.3. Secado**

El secado de los organismos fue en horno a 60°C hasta obtener peso constante. Este tipo de secado se recomienda para muestras en las que se desea determinar componentes inorgánicos, en especial elementos traza (EPA, 2001).

---

#### **7.4. Toma de muestras de agua**

Se realizaron cuatro campañas de muestreo en el lago de Cuitzeo en los meses de agosto y diciembre del 2012 y marzo y junio del 2013, con la finalidad de cubrir tanto la temporada de estiaje como la de precipitación pluvial. La toma, transporte y conservación de cada muestra de agua se realizó considerando los criterios establecidos para cada parámetro tanto de la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1980a) como del manual APHA-AWWA-WPCF (1998) y métodos de la EPA (2001). Las muestras se obtuvieron a una profundidad media con ayuda de un muestreador horizontal de Van Dorn (EPA, 2001).

Con la finalidad de establecer una modelación de la especiación química del arsénico se determinaron parámetros fisicoquímicos y arsénico en agua en los sitios de estudio.

Para la determinación de arsénico las muestras se colocaron en recipientes de polietileno de 125 mL previamente descontaminados con HNO<sub>3</sub>. Cada frasco con su tapa y contratapa fueron introducidos en una solución de HNO<sub>3</sub> al 10% durante una semana. Después se cambiaron a una solución con HNO<sub>3</sub> al 1% por una semana. En el lugar de muestreo se vació una botella y se volvió a llenar con agua desionizada, esto como control para eliminar posibles interferencias por contaminación ambiental. Otra botella se vació y se llenó con la muestra. Para cada muestra se preparó un blanco con agua desionizada para eliminar posibles interferencias por contaminación ambiental. Las muestras y los blancos se preservaron con HNO<sub>3</sub> ultrapuro para evitar interferencias (Alfaro *et al.*, 2002; Páez, 2008).

##### **7.4.1. Parámetros físicos y químicos**

Las muestras se almacenaron en botellas de polietileno de 1L, llenándose para reducir la presencia de aire y evitar cambios químicos. La temperatura, salinidad, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto y sólidos totales se determinaron *in situ* (APHA-AWWA-WPCF, 1998).

---

### **7.5. Toma de muestras de sedimento**

Simultáneamente a las colectas de agua, se colectaron los primeros 8 cm de profundidad de sedimento para obtener parámetros o propiedades de interés por deposición de material reciente (EPA, 2001). En las muestras de sedimento se determinó arsénico total y la especiación del arsénico mediante una extracción secuencial.

### **7.6. Procedimiento general para el análisis de material biológico**

El análisis de arsénico en el material biológico se llevó a cabo de acuerdo con la técnica descrita en la normatividad mexicana vigente (DOF, 1994 y DOF, 1995). Para la muestra de *Oreochromis* se determinó indistintamente del género al que pertenece (*niloticus* o *aureus*).

El análisis de arsénico se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica con generación de hidruros (DOF, 2001c).

### **7.7. Procedimiento general para el análisis de agua**

En este trabajo se determinaron los parámetros fisicoquímicos tanto *in situ* como en laboratorio los cuales fueron de utilidad en la construcción del modelo de especiación química del arsénico en agua, que permitió establecer su disponibilidad química para determinar la relación entre la presencia de este elemento en agua y peces.

Las técnicas de análisis se basaron en la Norma Mexicana (DOF, 1981; DOF, 2001, 2001a, 2001b, 2001d, 2001e,) y en el manual APHA-AWWA-WPCF (1995). La temperatura, conductividad eléctrica, OD y pH *in situ* se determinaron de acuerdo con las técnicas registradas en el manual APHA-AWWA-WPCF (1998).

Los parámetros analizados en el laboratorio fueron: dureza total, alcalinidad total, calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, DBO y DQO y se determinaron mediante las técnicas analíticas de potenciometría, volumetría y espectrometría de absorción atómica. El análisis de arsénico se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica con generación de hidruros (DOF, 2001c).

---

## **7.8. Procedimiento general para análisis de sedimentos**

El análisis de parámetros físicos y arsénico en los sedimentos se realizó de acuerdo con los métodos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2001) y la Norma Oficial Mexicana para análisis de suelos (DOF, 2000) ya que no existen especificaciones para análisis de sedimentos en la normatividad mexicana.

El análisis de arsénico se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica con generación de hidruros (DOF, 2001c).

### **7.8.1. Extracción secuencial de sedimentos**

La distribución de metales se encuentra en dos fases geoquímicas: la fase disponible y la fase no disponible determinadas por la extracción secuencial de tres pasos de la oficina de referencias de la comunidad europea (BCR, 1997). El método se sintetiza en el Cuadro 2.

El secado previo de las muestras se realizó en horno a 60°C, se molieron en mortero de porcelana.

**Cuadro 2.** Método de extracción secuencial propuesto por la oficina de referencias de la comunidad europea (BCR, 1997).

Fracción	Definición de la operación	Condiciones y reactivos químicos
1	Ácido extraíble	1 g de sedimento, 40 mL 0.11 M ácido acético, agitar por 16 h a 22±5°C. Separar el extracto del residuo sólido por centrifugación a 3000 rpm por 20 min.
2	Reducible	Al residuo de la fracción 1 agregar 40 mL 0.5 NH <sub>2</sub> OHCl de una solución de 1 L que contiene 25 ml 2 M de HNO <sub>3</sub> (pH=1.5), agitar por 16 h a 22±5°C. Centrifugar extracto como en el paso 1.
3	Oxidable	Al residuo de la fracción 2 agregar 10 mL de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (pH=2-3) durante 1 h a temperatura ambiente, calentar a 85±2°C por 1 h; volver a agregar 10 mL de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y calentar a 85±2°C por 1 h; agregar 50 mL 1M NH <sub>4</sub> OAc (pH=2) y agitar por 16 h a 22±5°C. Centrifugar extracto como en el paso 1.
4	Residual	Al residuo de la fracción 3 agregar 3 mL H <sub>2</sub> O destilada, 7.5 mL 6 M HCl y 2.5 mL 14 M HNO <sub>3</sub> ; dejar una noche a 20°C, calentar bajo reflujo por 2 h, enfriar y filtrar.

Nota: La fracción 4 difiere ligeramente del agua regia sugerida en la digestión ácida que incluye 7 mL 12 M HCl y 2.3 mL 15.8 M HNO<sub>3</sub>.

---

**Fracción uno (F1):** Un volumen de 40 mL de ácido acético (0.11 M) se añadió a 1 g de sedimento en un tubo de 100 mL y se agitó durante 16 h a  $22\pm 5^{\circ}\text{C}$ . El extracto se separó del residuo sólido por centrifugación (3000 rpm), y se decantó en un recipiente de polietileno y se almacenaron a  $4^{\circ}\text{C}$  para su análisis. El residuo se lavó con 20 mL de agua destilada agitando durante 15 min y se centrifugaron por 20 min. El sobrenadante se desechó.

**Fracción dos (F2):** Al residuo de la fracción uno se le agrega un volumen de 40 mL de hidroxilamoniocloruro 0.5 M de pH 1.5 ajustado con ácido nítrico. La muestra se agitó durante 16 h a  $22\pm 5^{\circ}\text{C}$ . El extracto se separó del residuo sólido por centrifugación (3000 rpm), y se decantó en un recipiente de polietileno y se almacenaron a  $4^{\circ}\text{C}$  para su análisis. El residuo se lavó con 20 mL de agua destilada agitando durante 15 min y se centrifugaron por 20 min. El sobrenadante se desechó.

**Fracción tres (F3):** un volumen de 10 mL de peróxido de hidrógeno 8.8 M se añadió en pequeñas alícuotas al residuo del paso dos. El tubo se cubrió con un vidrio de reloj y el contenido se digirió a temperatura ambiente durante 1 h con agitación ocasional. La digestión se continuó, calentando el tubo a  $85\pm 2^{\circ}\text{C}$  en un baño de agua durante 1 h. El vidrio de reloj se retiró y el contenido del tubo se evaporó hasta un volumen de 3 mL. Una segunda alícuota de 30 mL de peróxido de hidrógeno se añadió y se repitió el procedimiento de digestión evaporando hasta 1 mL; no secar completamente. Se agregaron 50 mL 1 M de acetato de amonio con pH de 2 ajustado con ácido nítrico. La muestra se agitó durante 16 h a  $22\pm 5^{\circ}\text{C}$ . El extracto se separó del residuo sólido por centrifugación a 3000 rpm, se decantó en un recipiente de polietileno y se almacenaron a  $4^{\circ}\text{C}$  para su análisis. El residuo se lavó con 20 mL de agua destilada, se agitó 15 min y se centrifugó por 20 min. El sobrenadante se desechó.

**Fracción cuatro (F4):** El residuo sólido de la fracción tres se retuvo para la digestión con agua regia.

---

### **7.8.2. Distribución de arsénico en las fracciones geoquímicas**

La extracción secuencial obtiene concentraciones de arsénico en cada fracción. Las fracciones de los sedimentos pueden indicar el origen del arsénico. Las fracciones intercambiables (F1) y reducible (F2) indican contaminación de origen antrópico. La fracción 1 (F1) corresponde a las concentraciones de arsénico adsorbidas débilmente y solubles en ácido que son en particular los retenidos en la superficie del sedimento con una interacción electrostática débil. Las variaciones de composición iónica del agua tienen una gran influencia en el proceso de adsorción-desorción de los sedimentos.

En la fracción 2 (F2) se extrajo arsénico ligado a carbonatos y a óxidos de Fe y Mn los cuales pueden estar en el sedimento como aglomerados entre las partículas o recubriéndolas.

Para la fracción 3 (F3) se extraen los metales asociados a materia orgánica y a sulfatos. Diferentes formas de materia orgánica puede favorecer los procesos de absorción, formación de compuestos y la bioacumulación. El arsénico aquí contenido puede liberarse mediante la oxidación de esta fase.

Existe una fase inerte llamada fracción residual (F4) ó (FR). En su estructura cristalina pueden existir metales traza adheridos a los minerales primarios y secundarios que provienen del sustrato geológico natural. Los metales de esta fracción son químicamente estables y biológicamente inactivos.



---

## 7.9. Análisis de datos

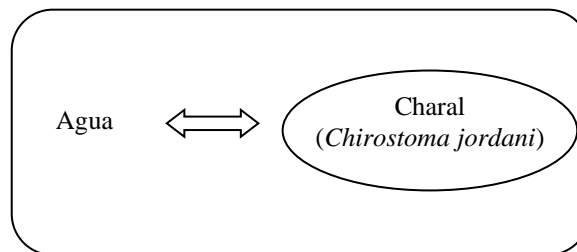
### 7.9.1. Factores de bioconcentración (FBC) y factores de bioacumulación (FBA).

El cálculo de los FBC y FBA se realizó mediante el uso de las fórmulas dadas por la USEPA (2003).

#### 7.9.1.1 Factores de bioconcentración

El factor de bioconcentración (FBC) es la relación entre la concentración de arsénico en el organismo ( $C_0$ ) y la concentración de arsénico en el agua ( $C_w$ ) como se muestra en la Figura 2. El FBC se calculó para *Chirostoma jordani*.

$$FBC = \frac{C_0}{C_w}$$



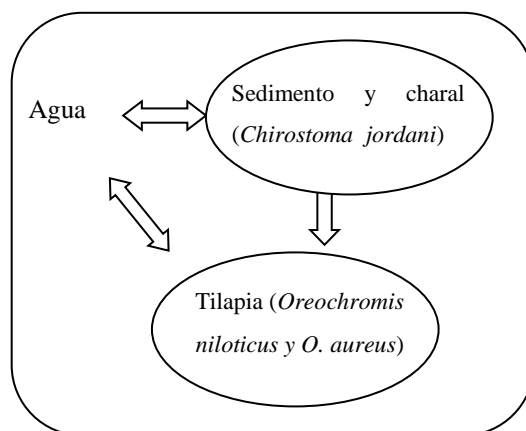
**Figura 2.** Bioconcentración de arsénico.

---

### 7.9.1.2 Factores de bioacumulación

El factor de bioacumulación (FBA) es la relación entre la concentración de arsénico en el organismo ( $C_o$ ) y la concentración de arsénico en el agua ( $C_w$ ). La diferencia con la bioconcentración es que en la bioacumulación pueden interferir otros factores. El FBA se calculó en *Oreochromis niloticus* y *Oreochromis aureus* como se muestra en la Figura 3.

$$FBA = \frac{C_o}{C_w}$$



**Figura 3.** Bioacumulación de arsénico.

---

## **7.9.2. Análisis estadístico**

Mediante el uso de los programas R, Tinn-R y Minitab se realizó la prueba de Mantel, el análisis de componentes principales (PCA) y el análisis de factores (AF).

### **7.9.2.1. Prueba de Mantel**

La prueba de Mantel es una prueba estadística y muestra si existe relación entre los factores de bioconcentración y bioacumulación de arsénico respecto de la ubicación geográfica del conjunto de sitios. Con la prueba se interpreta si los puntos son representativos y si la acumulación de arsénico en las especies predomina en alguna zona del lago.

### **7.9.2.2. Análisis de componentes principales (PCA)**

Este análisis estadístico es un método multivariado. El PCA explora las relaciones entre una gama de variables que interactúan entre sí. Se basa en una interpretación gráfica mediante vectores y ejes. Los ejes son componentes que expresan la variabilidad del sistema y se crean a partir de las variables originales. Cada vector representa una variable de estudio.

El PCA determinó si existen relaciones entre las concentraciones de arsénico encontradas en *Oreochromis niloticus*, *Oreochromis aureus* y *Chirostoma jordani*, en sedimentos, en agua y en los parámetros físicos y químicos.

### **7.9.2.3. Análisis de factores (FA)**

Al igual que el PCA el FA es un método estadístico multivariado. Crea paquetes relacionando las variables originales. Los componentes creados en el PCA y que explican un porcentaje de la variabilidad del sistema son los mismos factores creados en el AF y explican el mismo porcentaje de la variación. Cuando el 80% de la variación de los datos de un sistema está distribuido en más de tres componentes en el PCA, es necesario continuar con un análisis de factores.

El FA es un complemento en la búsqueda de relaciones entre las concentraciones de arsénico encontradas en *Oreochromis niloticus*, *Oreochromis aureus* y *Chirostoma jordani*, en sedimentos, en agua y en los parámetros físicos y químicos.

---

### **7.9.3. Modelación de las especies químicas**

En relación a las concentraciones de arsénico encontradas en agua, se realizó una especiación mediante la construcción de diagramas de equilibrio relacionando todos los parámetros fisicoquímicos con la concentración de arsénico predominante.

Las especies químicas de arsénico en el lago se pueden conocer, esto no significa que ya no ocurran cambios en la especiación, solo indica que el sistema está en equilibrio químico y que se puede modificar si cambian las condiciones, es decir, se pueden alterar las reacciones directas y reversibles. El equilibrio se alcanza cuando los reactivos se transforman en productos con la misma velocidad que los productos vuelven a transformarse en reactivos (Alfaro, 2010).

Los diagramas de equilibrio del arsénico se determinaron por medio del programa Visual Minteq con las constantes de estabilidad que definen las especies formadas a diferentes valores de pH o potencial redox.

---

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1 Concentración de arsénico en organismos

Las concentración máxima de este metaloide en la tilapia (*Oreochromis niloticus* y *Oreochromis aureus*) fue de  $2.09 \mu\text{g g}^{-1}$  mientras que en el charal fue  $1.17 \mu\text{g g}^{-1}$  (*Chirostoma jordani*).

No existe una tendencia clara en las concentraciones más altas de alguna especie respecto de la otra (Figuras 4 a 6). Aunque por sus hábitos alimenticios se sabe que existe una relación entre los sedimentos y la tilapia, así como una interacción del charal con la columna de agua. Los hábitos alimenticios del género *Chirostoma* no dependen del espacio ni del tiempo, pero sí de la talla (Vital, 2011).

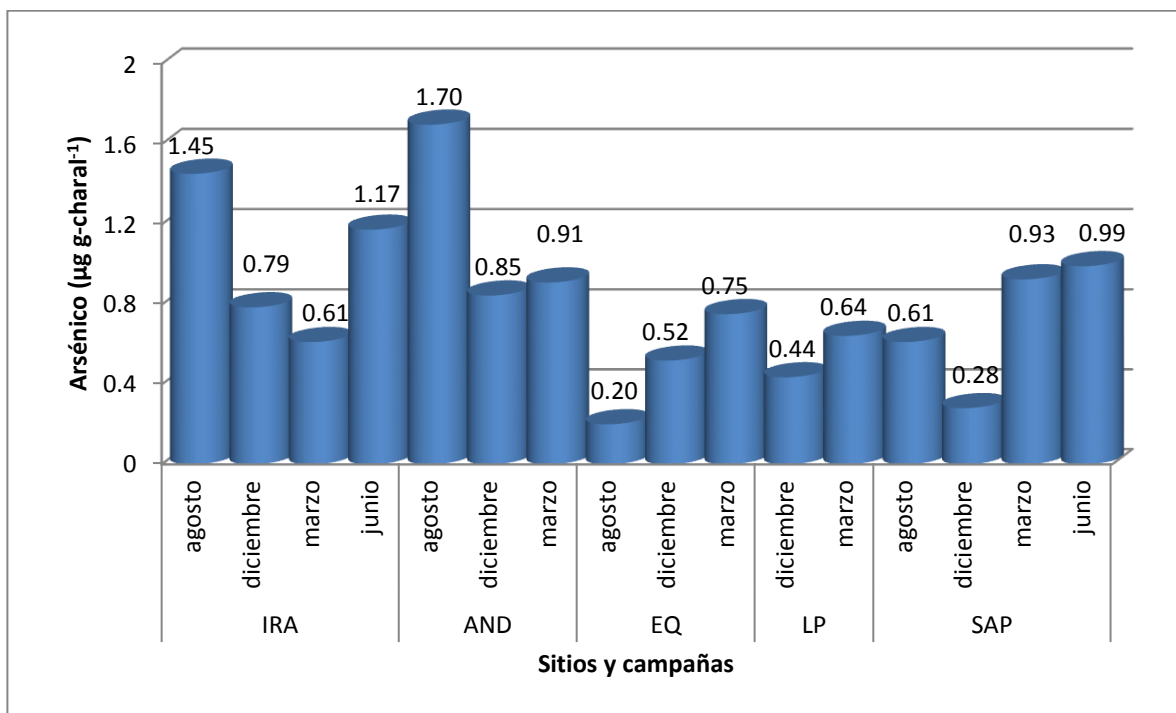
No existe una normatividad para la cantidad de arsénico total en peces. Alfaro (2010) recomienda como niveles naturales  $0.5$  a  $1.0 \mu\text{g g}^{-1}$ , mientras que Siriporn (2012) indica valores inferiores a  $0.5 \mu\text{g g}^{-1}$  y Molina (2012) concentraciones menores a  $2.5 \mu\text{g g}^{-1}$ .

La normatividad en Australia tiene como límite máximo permisible concentraciones de arsénico en peces de  $1.0 \mu\text{g g}^{-1}$ . El arsénico en charales del lago de Cuitzeo superan en algunos sitios  $1.0 \mu\text{g g}^{-1}$ , mientras que ningún sitio presenta concentraciones mayores a  $2.5 \mu\text{g g}^{-1}$  como lo recomienda la CCE (2006). Las concentraciones de arsénico en charal rebasan  $1.0 \mu\text{g g}^{-1}$  en IRA para los meses de agosto y diciembre, y AND en agosto. También existen concentraciones cercanas a  $1.0 \mu\text{g g}^{-1}$  como lo son AND en marzo y SAP en marzo y junio.

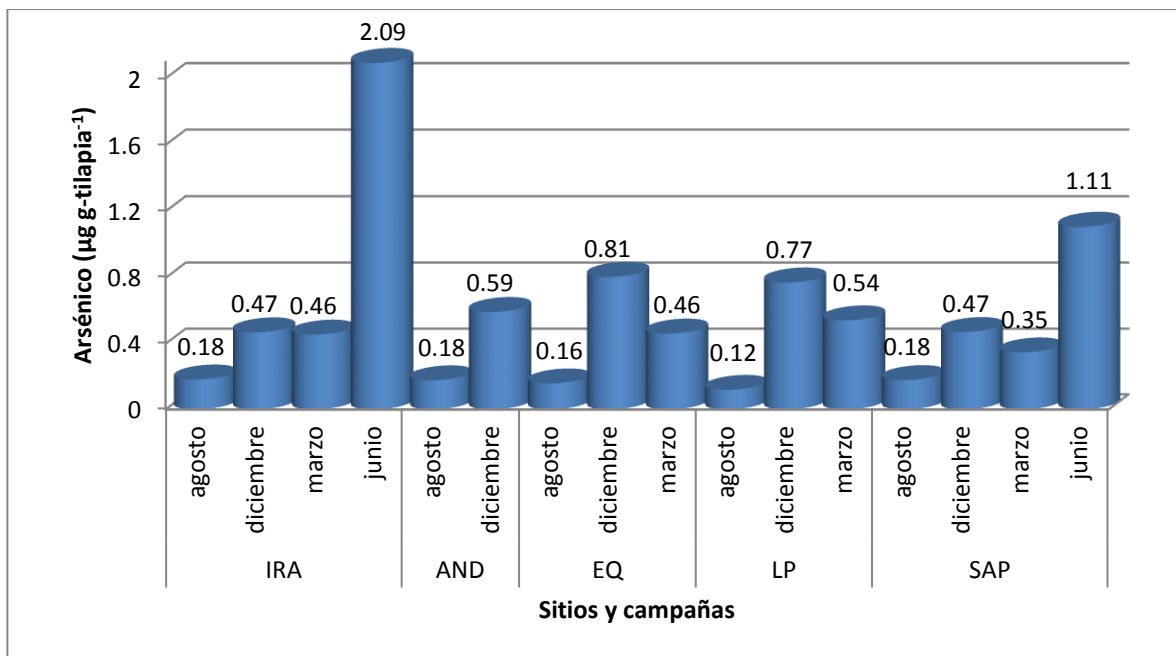
IRA y AND son los sitios que presentan las concentraciones más altas en charales, ambos sitios pertenecen al vaso este. El vaso este tiene mayor abundancia de estas especies que el otro vaso localizado al oeste, por lo cual existen más sitios propicios para la pesca.

EQ, LP y SAP presentan incremento en las concentraciones de arsénico al transcurrir las campañas de muestreo, lo cual indica que la talla puede ser una variable importante en la acumulación de este metaloide. En la temporada de estiaje la abundancia de especies disminuye

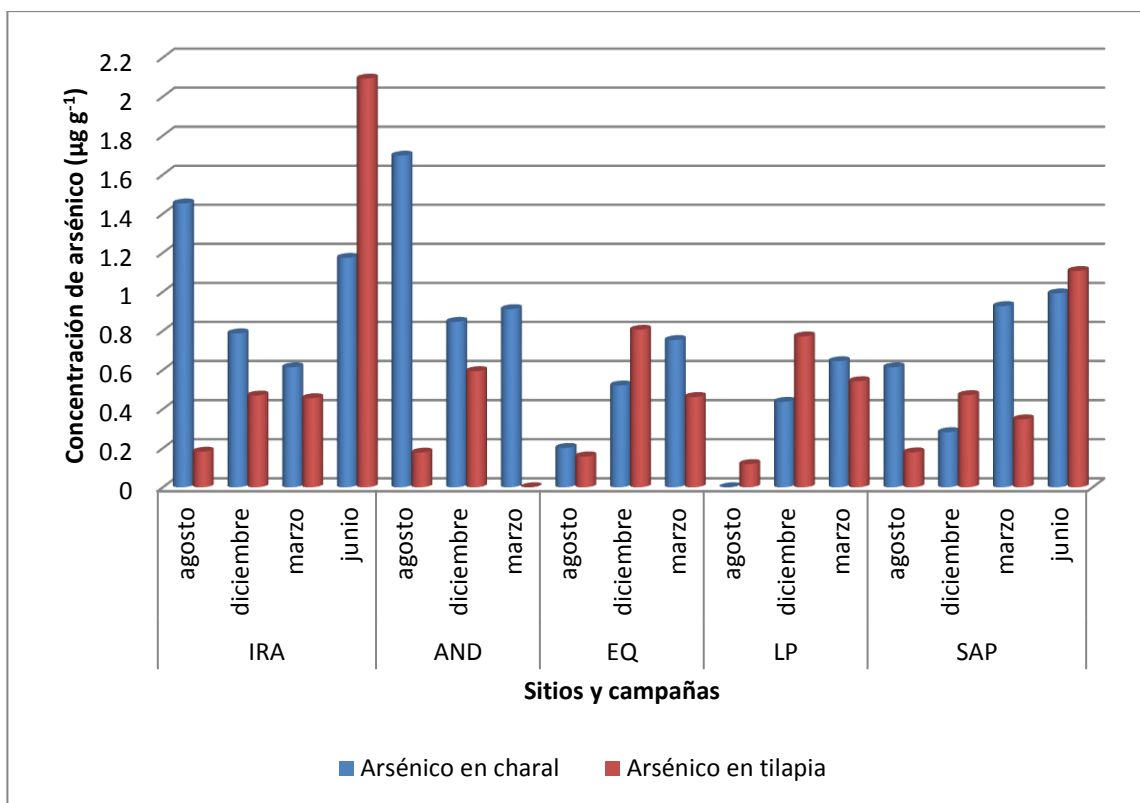
teniendo especies sobrevivientes que incrementan su talla con el tiempo. Por otra parte, al inicio de la temporada de lluvias la reproducción vuelve a incrementar la abundancia de especies.



**Figura 4.** Concentración de arsénico ( $\mu\text{g g-charal}^{-1}$ ) en seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio.



**Figura 5.** Concentración de arsénico ( $\mu\text{g g-tilapia}^{-1}$ ) en seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio.



**Figura 6.** Concentración de arsénico ( $\mu\text{g g-tilapia}^{-1}$ ) y ( $\mu\text{g g-charal}^{-1}$ ) en seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio.

Respecto a las concentraciones determinadas en la tilapia, solamente SAP e IRA en junio sobrepasan  $1.0 \mu\text{g g}^{-1}$ . La máxima concentración es en IRA en el mes junio con  $2.09 \mu\text{g g}^{-1}$ .

Existe una ligera tendencia a encontrar mayores concentraciones de arsénico en los charales que en las tilapias (Figura 6). El charal es un depredador y se alimenta de zooplancton lo cual lo convierte en una especie más hábil para la asimilación de nutrientes, mientras que la tilapia es un consumidor primario.

IRA presenta concentraciones más altas que  $1.0 \mu\text{g g}^{-1}$  en ambas especies para el mes de junio, lo cual puede ser debido al incremento de la concentración de arsénico en agua en marzo y/o a la ganancia de talla por parte de las especies, mientras que EQ y LP en ninguna campaña rebasan la concentración anteriormente mencionada.

---

Los seis sitios de muestreo en las cuatro campañas se muestran en las Figuras 4, 5 y 6, y la falta de estos en algunas figuras se debe a la ausencia de especies.

Las concentraciones de arsénico en charal tienden a ser mayores en los meses de agosto y junio como se muestra en la Figura 6. Al inicio de la temporada de lluvias existe arrastre de arsénico desde zonas secas y resuspensión de arsénico en los sedimentos, por lo cual hay concentraciones disponibles en la columna de agua que anteriormente no estaban y que son asimiladas por los charales (*Chirostoma jordani*). Lo anterior se confirma debido a que la concentración de arsénico en la fase disponible aumenta también en la temporada de lluvias (agosto y junio).

El arsénico en las especies de interés son menores que los límites establecidos por la comunidad europea (CCE, 2006) y algunas muestras de peces rebasan los límites de la normatividad australiana, lo anterior indica que el consumo de pescado que proviene del lago de Cuitzeo no provoca una intoxicación aguda. Como resultado de las concentraciones encontradas en las especies se entiende que es necesario un monitoreo sobre posibles efectos en la salud. El consumo de pescado y agua con concentraciones de arsénico no recomendadas puede provocar intoxicaciones crónicas y la aparición de cáncer. En la literatura no se reporta la presencia de arsénico en peces para el lago de Cuitzeo, por lo que en el presente estudio es la primera vez que se da a conocer. Los comuneros consiguen alimento de la pesca y recursos económicos de la venta de especies comerciales como lo son las tilapias (*Oreochromis niloticus* y *Oreochromis aureus*) y los charales (*Chirostoma jordani*). Estos pescadores son el blanco más vulnerable para posibles intoxicaciones por ingesta de pescado y contacto directo con el agua del lago. Actualmente el lago se encuentra impactado por la contaminación antropogénica lo que ha provocado la disminución y casi extinción de algunas especies. Los charales (*Chirostoma jordani*) resultan difíciles de encontrar en lugares en donde anteriormente existían, es por esa razón que especies de la familia de los goodeidae (*Goodea atripinis*) han cobrado valor comercial debido a la escasez de esta especie que tiene un costo bajo comparado con los charales (*Chirostoma jordani*) pero es de interés en grandes cantidades para la fabricación de harinas consumidas por los comuneros.



---

Las especies pueden estar realizando un proceso de homeostasis para mantener sus niveles de arsénico relativamente bajos, por encima de los niveles conocidos como naturales pero por debajo de lo establecido en la normatividad (CCE, 2006).

Es importante conocer la especiación química presente en las concentraciones de arsénico totales en las especies de estudio. De esta manera se podrán identificar compuestos de arsénico orgánicos que son menos tóxicos en comparación con el arsénico inorgánico (III), o en su defecto compuestos de arsénico inorgánicos (V) que pueden ser más fácilmente excretados por organismos que los consumen. Se debe tomar en cuenta que el arsénico (V) que es menos tóxico y está presente en el agua en un 99% y que en sedimentos los compuestos de arsénico están íntimamente ligados con el núcleo del sedimento y la materia orgánica dejan de esta manera pequeñas cantidades como fase disponible (FD); pero existen concentraciones de arsénico total no recomendadas en peces.

---

## **8.2 Agua**

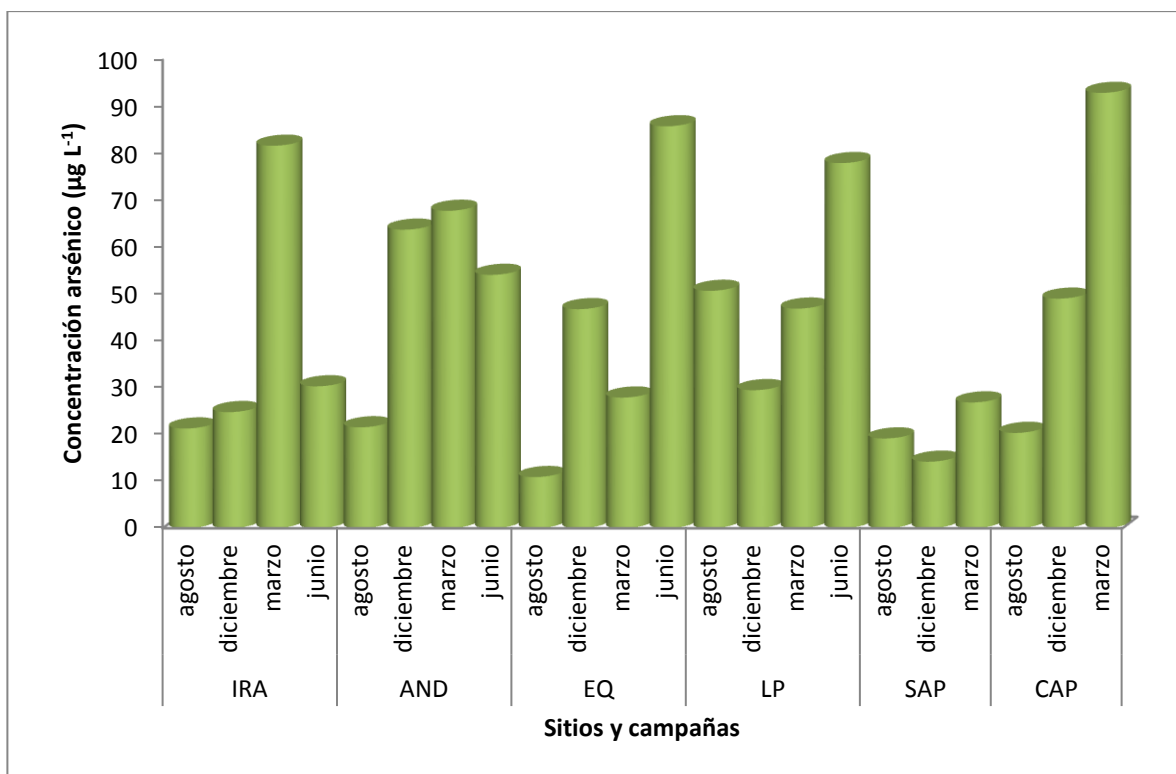
### **8.2.1 Arsénico total**

Es frecuente que en estudios sobre cuerpos de agua superficial se presenten concentraciones de arsénico inferiores a las que se encuentran en los sedimentos aunque podría suceder lo contrario, lo cual depende del metal y del pH.

El agua solo es el medio de transporte y los sedimentos el medio de almacenamiento; produciéndose una sedimentación lenta o rápida según influyan factores como la temperatura y los sólidos totales entre otros.

Las concentraciones de arsénico en agua son mayores a  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  (OMS) en todos los sitios (Figura 7); la mayoría de los sitios están por encima del valor máximo permisible de  $25 \mu\text{g L}^{-1}$  (DOF 2001a). Por esta razón el agua del lago no es apta para consumo humano pero si para riego y uso público urbano.

La concentración más alta de arsénico tiende a concentrarse en la temporada de estiaje, en marzo para IRA, AND y CAP; y en junio para EQ y LP.

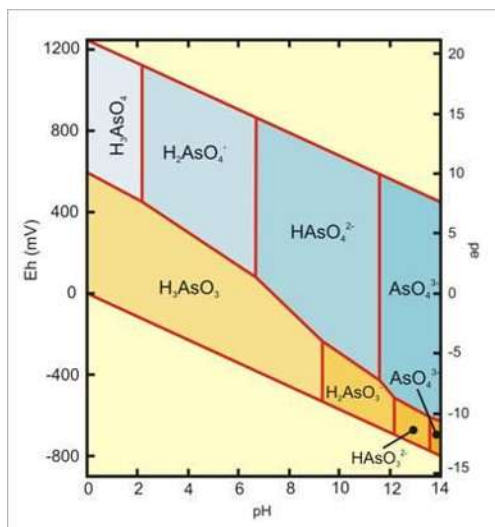


**Figura 7.** Arsénico ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en agua de seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio.

### 8.2.2 Modelación de la especiación química del arsénico

El arsénico se encuentra en el agua formando diferentes especies químicas. Estas especies dependen de variables que promueven su formación, tales como el pH, el potencial redox y la interacción con sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el lago. La capacidad de enlazarse de los metales y metaloides también es una parte importante en la especiación.

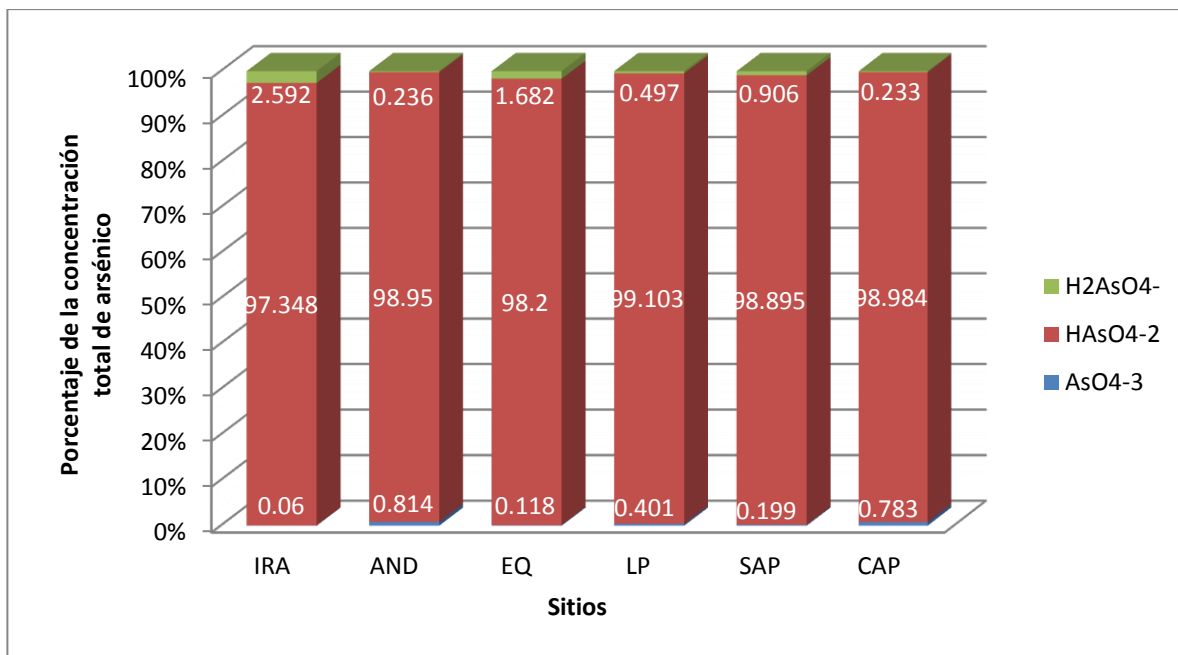
Los compuestos de arsénico debido a las condiciones básicas de pH en el lago de Cuitzeo presentan al arsénico (V) como la especie acuosa predominante en todos los sitios (Figura 8).



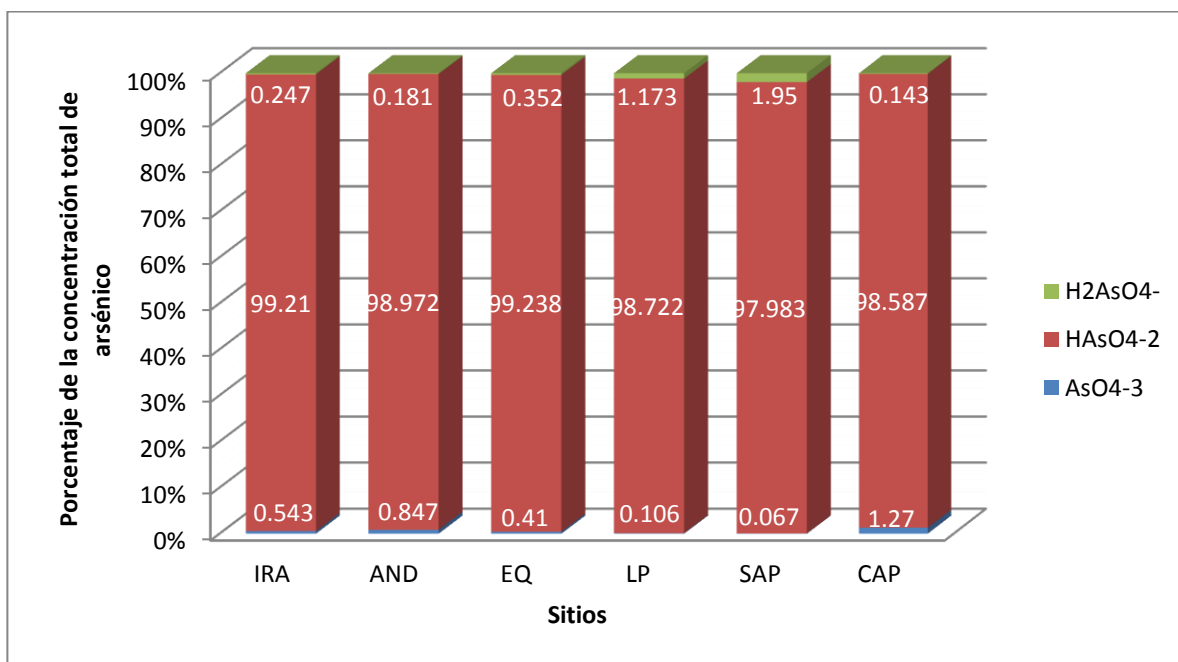
**Figura 8.** Diagrama de especiación para el arsénico en función del pH y potencial redox.

Los porcentajes de las especies predominantes de arsénico a partir de los valores de la concentración de arsénico total en función de los parámetros fisicoquímicos, mediante una modelación con el programa Visual Minteq se muestran en las Figuras 9 a la 12.

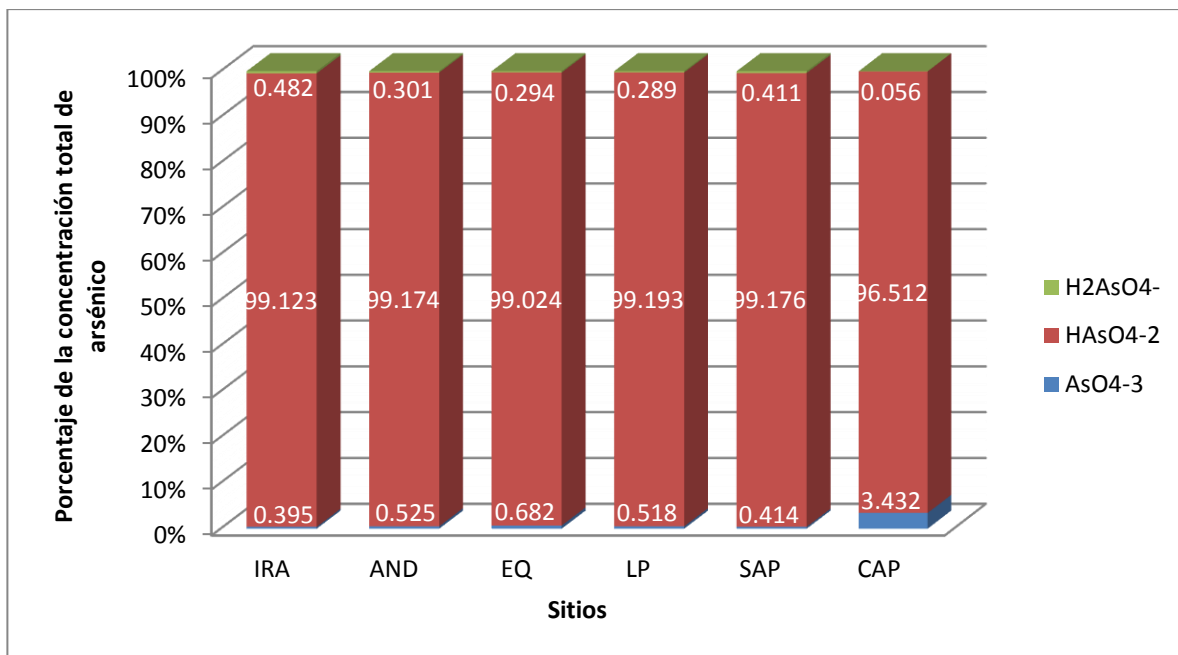
Una presencia significativa de la especie  $HAsO_4^{2-}$  en un 97 a 99% de la concentración total de arsénico en agua, mientras que las especies  $AsO_4^{3-}$  y  $H_2AsO_4^-$  se reparten el resto de la concentración total de arsénico. El  $HAsO_4^{2-}$  es la especie abundante en todas las campañas, mientras que el máximo porcentaje de  $AsO_4^{3-}$  es 3.4% de la concentración de arsénico total en agua para CAP en el mes de marzo. Los resultados coinciden con los reportados por Alfaro (2010) donde la especie química de arsénico predominante es el  $HAsO_4^{2-}$  (96% a 99%) dentro del lago de Cuitzeo, ya que existe una ligera variación en la proporción del  $H_2AsO_4^-$  en dos sitios (18.95% y 22.92%) que corresponden a puntos cerca de la desembocadura del Río Grande respectivamente. Una proporción diferente en las especies químicas existirá solo si hay cambios en el pH del lago de Cuitzeo, lo cual resulta complicado ya que el sistema de carbonatos en el agua presenta una función amortiguadora en los valores oscilantes de pH. Otra manera de encontrar diferencias en las concentraciones de las especies químicas es tener incrementos o disminución en el potencial redox. Una disminución en el pH y/o en el potencial redox daría como resultado la reducción de arsénico (V) a arsénico (III) encontrándose como  $H_3AsO_3$  que es 10 veces más tóxico.



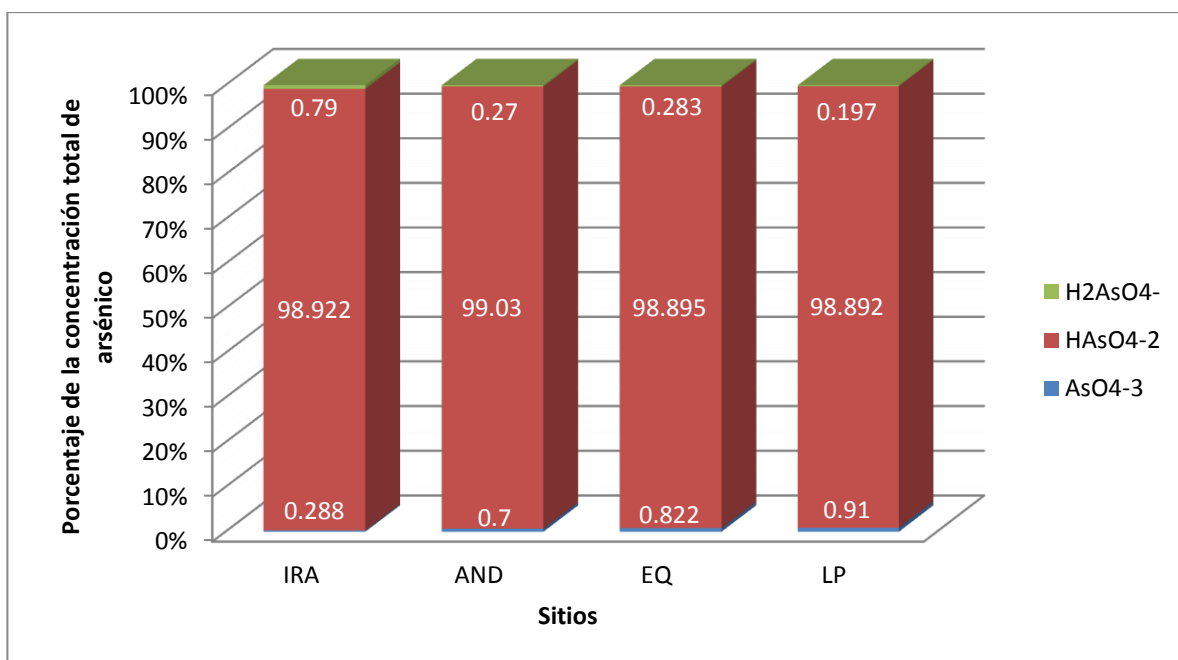
**Figura 9.** Especies predominantes de arsénico en agua para los seis sitios en la campaña de agosto 2012.



**Figura 10.** Especies predominantes de arsénico en agua para los seis sitios en la campaña de diciembre 2012.



**Figura 11.** Especies predominantes de arsénico en agua para los seis sitios en la campaña de marzo 2013.



**Figura 12.** Especies predominantes de arsénico en agua para los seis sitios en la campaña de junio 2013.

---

## 8.3 Sedimentos

### 8.3.1 Concentración de arsénico

Las concentraciones de arsénico total en  $\text{mg kg}^{-1}$  determinadas en los seis sitios de muestreo durante el periodo de estudio se presentan en la figura 13. Las concentraciones oscilan entre 4 y 17  $\text{mg/kg}$  para todos los sitios de muestreo. Las recomendaciones canadienses (CCME, 2002) establecen un valor de 5.9  $\text{mg kg}^{-1}$  de arsénico como recomendación para protección de la vida acuática y un valor de 17  $\text{mg kg}^{-1}$  como nivel de efecto probable (Alfaro, 2010).

La mayoría de los sitios contienen concentraciones en sus sedimentos por encima de 6  $\text{mg/kg}$  que está en límite de lo que se recomienda. Sitios como IRA, EQ y LP presentan valores de 17  $\text{mg kg}^{-1}$  lo cual representa efectos probables en el ecosistema.

LP presenta valores inferiores a 6  $\text{mg kg}^{-1}$  en las campañas con excepción del mes de junio donde la concentración alcanza 17  $\text{mg kg}^{-1}$  con efectos en la vida acuática. Este incremento puede ser el resultado de la temporada de estiaje, donde la columna de agua es menor y de esta manera el arsénico presente en el agua precipita enriqueciendo los sedimentos.

Con base en las concentraciones encontradas en los sedimentos que pueden tener efecto probable en la vida acuática existe una posible relación para que las concentraciones de arsénico estén siendo acumuladas por los organismos en estudio.

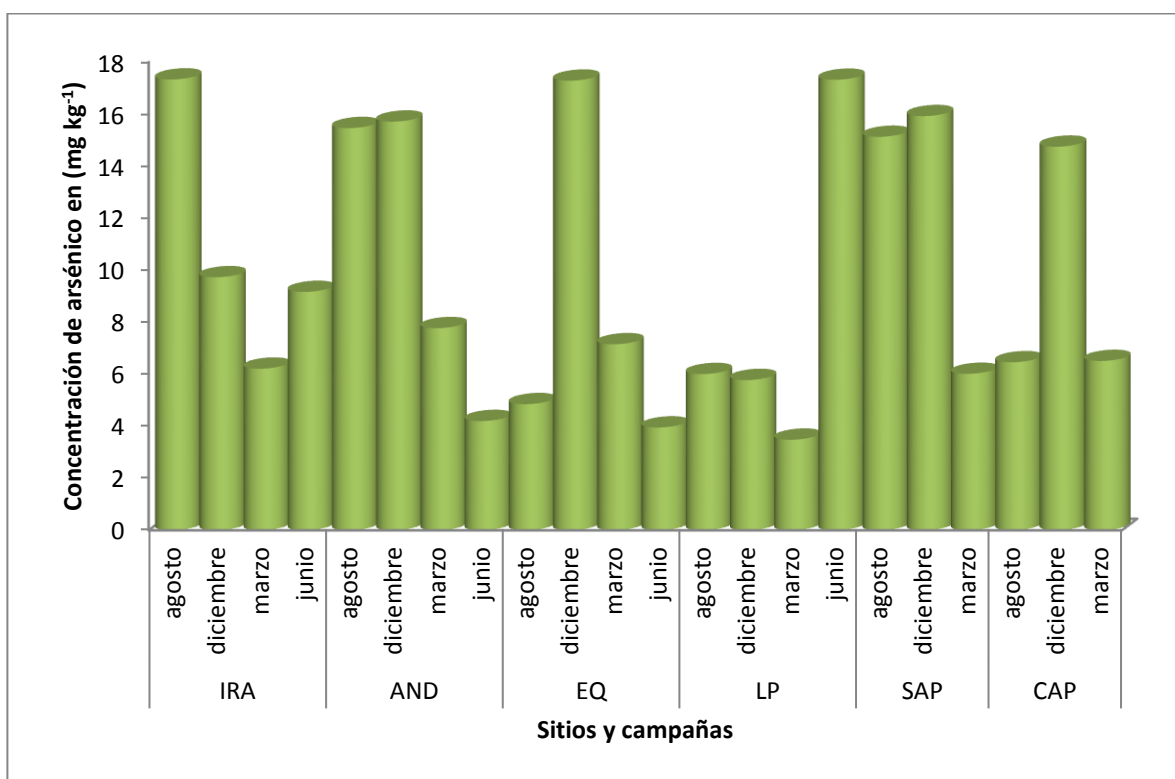
Las concentraciones de arsénico en los sitios provienen de fuentes naturales en especial de manantiales termales localizados en el vaso este del lago (Alfaro, *et al.* 2002 y Páez, 2008). De esta manera las mayores concentraciones son encontradas en el vaso este.

Las concentraciones altas en los sedimentos pueden atribuirse a que no existe resuspensión en esos sitios del lago y a la vez estar relacionado con condiciones anóxicas y

valores bajos de pH lo que pudo haber contribuido a una menor liberación de arsénico de los sedimentos.

Por otra parte se ha demostrado que peces como la tilapia (*Oreochromis niloticus* y *Oreochromis aureus*) acumulan arsénico debido a que esta especie habita en el fondo de los cuerpos de agua y a su paso remueve la capa superficial de los sedimentos (Alfaro, 2010). Es importante recordar que esta especie es de las más explotadas en el lago.

Respecto a los riesgos ecológicos para las especies del lago la bioacumulación puede provocar la disminución en la reproducción y supervivencia de los peces. De esta manera también es importante considerar la talla de las especies ya que a mayor tiempo de exposición se facilita la bioacumulación.



**Figura 13.** Concentración de arsénico (mg kg<sup>-1</sup>) en sedimentos de seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio.



---

### 8.3.2 Distribución de arsénico en fracciones geoquímicas

La determinación de fracciones geoquímicas está basada en un método europeo llamado extracción secuencial de los tres pasos (BCR, 1997) siendo la fase residual y la F3 las fracciones mayormente ligadas al núcleo del sedimento haciéndolas menos disponibles para la biota del ecosistema. Por otro lado las fracciones F2 y F1 muestran una fácil disponibilidad e interacción con el medio.

Las concentraciones de arsénico en  $\text{mg kg}^{-1}$  de las fracciones F1, F2 y F3 de los sedimentos se muestran en la Figura 14, mientras que la concentración de este mismo metaloide en la fracción residual (FR) se presenta en la figura 15. La FR se graficó por separado debido a la diferencia en el orden de magnitud con el resto de las fracciones, esto ayuda a una clara apreciación de los datos.

Para AND, EQ y LP la fracción reducible y asociada con los oxihidróxidos de hierro y magnesio (F2) está presente en concentraciones mayores que F1 (metales intercambiables solubles en agua y ácido) y F3 (metales oxidables asociados con materia orgánica y sulfuros) para todas las campañas excepto en el mes de agosto en EQ.

Las únicas fracciones que rebasan  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  son la F3 en IRA en el mes de agosto y la F2 en AND en el mes de junio. El vaso oeste presenta concentraciones en las fracciones F1, F2 y F3 menores a las del vaso este. El vaso oeste sobrepasa los  $0.2 \text{ mg kg}^{-1}$  solo en la F2 para LP en el mes de junio y la F3 en CAP para el mes de agosto, el resto de los sitios en los diferentes meses son inferiores a esta concentración.

Existe una tendencia ascendente en las F1, F2 y F3 para IRA, AND, LP y CAP en el mes de agosto. El resto de los meses muestra comportamientos desiguales entre las fracciones.

SAP tiene un comportamiento uniforme en sus primeras tres fracciones a lo largo de las campañas, mientras que en AND existe mucha discrepancia entre las concentraciones de arsénico en sus diferentes fracciones y predominando F2.

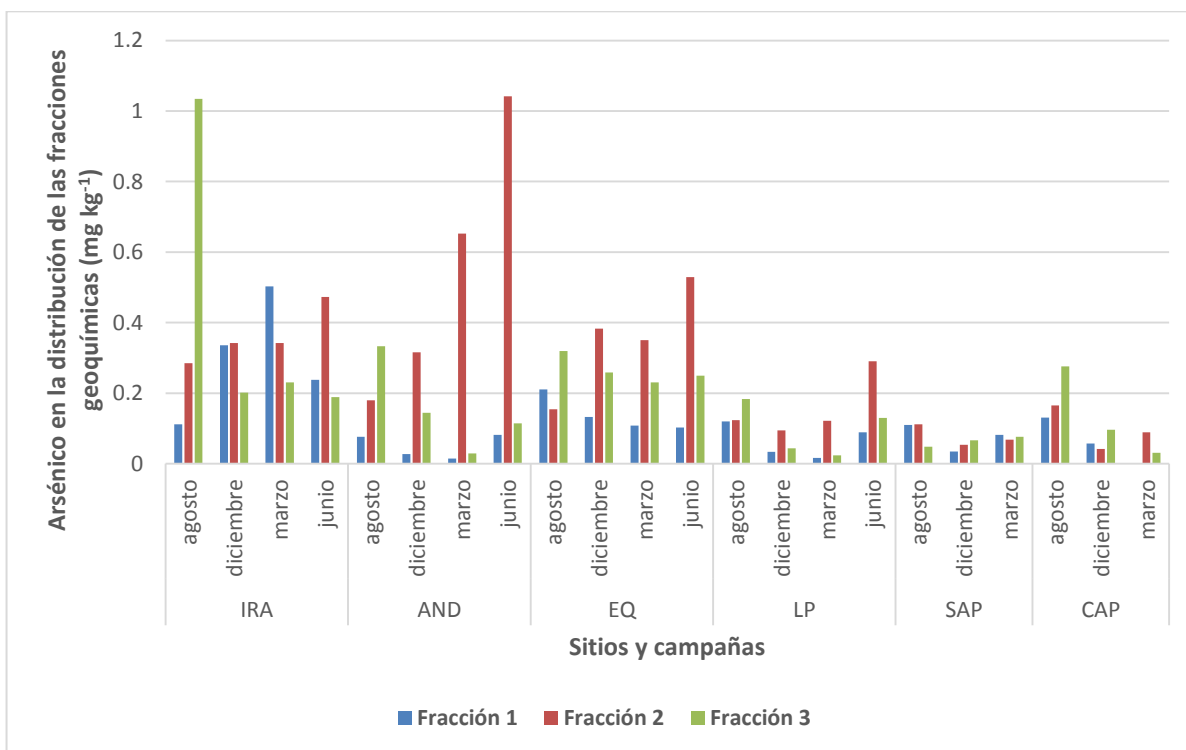
---

Por otro lado se observan cambios espaciales y temporales en la concentración de arsénico en la fracción tres (F3) lo cual puede ocurrir debido a que los procesos de retención implicados (adsorción y coprecipitación) son sensibles a cambios en potencial redox y otros cambios menores en diversos parámetros que pueden afectar las cantidades relativas de este metaloide en la fase geoquímica. Los óxidos de Fe y Mn presentes en las arcillas y en la F3 pueden actuar como limpiadores eficientes de metales pesados (entre ellos el arsénico), debido principalmente a procesos de adsorción con dichos coloides.

Los metales pesados tienen afinidad por sustancias orgánicas y sus productos de descomposición son de gran importancia para el comportamiento de las sustancias traza en sistemas acuáticos. La materia orgánica juega un papel importante en la distribución y dispersión de metales en el ambiente. Existen tres procesos principales que llevan a la incorporación de una especie organometálica en particular a los sedimentos.

- a) La relación entre un ion metálico y un ligando orgánico en disolución, produciendo una especie que puede precipitar directamente o ser adsorbida en el sedimento.
- b) Organismos que contienen compuestos de coordinación biológica y son incorporados al sedimento.
- c) Especies minerales solubles en agua que contienen ligandos orgánicos y que son adsorbidas al sedimento (Alfaro, 2010).

Los procesos anteriores son los responsables del aumento de arsénico en la Fracción F3 del sedimento lo cual incrementa su magnitud respecto a las fracciones F1 y F2 para algunos sitios, tal como sucedió en agosto para todos sitios de muestreo excepto SAP y en diciembre para SAP y CAP.



**Figura 14.** Distribución de las fracciones geoquímicas F1, F2 y F3 (mg kg<sup>-1</sup>) en seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio.

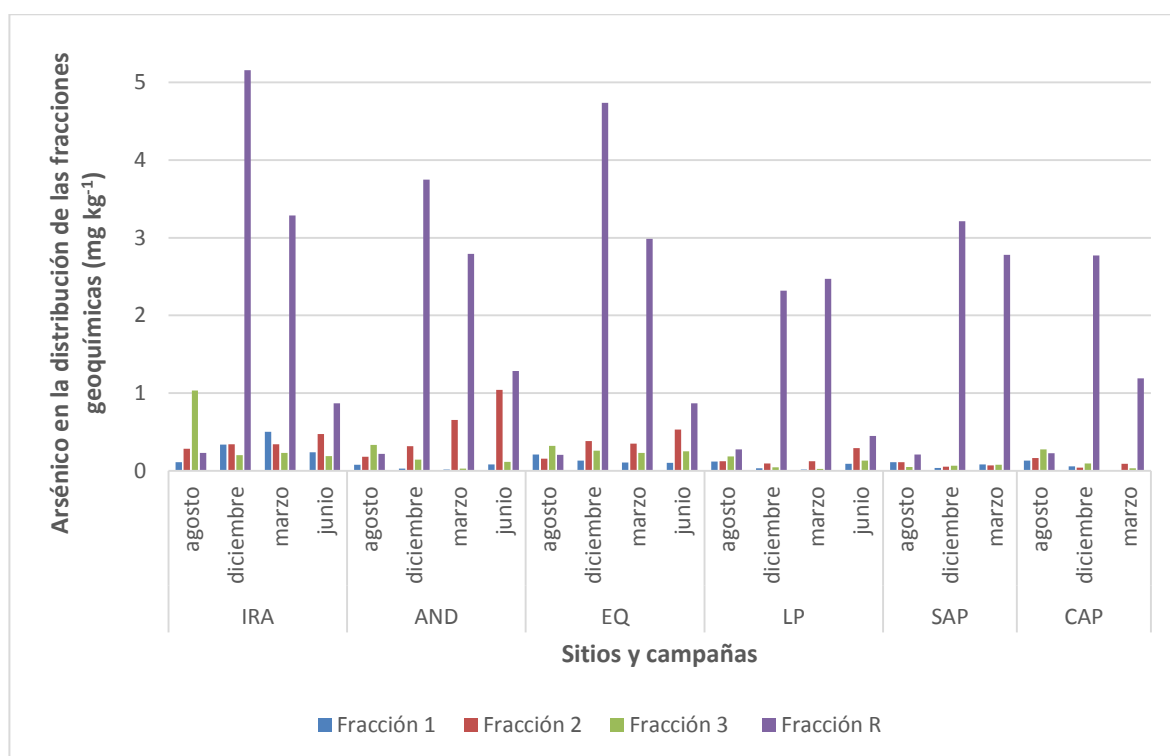
La fracción residual (FR) presenta concentraciones mayores respecto del resto de las fracciones. La concentración de arsénico está directamente ligada a la red cristalina del núcleo, lo cual deja pequeñas concentraciones dispuestas para la biota del ecosistema. La concentración mayor de arsénico en la FR se muestra en IRA en el mes de diciembre. EQ presenta en el mes de agosto la concentración más baja en FR, donde la F3 es mayor en este sitio para esta campaña.

Los compuestos de arsénico al estar ligados a la matriz del sedimento disminuyen su fácil movilidad hacia la fase acuosa, lo contrario que pasa con los compuestos fácilmente separables, intercambiables y solubles en agua que se muestran disponibles para la biota. Sin embargo aunque son menores las concentraciones disponibles para la biota existe la posibilidad de acumulación y toxicidad causada por compuestos de arsénico.

El arsénico natural iónicamente intercambiable presente en sedimentos del lago de Cuitzeo puede ser liberado si existe un aumento en la fuerza iónica del medio, como sucede en el

caso de un incremento en la salinidad del agua provocado por la evaporación natural. Estos incrementos pueden ser causados por los componentes mayores como son los iones fosfato, sulfato y cloruros que compiten por sitios de adsorción en las fases minerales provocando la liberación de arsénico que se encuentra ligado a arcillas y óxidos de Fe y Mn (Alfaro, 2010).

Los iones antes mencionados están presentes en escurrimientos agrícolas y en la descomposición de materia orgánica, esta concentración incrementa con el uso de fertilizantes. De esta manera las concentraciones de arsénico en la fase F1 y F2 representan un riesgo, y por lo tanto debe ser tomado en cuenta el monitoreo de las condiciones geoquímicas, de contaminación y ambientales en la liberación de este metaloide hacia la columna de agua.



**Figura 15.** Distribución de las fracciones geoquímicas (mg kg<sup>-1</sup>) en seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio.

El arsénico se puede movilizar a fases más disponibles, esto depende de cambios en las variables ambientales como el pH, la salinidad, la alcalinidad, el potencial redox y otras variables, con lo cual incrementa su potencial tóxico y se produce acumulación. Por esta razón es importante conocer los cambios y relaciones entre las variables ambientales y las concentraciones

---

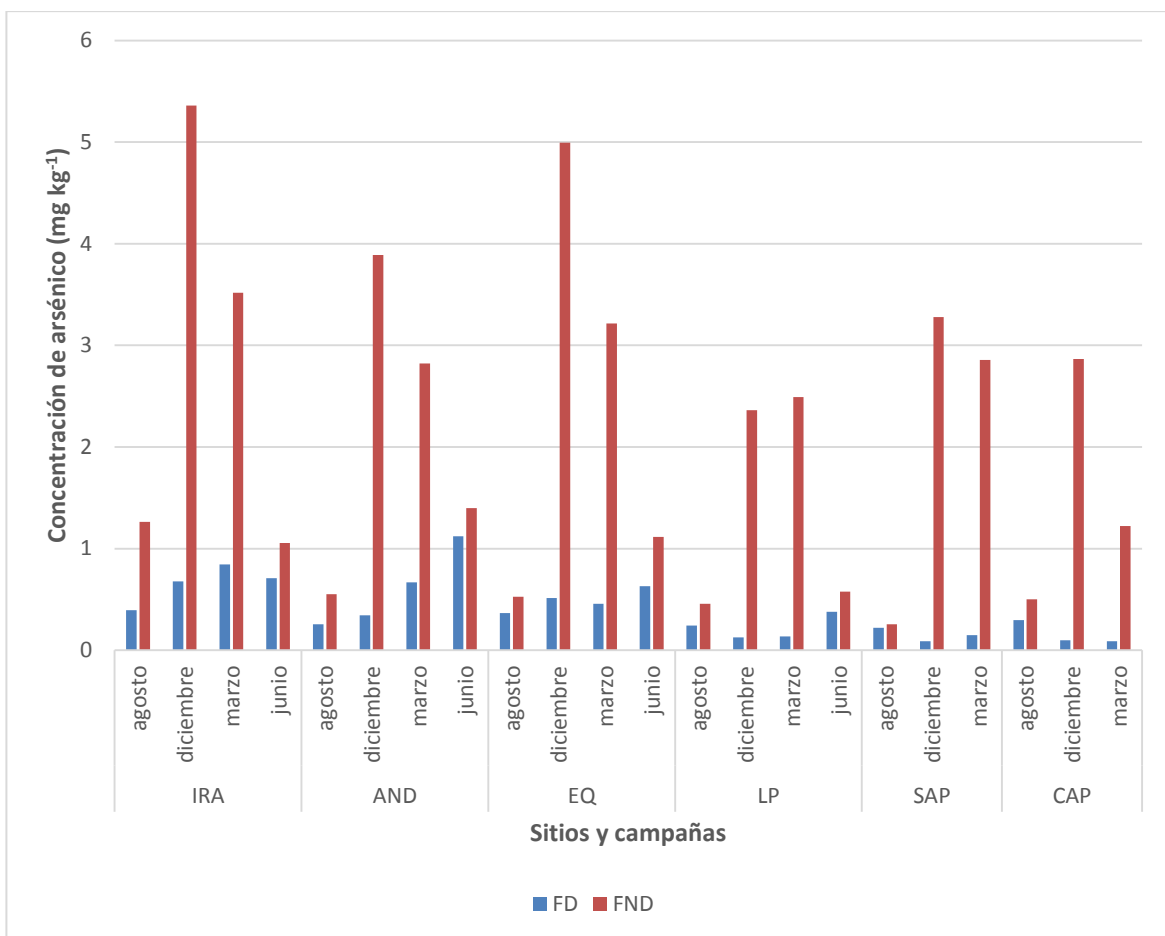
de compuestos arsenicales en agua sedimentos y organismos, y así detectar alteraciones en la disponibilidad del arsénico y los cambios mostrados en el ecosistema.

### **8.3.3 Fase disponible (FD) y no disponible (FND)**

La fase disponible (FD) es la suma de la fase de metales fácilmente intercambiables, solubles en agua y ácido (F1) y los metales reducibles y asociados con oxihidroxidos de hierro y magnesio (F2); mientras que la fase no disponible (FND) es la suma de la fase oxidable y asociada a materia orgánica y sulfuros (F3) y la fase residual relacionada con la red cristalina (FR).

A continuación se presentan las fases disponible y no disponible de arsénico las cuales se determinaron en base a la extracción secuencial (BCR) de los sedimentos.

La FND tiene un orden de magnitud mucho mayor que la FD (Figura 16). Esta tendencia se mantiene en todo el periodo de estudio. La concentración en la fase FD fue de  $3.51 \text{ mg kg}^{-1}$  para IRA en marzo, valores similares que presentaron en diciembre para los sitios AND y SAP, en marzo para EQ. Por otra parte la menor concentración que se determinó fue de  $0.25 \text{ mg kg}^{-1}$  en SAP para el mes de agosto.

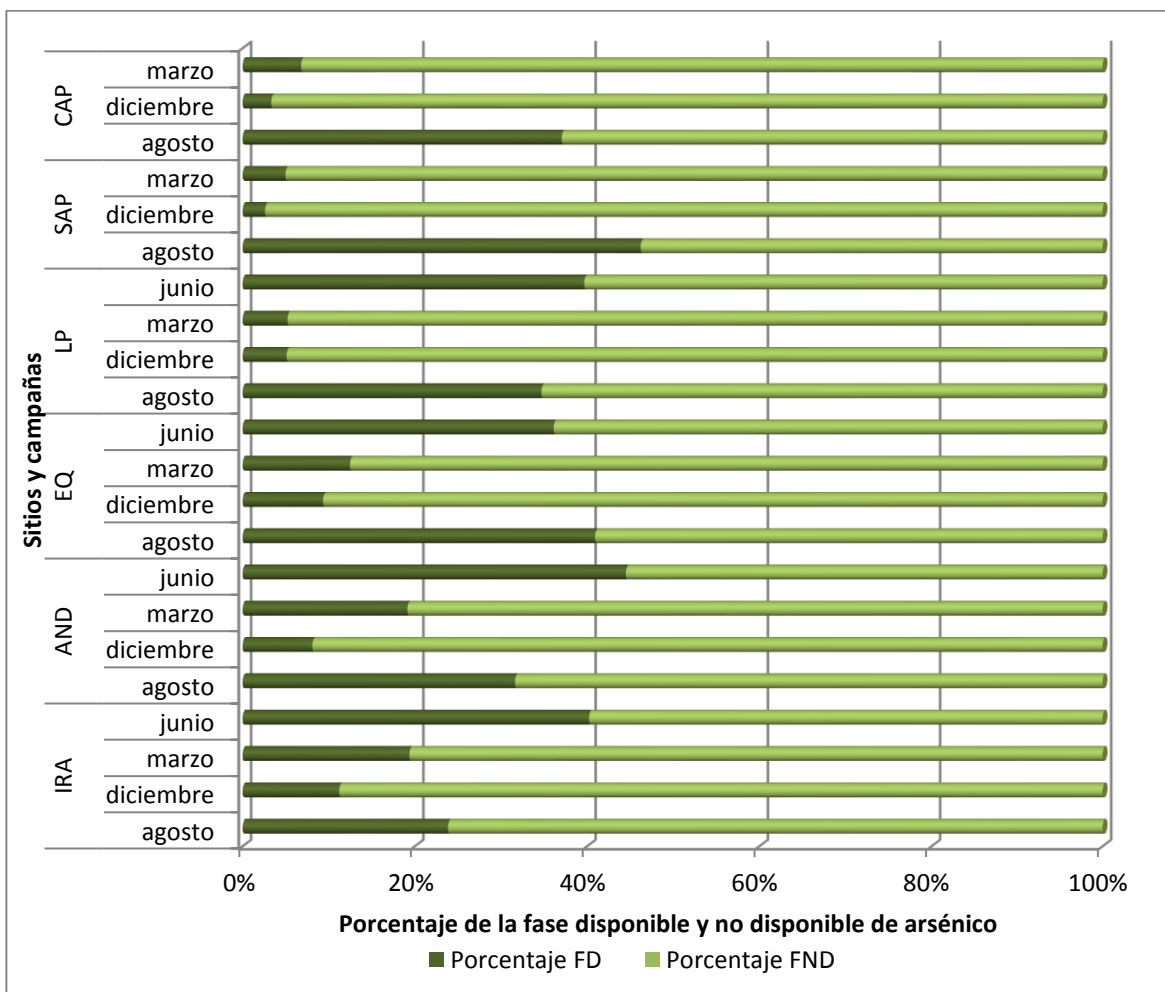


**Figura 16.** Fase disponible (FD) y fase no disponible (FND) en mg kg<sup>-1</sup> en seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio.

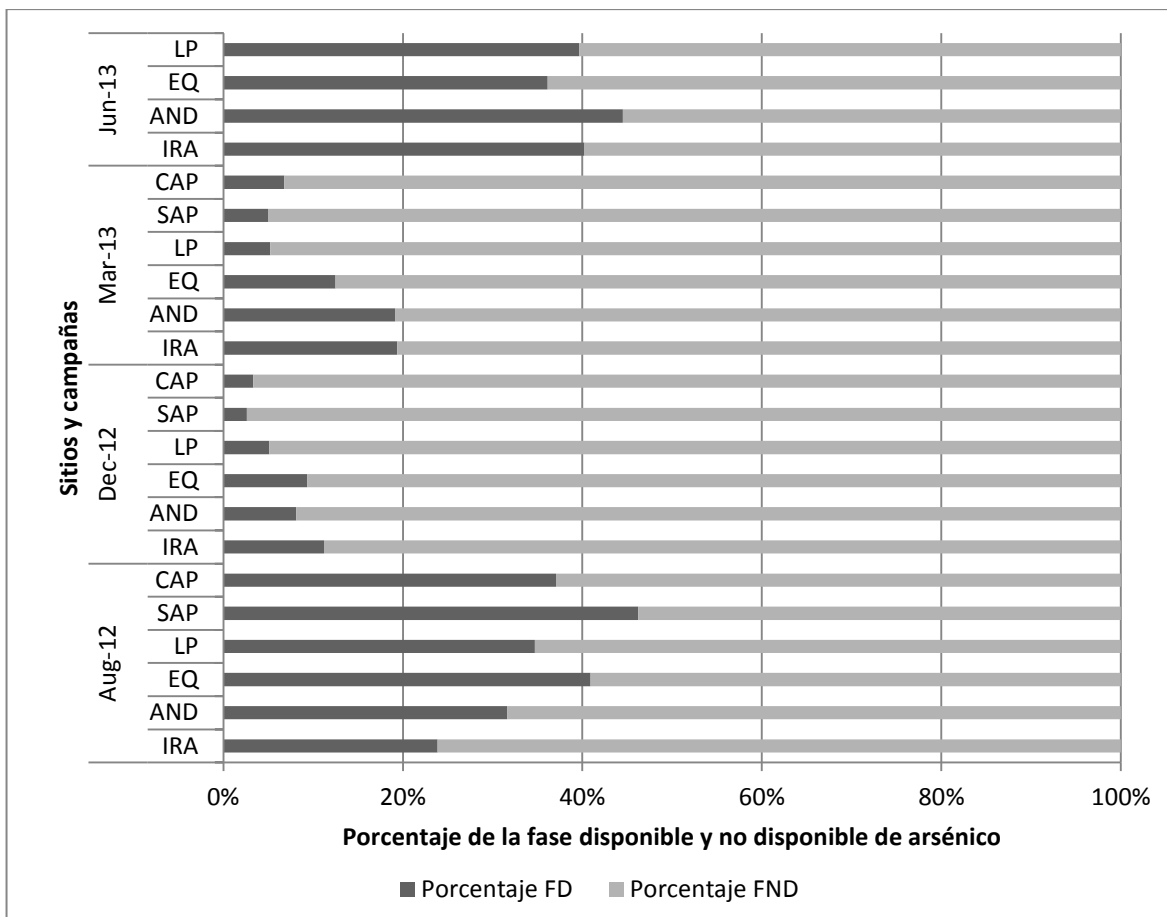
Igual como lo determinó Alfaro (2010) la fase no disponible tiene porcentajes mayores que la fase disponible (FD), siendo 53.76% la más baja en el mes de agosto para SAP y la más alta de 97.38% para SAP en el mismo mes como se observa en la Figura 17. De esta manera se deduce que la mayor concentración de compuestos de arsénico está ligada a la materia orgánica y a la estructura cristalina en el núcleo del sedimento. Los pequeños porcentajes de la fase (FD) pueden presentar tendencia a la acumulación en peces planctívoros. El arsénico tiende a ser bioabsorbido en un alto grado en especies de planctívoros más que en otros peces y puede ser acumulado más a fondo por los piscívoros (Alfaro, 2010).

La Figura 17 puede tener otra manera de visualizarse, donde los meses de junio y agosto muestran un aumento de la fase disponible (FD) respecto a la fase no disponible (FND) como se observa en la Figura 18. La temporada de lluvias incrementa la profundidad y extensión del lago;

mediante el arrastre de materia existe un lavado de arsénico proveniente de zonas antes secas que incrementa la concentración de arsénico en la fase disponible.



**Figura 17.** Porcentajes de fase disponible (FD) y fase no disponible (FND) en seis sitios del lago de Cuitzeo durante el periodo de estudio.



**Figura 18.** Porcentajes de fase disponible (FD) y fase no disponible (FND) en las cuatro campañas de muestreo en todos los sitios del lago de Cuitzeo.



---

#### **8.4 Factores de bioconcentración (FBC), bioacumulación (FBA)**

Los factores de acumulación oscilan en una acumulación baja e intermedia (Cuadro 3). Los factores de bioconcentración referidos a *Chirostoma jordani* muestran valores intermedios en todos los sitios y muestreos con excepción de IRA en el mes de marzo. Mientras que para los factores de bioacumulación referidos al género *Oreochromis* existe una relación entre baja e intermedia; debido a las bajas concentraciones de la fase disponible (FD) de los sedimentos. Es importante mencionar que estos factores pueden presentar diferencias si se considera la talla de la especie como una variable. A mayores tallas existe la posibilidad de encontrar mayores concentraciones de arsénico.

La abundancia de especies facilita el cálculo de los factores de acumulación. El vaso este del lago presenta mayor abundancia de especies debido a que tiene mayor profundidad y así evita que el vaso se seque; tal como sucede con el vaso oeste donde se seca en su totalidad.

**Cuadro 3.** Factores de bioconcentración y bioacumulación.

		<b>FBC</b>		<b>FBA</b>	
<b>IRA</b>	agosto	68	intermedia	9	baja
	diciembre	32	intermedia	19	intermedia
	marzo	8	baja	6	baja
	junio	39	intermedia	69	intermedia
<b>AND</b>	agosto	79	intermedia	8	baja
	diciembre	13	intermedia	9	baja
	marzo	13	intermedia	-	-
	junio	-	-	-	-
<b>EQ</b>	agosto	18	intermedia	14	intermedia
	diciembre	11	intermedia	17	intermedia
	marzo	27	intermedia	17	intermedia
	junio	-	-	-	-
<b>LP</b>	agosto	-	-	2	baja
	diciembre	15	intermedia	26	intermedia
	marzo	14	intermedia	12	intermedia
	junio	-	-	-	-
<b>SAP</b>	agosto	32	intermedia	9	baja
	diciembre	20	intermedia	33	intermedia
	marzo	35	intermedia	13	intermedia
	junio	-	-	-	-

**Cuadro 4.** Factores para tipos de acumulación.

Factores	Acumulación
<10	baja
10-100	intermedia
100<	alta

---

## 8.5 Análisis estadístico

### 8.5.1 Prueba de Mantel

Los sitios de muestreo en las diferentes campañas, los cuales son (1) agosto, (2) diciembre, (3) marzo y (4) junio se muestran en el cuadro 5.

Para esta prueba el valor de  $p$  es 0.714, por lo tanto no hay evidencia de que “la distancia geográfica” influya en los factores de acumulación, en otras palabras de cada 100 veces nos equivocaremos 71 al decir que “la distancia geográfica” sí influye. Las concentraciones de arsénico presentes en el lago son variables lo que indican que la variabilidad en los factores de acumulación no depende del sitio. De esta manera tienen que existir parámetros que estén influenciando la concentración de arsénico en *Oreochromis niloticus*, *Oreochromis aureus* y *Chirostoma jordani*, los cuales podrían ser parámetros físicos y químicos. Un análisis multivariado puede relacionar todas estas variables de interés y poder tener una explicación más certera sobre nuestro conjunto de variables.

---

**Cuadro 5.** Coordenadas, factores de bioconcentración y bioacumulación para los sitios de muestreo.

<b>Sitio</b>	<b>FBC</b>	<b>FBA</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
IRA_1	68.3977583	8.55703118	19.9571944	100.924194
AND_1	79.0037615	8.24084764	19.9461111	100.864056
EQ_1	18.4642024	14.4876082	19.8876389	100.943944
SAP_1	32.0925462	9.32526703	19.9582222	101.074889
IRA_2	31.8237788	18.9710856	19.9571944	100.924194
AND_2	13.2745158	9.31541386	19.9461111	100.864056
EQ_2	11.1406648	17.2434984	19.8876389	100.943944
LP_2	14.8558232	26.2391817	19.9233056	101.139056
SAP_2	19.9076364	33.2603676	19.9582222	101.074889
IRA_3	7.51070633	5.57559415	19.9571944	100.924194
EQ_3	27.053809	16.5861858	19.8876389	100.943944
LP_3	13.7574781	11.5742253	19.9233056	101.139056
SAP_3	34.5798734	12.9490262	19.9582222	101.074889
IRA_4	38.8464509	69.24097	19.9571944	100.924194

**Cuadro 6.** Resultados de la prueba de Mantel en Tinn-R y R.

```
mantel.rtest(dist.factores,dist.coor,nrepet=9999)
Monte-Carlo test
Observation: -0.08089148
Call: mantel.rtest(m1 = dist.factores, m2 =
dist.coor, nrepet = 9999)
Based on 9999 replicates
Simulated p-value: 0.714
```

---

### 8.5.2 Análisis de componentes principales (PCA)

El análisis de componentes principales se realizó mediante el programa estadístico Tinn-R, R y Minitab 15. A continuación en el Cuadro 7 se muestran los resultados para los valores propios (eigenvalue) y la proporción de la variación que sintetiza.

**Cuadro 7.** Resultados del PCA realizado en Minitab 15, Tinn-R y R.

Partitioning of correlations:						
	Inertia	Proportion				
Total	29	1				
Unconstrained	29	1				

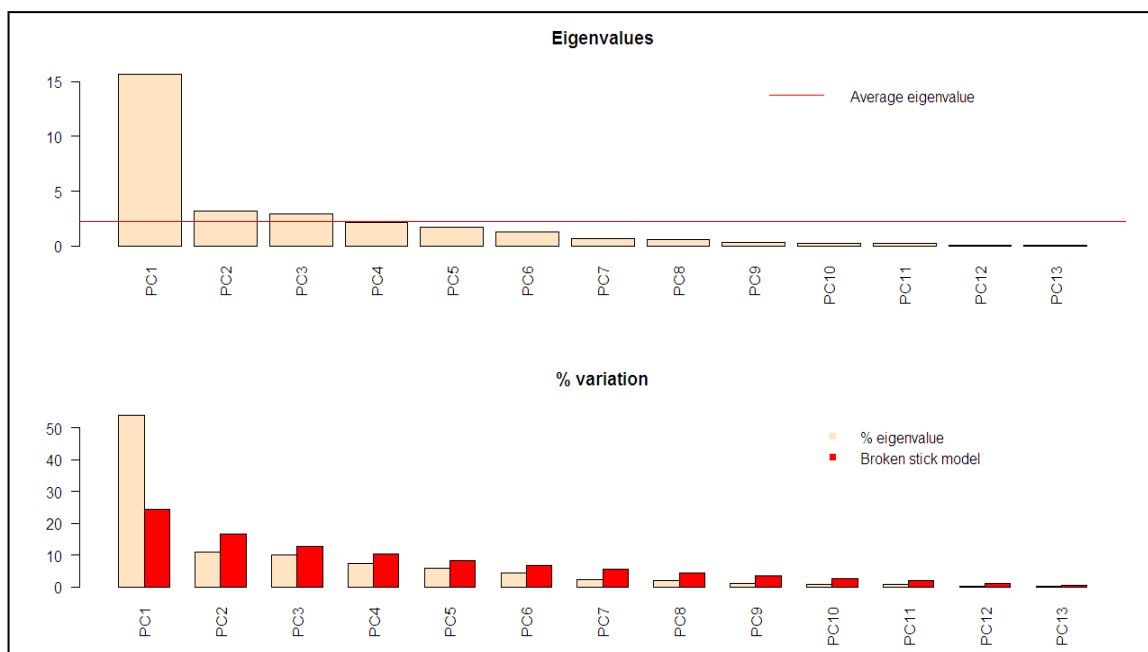
  

Eigenvalues and their contribution to the correlations						
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Eigenvalue	15.6452	3.2092	2.9168	2.1160	1.6731	1.2380
Proportion Explained	0.5395	0.1107	0.1006	0.0729	0.0576	0.0426
Cumulative Proportion	0.5395	0.6502	0.7507	0.8237	0.8813	0.9240

Mediante el análisis de componentes principales se busca crear componentes integrados cada uno de ellos por las variables originales, y que expliquen la variación del sistema. En este estudio han surgido trece componentes llamados PC1-PC13. En el Cuadro 7 solo se muestran los primeros seis componentes. El componente PC1 sintetiza la variación de los datos en un 53.95% mientras que el componente PC2 sintetiza el 11.07% de la variación; acumulando 65.02% entre estos dos componentes. De esta manera se genera una gráfica en dos dimensiones que sintetiza 65.02% de la variación de los datos de veintinueve variables inicialmente alimentadas. O en su defecto también se puede crear una gráfica en tres dimensiones que sintetice 75.07% de la variación en los datos. En una interpretación de PCA es recomendado sintetizar 80% de la variación del sistema y a la vez que este repartido en máximo tres ejes, es decir, tres componentes PC.

Este método estadístico muestra a las variables como vectores, las cuales pueden tener comportamientos similares a los componentes PC1, PC2 y PC3, y de esta manera interpretar como relacionar variables entre sí y a la vez con la variación del sistema expresado por los mismos componentes principales PC.

Los valores propios (eigenvalues) muestran que los PC1, PC2 y PC3 están por arriba del valor promedio, mientras que para PC4-PC13 los valores están por debajo del promedio de la variación (Figura 19). Esto parece robustecer el PCA ya que las nuevas variables PC1, PC2 y PC3 reflejan de manera confiable el comportamiento de las variables originales.

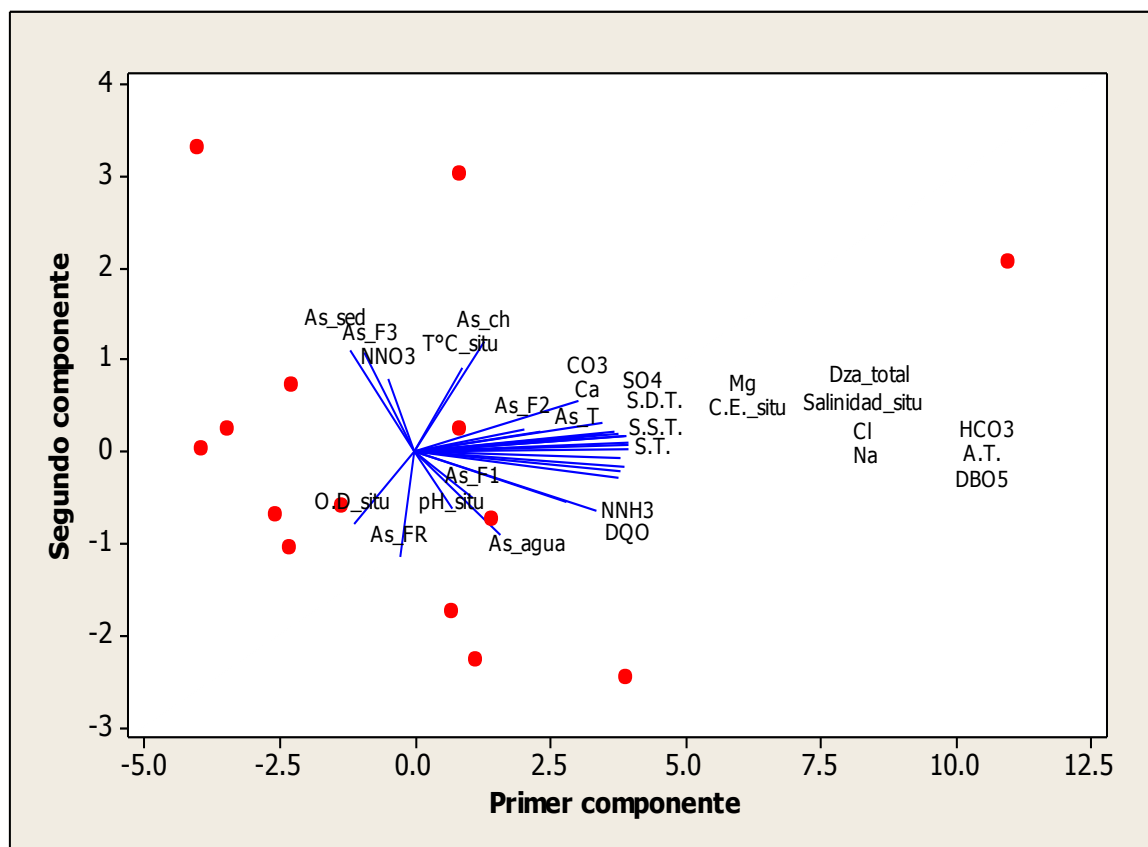


**Figura 19.** Eigenvalues y porcentaje de variación para el análisis de PCA.

El porcentaje de variación de los datos está sometido al método de la vara partida, donde PC1 PC2 y PC3 deben explicar más de la variación que pudiera darse por puro azar. Entonces en un buen modelo de porcentaje de variación se espera que los PC en los porcentajes de los valores propios (eigenvalues) sean mayores al modelo de la vara partida; lo que no sucede en el modelo. Solamente el PC1 explica un porcentaje mayor al que podría ser por azar, mientras que el resto de las variables explican menos de la variación que se da por azar. Por lo tanto los PC2-PC3 muestran porcentajes menores al modelo de la vara partida, entonces estos PC restantes carecen de confiabilidad.

El análisis de factores puede robustecer el análisis de componentes principales (PCA) cuando la variación de los datos es pobre y no alcanza 80% repartida en tres componentes. El PCA tiene demasiados componentes y es poco comprensible graficar en más de tres ejes.

Una proyección entre los sitios y las variables del sistema se muestra en la Figura 20. De una manera aislada se observa en la Figura 21 cómo existe relación entre algunas variables. Si los vectores están posicionados uno encima del otro, se puede entender que existe correlación o dependencia entre las variables. Para el caso de arsénico total en el sedimento (As sed) se observa que está relacionado con la fracción F3 del sedimento (As F3), y como ya se mencionó esta fracción forma parte de la fase no disponible (FND) y que está presente en mayor proporción. Por otra parte la cantidad de oxígeno disuelto (O.D.) es inversamente proporcional a la temperatura (T°C), los vectores se encuentran en dirección opuesta; si aumenta la temperatura disminuye la viscosidad del agua y por lo tanto el oxígeno no se solubiliza y escapa.



**Figura 20.** Doble proyección sitios-variables respecto a los componentes principales.

La fracción F1 del sedimento (As F1) tiene una correlación con la concentración de arsénico en agua (As agua), esto debido a que esta fase es soluble en agua y de fácil intercambio de arsénico en la superficie del sedimento. La concentración de arsénico en el charal (As Ch) parece estar correlacionada con la temperatura del agua (T°C). *Chirostoma jordani* se mueve en

---

la columna de agua y la temperatura es una variable importante en su ubicación, esta especie no emerge debido a que tiene depredadores que están en la superficie. *Chirostoma jordani* se alimenta del zooplancton el cual baja en la columna de agua por la incidencia de la luz solar. Por otra parte la concentración de arsénico en *Oreochromis niloticus* y *Oreochromis aureus* está ligada con un paquete de variables que involucran contenido de materia orgánica, tales como los sólidos disueltos totales, suspendidos totales, totales y menormente la demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO<sub>5</sub>).

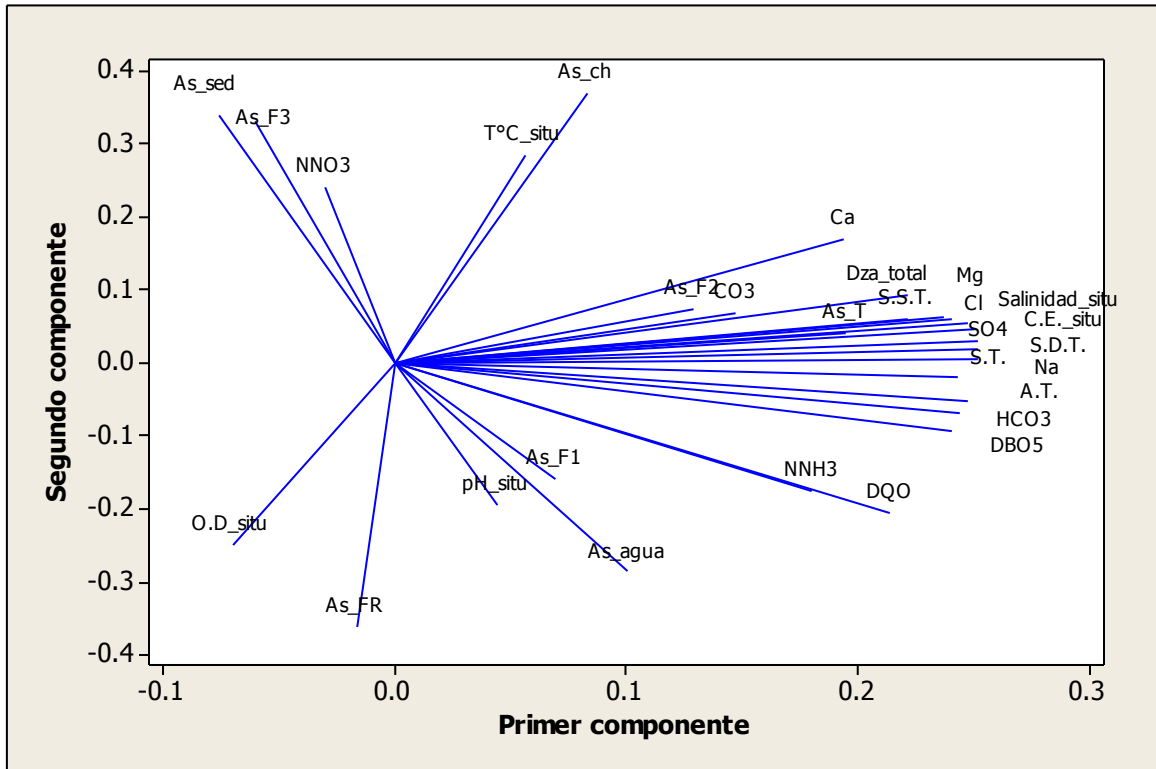
La fracción F2 en los sedimentos está ligada a los carbonatos, sólidos y componentes mayores (Figura 21) donde los vectores están relacionados. El pH una variable importante en la especiación de metales pesados tiene una tendencia a correlacionarse con la concentración de arsénico en agua y con el arsénico de fácil intercambio en los sedimentos (F1).

Cada componente (PC1 y PC2) tiene una orientación hacia una parte positiva o negativa (Figura 21). De manera aislada el arsénico total, la fracción 3 y la residual tienen un comportamiento en el componente 1 (PC1) opuesto al resto de las variables relacionadas con el arsénico; se interpreta una correlación positiva en variables relacionadas con al arsénico como lo son agua, fracción 1, fracción 2, *Chirostoma jordani* y *Oreochromis niloticus* y *aureus*.

Existe una relación entre los sitios y de la cual podemos deducir relaciones entre las campañas de muestreo (Figura 22). Aquí se encuentran representados los sitios por un punto naranja seguido de la abreviación ya conocida anteriormente; el número indica el mes en que se realizó el muestreo: (\_1) agosto, (\_2) diciembre, (\_3) marzo y (\_4) junio. Se observa que las características entre los sitios de cada campaña fueron muy parecidos. Existe una diferenciación en los muestreos dada por la temporada del año. Aunque AND\_2 muestra similitud con la campaña de marzo (tercera campaña), puede observarse claramente que pertenece a la nube de sitios de la segunda campaña. Por otra parte si existe una relación de SAP\_2 con la campaña de agosto (primera campaña) y de EQ\_1 con la campaña de diciembre (segunda campaña). En la parte baja de la misma figura se aprecia que la campaña del mes de marzo está desplazada de las dos primeras, debido a que comienza la temporada de estiaje y las condiciones en el ambiente cambian. Para el caso del último muestreo realizado en junio IRA es un sitio desligado de los



demás sitios en sus características en sus características del resto; sometido por los estragos de las sequias que se presentan en zonas del lago. IRA en el mes de junio es el único sitio tomado en cuenta para la relación de sitios; el resto carece de al menos uno de sus parámetros.

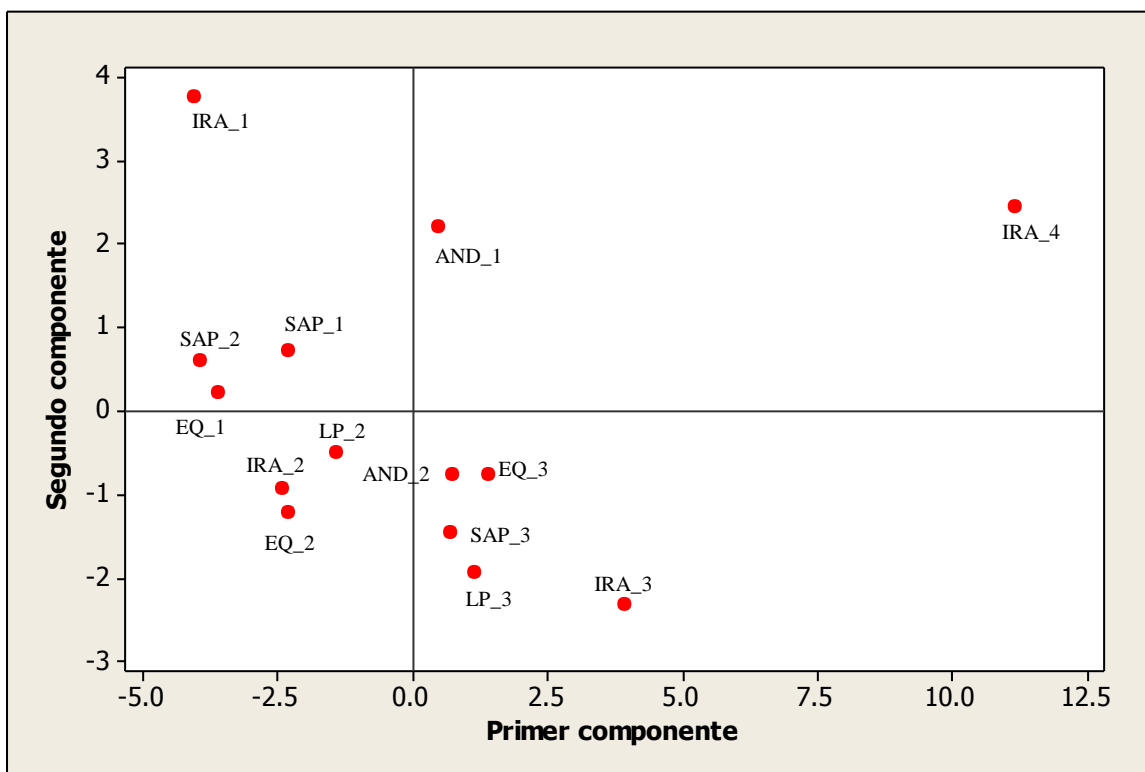


**Figura 21.** Relación entre las variables respecto de los componentes principales.

Los parte negativa y positiva del componente 1 (PC1) en la Figura 22 muestra una diferenciación entre la temporada del año. En la parte negativa de PC1 se ubica a los sitios de la campaña 1 (agosto) y campaña 2 (diciembre); aunque agosto pertenece a la temporada de lluvias y diciembre a la de estiaje las condiciones en el lago pueden mantenerse semejantes debido a que las lluvias se extienden hasta octubre o noviembre. Por otro lado la campaña 3 (marzo) y campaña 4 (junio) se ubican en los cuadrantes positivos del PC1 ya que las condiciones se mantienen muy similares entre las campañas; junio no pertenece a estiaje, pero las condiciones no han cambiado debido a que es inicio de lluvias por lo cual presenta similitud con la campaña de marzo. Aunque la campaña de junio pertenece a lluvias es la campaña más afectada por la sequía.

Es claro que la temporada influye en las condiciones del lago. Estas condiciones afectan las actividades recreativas y de pesca, lo que se traduce como afectación directa en la económica de toda la población que depende del lago. Por otra parte la flora, la fauna y la calidad del agua son de igual manera afectadas.

No existe una relación entre alguna variable con los sitios (Figura 20). Para el análisis no existe un gradiente en el que se perciba que algunos sitios están distribuidos a lo largo de algún vector; por lo tanto la interpretación de los datos se limita a un conjunto de sitios aglomerados por la temporada de muestreo y difícilmente relacionados con alguna variable.

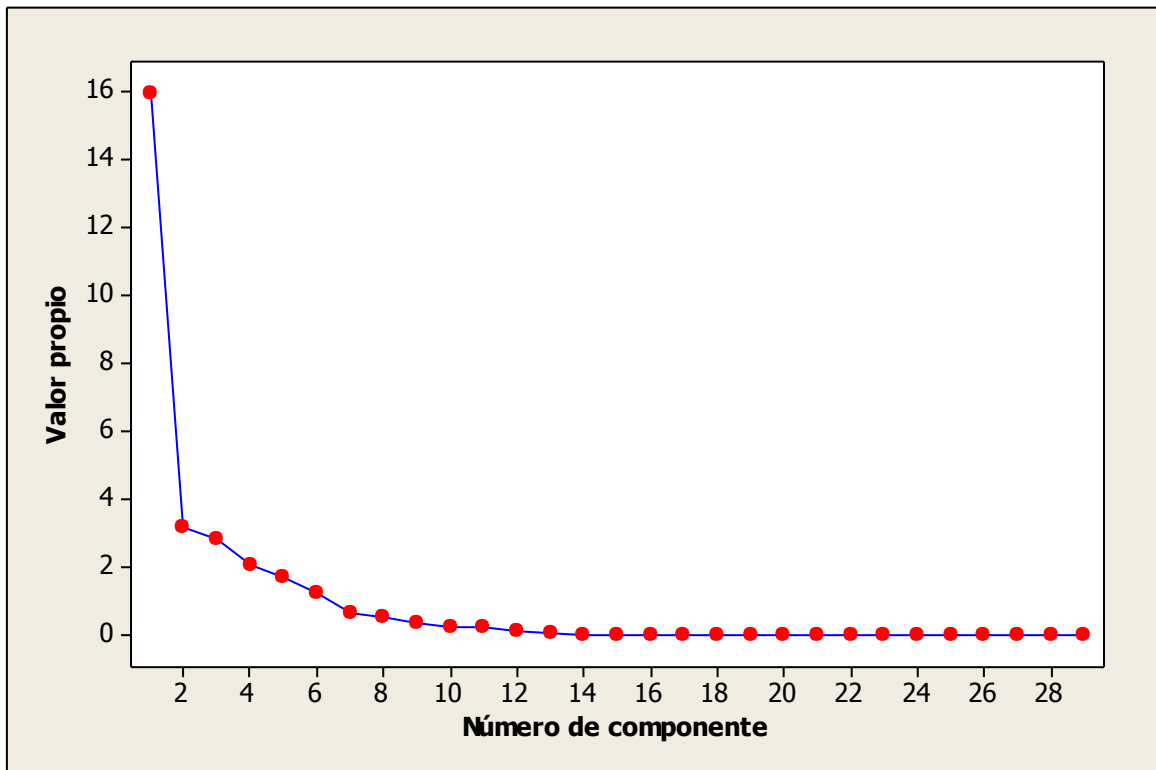


**Figura 22.** Relación entre sitios respecto de los componentes principales.

Los valores propios para cada componente se presentan en la Figura 23. Cada valor propio es la variación de todas las variables originales y el conjunto de valores propios es la variación total del sistema. Los valores propios también pueden ser representados como fracciones o porcentajes de la variación de los datos; son necesarios al momento de aplicar el análisis de factores y de esta manera robustecer el análisis estadístico. Para el caso de un análisis de factores

---

se recomienda explicar más del 80% de la variación. Usar cuatro factores conjunta el 82.37% de la variación. La Figura 23 conocida como gráfica de sedimentación muestra como los valores propios disminuyen hasta un valor de cero. El primer componente tiene un valor muy alto comparado con cualquiera del resto de los componentes lo que indica que representa gran parte de la variabilidad de los datos originales, en un segundo plano se espera que el segundo componente tenga un valor considerablemente grande respecto al resto de los componentes explicando de esta manera la variación restante de los datos que no está representada en el primer componente. En un caso ideal se espera que 80% de la variación esté expresada en los primeros tres componentes. Lo anterior no sucede en el PCA por lo que es necesario realizar un análisis de factores (FA).



**Figura 23.** Gráfica de sedimentación.

### 8.5.3 Análisis de factores (FA)

El análisis de factores crea nuevos factores en base al PCA, estos factores buscan empaquetar a las variables del sistema. De tal manera que cada paquete de variables está correlacionado y se interpreta que si una variable de ese paquete se modifica, de igual manera se

---

modifican todas. Este análisis busca afianzar la relación en las concentraciones de arsénico en *Oreochromis niloticus*, *Oreochromis aureus* y *Chirostoma jordani* con el resto de los parámetros físicos, químicos y biológicos.

Los resultados del análisis de factores se localizan en el Cuadro 8. En la parte sombreada se muestra el paquete de variables correspondiente a cada factor (aquellos con valores superiores a 0.8). Existen dos maneras de relacionar variables en un FA, una de ellas es entender el comportamiento de las variables como una correlación, es decir que las variables al relacionarse entre sí muestran un comportamiento similar o muy distinto entre ellas. Por otra parte también se entiende la relación entre las variables como variables dependientes y variables independientes.

El factor uno relaciona la concentración de arsénico determinada en la tilapia directamente con la materia orgánica, esto al incluir en el paquete de variables parámetros como DBO<sub>5</sub>, ST, SST, SDT, SO<sub>4</sub>. Este análisis concuerda con lo interpretado en el PCA; debido a los hábitos alimenticios de *Oreochromis* los sedimentos son una variable importante. Esta materia orgánica con la que se está correlacionando a la tilapia debe presentar pequeñas concentraciones de arsénico provenientes de la fracción F1 y F2 lo cual permite la acumulación. Esta acumulación como ya se mencionó varía de baja a intermedia. La explicación de las variables del factor dos es más compleja. Se entiende que estas variables están correlacionadas.

El factor dos correlaciona el pH del agua con la concentración de arsénico en la fracción residual del sedimento. De esta manera si las condiciones de pH en el lago cambiaran, la liberación de compuestos de arsénico podría darse, aunque se debe mencionar que lo anterior no sucede debido a que el lago se comporta como una solución buffer que amortigua los cambios en el pH del agua (Alfaro, 2010). Resulta poco sustentable pensar en estas dos variables como dependientes. Un lago es un sistema estable pero que presenta dinámica, esto lo hace un sistema complejo de entender en su totalidad. La correlación entre el pH y el arsénico en la fracción residual no indica que una variable provoque cambios en la otra, solamente se entiende su relación como una correlación en el comportamiento de la variabilidad y a su vez se interpreta que hay una o un grupo de variables que hacen que estas dos variables tengan la misma variabilidad.

---

Por otra parte el factor tres correlaciona la concentración de arsénico en charal con la concentración total de arsénico en sedimentos. Estas variables se pueden relacionar debido a que la temporada de lluvias provoca arrastre de arsénico desde zonas secas creando resuspensión de sedimentos. Estos sedimentos contienen arsénico disponible de las fracciones 1 y 2 que interactúan con la columna de agua donde los charales se localizan debido a sus hábitos alimenticios.

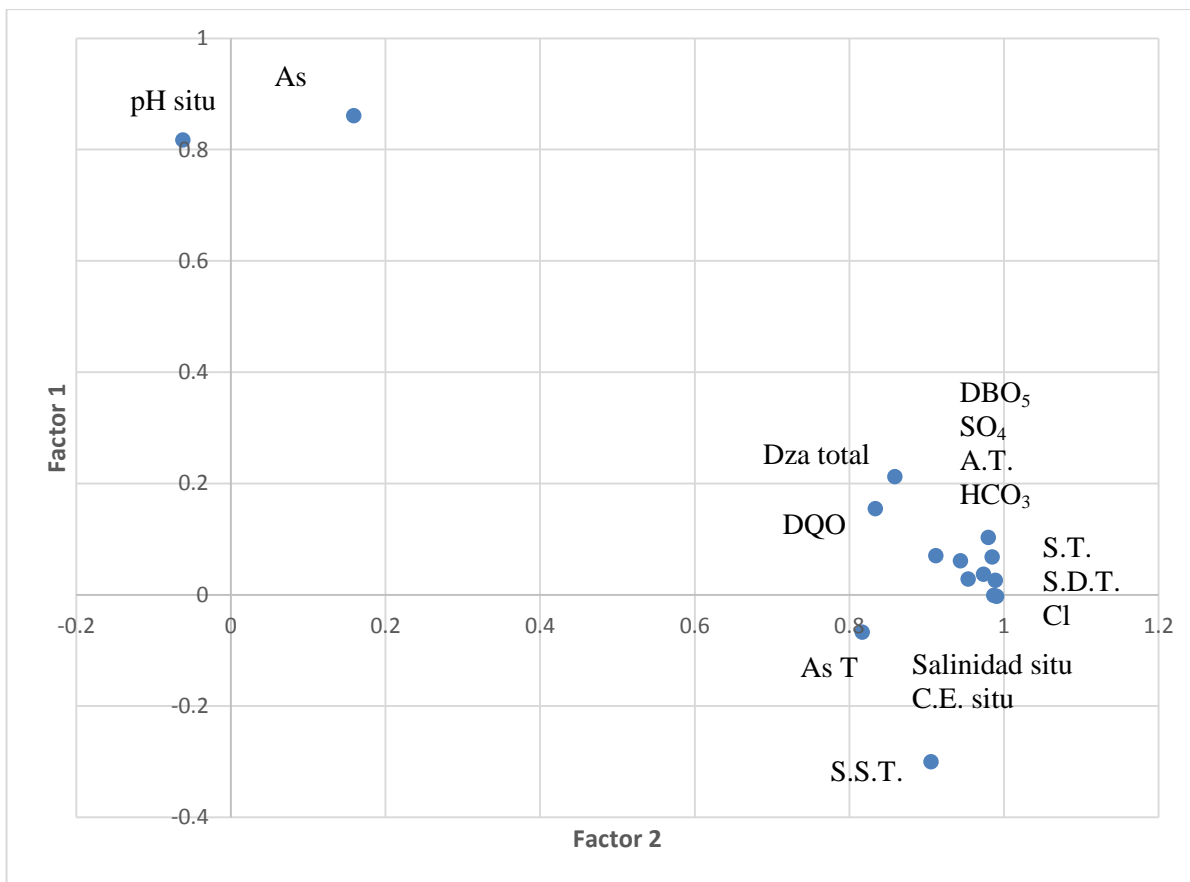
**Cuadro 8.** Resultados del análisis de factores (FA) realizado en Minitab 15.

<b>Cargas de factores rotados-rotación varimax</b>				
<b>Variable</b>	<b>Factor 1</b>	<b>Factor 2</b>	<b>Factor 3</b>	<b>Factor 4</b>
DQO	0.834	0.155	0.293	0.049
DBO <sub>5</sub>	0.944	0.061	0.153	0.071
SO <sub>4</sub>	0.912	0.07	-0.125	0.34
Dza_total	0.859	0.212	-0.263	0.097
A.T.	0.985	0.068	0.078	-0.025
HCO <sub>3</sub>	0.974	0.037	0.133	0.021
S.T.	0.991	-0.003	-0.011	0.109
S.S.T.	0.906	-0.3	0.096	0.067
S.D.T.	0.98	0.103	-0.048	0.12
Cl	0.954	0.028	-0.087	0.231
Salinidad_situ	0.987	-0.001	-0.061	0.122
C.E._situ	0.989	0.026	-0.045	0.109
As_T	0.817	-0.067	0.005	-0.054
As_FR	-0.062	0.817	0.218	-0.122
pH_situ	0.159	0.861	-0.185	-0.174
As_ch	0.334	-0.153	-0.786	-0.038
As_sed	-0.296	0.055	-0.786	-0.037
As_agua	0.329	0.689	0.116	0.302
T°C_situ	0.145	-0.286	-0.333	0.627
O.D_situ	-0.37	0.653	0.114	0.317
As_F1	0.188	0.146	0.295	0.794
As_F2	0.472	0.286	-0.363	0.553
As_F3	-0.256	-0.385	-0.574	0.401

En los meses de agosto y diciembre se presentaron las mayores concentraciones en los sitios de IRA y AND, sitios en donde las concentraciones de arsénico en *Chirostoma jordani* tienen un comportamiento similar. Por otra lado las concentraciones entre arsénico totales en sedimentos y *Chirostoma jordani* tienden a tener un comportamiento inverso en los sitios de LP, SAP y EQ.

El análisis de factores es un método estadístico robusto y complejo. Las variables presentan relación en su conjunto. Elegir el número de factores en este método puede alterar el

contenido de variables en cada factor. Debe resultar claro que el PCA está íntimamente relacionado con el FA debido a que el porcentaje en la variación de los datos está dada por el número de componentes. De esta manera el número de componentes principales que explican la variación del sistema debe ser el elegido en el número de factores. Cambiar el número de factores puede alterar el acomodo de las variables y por lo tanto su interpretación.



**Figura 24.** Cargas de factores rotados-rotación varimax.

---

## CONCLUSIONES

El arsénico en el agua tiene como especie dominante al arsénico (V) en forma de  $\text{HAsO}_4^-$  en todos los sitios.

Las concentraciones de arsénico total en sedimentos (CCME, 2002) y agua (DOF 2001a NOM-127) superan las concentraciones recomendadas y de efecto probable en la mayoría de los sitios.

Las concentraciones en los organismos son menores en todos los sitios a los límites recomendados por la comisión europea (CCE, 2006).

El arsénico está en concentraciones disponibles bajas comparadas con el arsénico total del sedimento. Estas concentraciones son suficientes para favorecer la acumulación. El arsénico está interactuando con la materia orgánica lo que provoca una especiación organometálica y con esto disminuyendo la toxicidad del metaloide. Es posible que exista dilución del metaloide en los organismos biológicos lo que provoca decremento en el orden de biomagnificación en la cadena trófica.

Los factores de acumulación son bajos e intermedios por lo que se recomienda su monitoreo, ya que la intoxicación por ingesta de arsénico puede ser crónica. La talla en las especies puede afectar la acumulación. La acumulación de arsénico en las tres especies de estudio depende de los parámetros físicos y químicos, así como de la eutroficación del lago.

El análisis estadístico muestra que *Oreochromis niloticus* y *Oreochromis aureus* están relacionados con la materia orgánica y rica en componentes mayores, mientras que *Chirostoma jordani* parece tener una relación con el arsénico total en el sedimento.



---

Las concentraciones de arsénico totales determinadas en las tres especies de peces, agua y sedimentos mantienen un comportamiento similar en cada muestreo. Por lo tanto, se pueden relacionar variaciones en la concentración de arsénico en *Chirostoma* con variaciones en las concentraciones de arsénico en la columna de agua.

El arsénico en el agua se concentra en estiaje (diciembre y marzo). En los sedimentos la concentración total de arsénico aumenta en el mes de diciembre. La concentración de arsénico en charales tiende a ser mayor en agosto y junio (temporada de lluvias), mientras que para la tilapia solamente en el mes de junio.

La fase de fácil intercambio (F1) en los sedimentos incrementa en la temporada de lluvias por lo cual incrementa la fase disponible. Las concentraciones de arsénico incrementan en las especies de estudio en los mismos meses. La precipitación pluvial provoca arrastre de arsénico desde zonas antes secas y resuspensión en zonas del lago con poca profundidad.

Los niveles de arsénico en los organismos se encuentran por encima de los niveles naturales en peces, pero por debajo de la normatividad (CCE, 2006).

---

## RECOMENDACIONES

La ingesta de especies de peces del lago debe ser monitoreada, por lo cual determinar las concentraciones de arsénico en peces incrementando el número de muestreos. Existe abundancia de peces en temporada de precipitación pluvial lo que robustece el análisis estadístico.

La especiación química en el contenido de peces aporta información sobre la toxicidad por ingesta. Es importante tomar en cuenta la talla de los organismos de estudio así como otros organismos de valor comercial (*Goodea atripinis*) en el lago.

Se recomienda determinar relaciones de biomagnificación para valorar las concentraciones de arsénico en la cadena trófica.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 spring and Wells around Cuitzeo Lake, Lerma River Basin, México.** *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. Centro interamericano de recursos del agua-facultad de ingeniería, Universidad Autónoma del estado de México.
- APHA-AWWA-WPCF (1998). **Methods for the examination of water, 19<sup>a</sup> Edition, American Public Health Association (APHA). American Water Works Association (AWWA), Water Pollution Control Federation (WPCF). USA.**
- Azizur M. y Hasegawa H. (2012). **Arsenic in freshwater systems: Influence of eutrophication on occurrence, distribution, speciation, and bioaccumulation.** *Applied Geochemistry* 27 (2012) 304–314.
- BCR (1997). **Three-step sequential extraction procedure—CRM 601, European Commission BCR Information Reference Materials, Luxembourg, EUR 17554 EN, 1997.**
- Bello, J. y López de Cerain, A. (2001). **Fundamentos de Ciencia Toxicológica.** Editorial Díaz de Santos. España.
- CCME. Canadian Council of ministers of the Environment (2002). **Canadian Environmental Quality Guidelines;** updated 2002.
- CCE. Commission des Communautés Européenne (2006). **Journal officiel de l'Union Européenne,** 20.12.2006,L364/5-L364/24 Bruxelles, 24p.
- Chapra C. Steven (1997). **Surface water-Quality modeling.** McGraw Hill. Estados Unidos.
- Chen C. Y., Pickhardt P.C., Xu M.Q., Folt C.L. (2008). **Mercury and Arsenic Bioaccumulation and Eutrophication in Baiyangdian Lake, China.** *Water Air Soil Pollut* (2008) 190:115-127.

- 
- Ceballos C.J.G.A., Ortega M. M. R., Medina N. M., Martínez T. M. y Rodríguez J.L.S (1994). **Análisis limnológico del lago de Cuitzeo, Michoacán, México**. Secretaria de Difusión Cultural Editorial Universitaria.
  - Censi. P., Spoto S.E., Saiano F., Sprovieri. M., Mazzola S., Nardone G., Di Geronimo S. I., Punturo R. y Ottonello D. (2006). **Heavy metals in coaster water systems**. A case study from northwestern gulf of Thailand. Elsevier 64 (7), 1167-1176 pp.
  - CONABIO (2002). Recursos hídricos principales 62. **Pátzcuaro y cuencas endorréicas cercanas**. Consejo Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad.
  - DOF. (1980a). Diario Oficial de la Federación. **NMX-AA-014-1980**. Lineamientos generales y recomendaciones para el muestreo en cuerpos receptores de aguas superficiales, excluyendo aguas estuarias y aguas marinas, con el fin de determinar sus características físicas, químicas y tóxicas.
  - DOF. (1980b). Diario Oficial de la Federación. **NMX-AA-017-1980**. Aguas. Determinación de color. México.
  - DOF. (1981). Diario Oficial de la Federación. **NMX-AA-074-1981**. Análisis de agua- Determinación del ion sulfato. México.
  - DOF. (1994). Norma Oficial Mexicana **NOM-112-SSA1-1994**. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable.
  - DOF. (1995). Norma Oficial Mexicana **NOM-117-SSA1-1994**, bienes y servicios. Métodos de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica.
  - DOF. (2000a). Norma Oficial Mexicana **NOM-021-RECNAT-2000**. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio muestreo y análisis.
  - DOF. (2001a). Diario Oficial de la Federación. Modificación del 2001. **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). Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana. **NMX-AA-038-SCF1-2001**. Análisis de agua-determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. México.
  - DOF. (2001c). Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana. **NMX-AA-030-SCF1-2001**. Análisis de agua-determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México.
  - DOF. (2001d). Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana. **NMX-AA-028-SCF1-2001**. Análisis de agua-determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México.
  - DOF. (2001e). Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana. **NMX-AA-029-SCF1-2001**. Análisis de agua-determinación de fosforo en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México.
  - DOF. (2001f). Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana. **NMX-AA-036-SCF1-2001**. Análisis de agua-determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México.
  - DOF. (2001g). Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana. **NMX-AA-072-SCF1-2001**. Análisis de agua-determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México.
  - DOF. (2001h). Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana. **NMX-AA-034-SCF1-2001**. Análisis de agua-determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México.
  - DOF. (2001i). Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana. **NMX-AA-073-SCF1-2001**. Análisis de agua-determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México.
  - DOF. (2001j). Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana. **NMX-AA-079-SCF1-2001**. Análisis de agua-determinación de nitratos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México.

- 
- DOF. (2001k). Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana. **NMX-AA-051-SCF1-2001**. Análisis de agua-determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México.
  - EPA (2001). Technical Manual. **Methods for Collection, Storage manipulation of Sediments for and Toxicological Analyses**, Environmental Protection Agency U.S.A.
  - Harikumar P. S., Nasir U. P. y Mujeebu M. P. (2009). **Distribution of heavy metals in the core sediments of a tropical wetland system**. Sci Tech 6 (2), 226-231 pp.
  - Herrera M. A. (2007). **Evaluación de metales pesados y arsénico en agua y sedimentos del lago de Cuitzeo**. Tesis de Licenciatura. Facultad de biología. UMSNH.
  - Huaranga M. F, Méndez G. M., Quilcat L. V. y Huaranga A. F. (2012). **Contaminación por metales pesados en la Cuenca del Río Moche, 1980 – 2010, La Libertad – Perú**. Scientia Agropecuaria 3(2012) 235 - 247
  - Inengite A. K., Ofork N. C. y Osuji C. L. (2010). **Survey of heavy metals in sediments of Kolo creek in the Niger Delta, Nigeria**. African Journal of Environmental Science and Technology Vol. 4(9), 558-566 pp.
  - Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <http://inegi.gob.mx/> (Accesada en Octubre de 2011).
  - Israde-Alcántara, I. (1999). **Los lagos volcánicos y tectónicos de Michoacán**. Carta geológica de Michoacán Escala 1:250000, 1ª edición, Editores Corona-Chávez P. e Israde Alcántara I., Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
  - Israde-Alcántara I. (2000). **Análisis de metales pesados en el lago de Pátzcuaro, Mich, México**. 20 pp.
  - Israde-alcántara I., Garduño Monroy V. H., y Ortega Murillo R. (2002). **Paleoambiente lacustre del Cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo**. Hidrobiológica.
  - Jernstrom J., Lehto J., Dauvalter V. A., Hatakka A., Leskinen A. yPaatero J. (2009). **Heavy metals in bottom sediments of Lake Umbozero in Murmansk Region, Rusia.**, 161, 93-105 pp.

- 
- Jian-feng P., Yong-hui S., Peng Y., Xiao-yu C. y Guang-lei Q. (2008). **The remediation of heavy metals contaminated sediment.** Journal of Hazardous Materials 161, 633–640 pp.
  - Mateos D. L (2012). **BAÚL DE LA CIENCIA “El arsénico, ese conocido tan desconocido”** Área de Microbiología. Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales de la Universidad de León. Ambiociencias- revista de divulgación científica 2012. 41-53 pp.
  - Meador J. P., Ernest D. W. y Kagley A. (2004). **Bioaccumulation of arsenic in marine fish and invertebrates from Alaska and California.** Arch. Environ. Contam. Toxicol. 47, 223-233 (2004).
  - Metcalf y Eddy Inc. (1994). **Wastewater Engineering Treatment, disposal and reuse.** McGraw Hill. Estados Unidos.
  - Molina C.I., Ibañez C. y Gibon F.M. (2012). **Proceso de biomagnificación de metales pesados en un lago hiperhalino (Poopó, Oruro, Bolivia): Posible riesgo en la salud de consumidores.** Ecología en Bolivia 47(2): 99-118.
  - Moreno Z. C. O. (2003). **Distribución de metales en el lago de Pátzcuaro, Michoacán, México.** Tesis de Maestría. Fac. de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 217 pp.
  - Öztürk M., Özözen G., Minareci O y Minareci E. (2009). **Determination of heavy metals in fish, water and sediments of Avsar Dam lake in Turkey.** Sci .Eng 6 (2), 73-80 pp.
  - Oseguera F.L. (2011). **Calidad del agua y sedimentos con diferente grado de dragado en el lago de Pátzcuaro.** Tesis de Maestría. Fac. de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 165 pp.
  - Páez A. (2008). **Evaluación de la concentración de arsénico y calidad del agua subterránea en función de su manejo en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán.** Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. UMSNH, México.
  - Pedraza I. (2007). **Dinámica población bacteriana en el lago de Cuitzeo, Michoacán, México,** Tesis de Maestría en Conservación y Manejo de los recursos Naturales, Facultad de Biología, U.M.S.N.H.

- 
- Rauret G., López-Sánchez J. F., Sahuquillo A., Rubio R., Davidson C., Ureb A. and Quevauviller Ph. (1998). **Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials.** J. Environ. Monit., 1999, 1, 57–61.
  - Revenga J.E., Campbell L.M., Arribére M.A. y Ribeiro G. S. **Arsenic, cobalt and chromium food web biodilution in a Patagonia mountain lake.** Ecotoxicology and Environmental Safety 81(2012)1–10.
  - Rizzo A., Daga R., Aragni M., Perez S., Bubach D., Sánchez R., Ribeiro S. y Arribére M. (2010). **Concentraciones de metales pesados en distintos compartimentos de lagos andinos de Patagonia Norte.** Ecología Austral 20,155-171 pp.
  - Rodier, J. (1998). **Análisis de las aguas. Aguas naturales, aguas residuales, agua de mar.** Editorial Omega, España.
  - Segovia N., Barragán., R. M., Tello E., Alfaro R., Mena M., Pullinets S. y Leyva A. (2005). **Geochemical exploration at Cuitzeo basin geothermal zone.** Journal Applied Sciences, 5 (9): 344-349.
  - Siriporn P., Manasawan S. P. **Arsenic Cadmium and Lead Concentrations in Sediment and Biota from Songkhla Lake.** PSU-USM International Conference on Art and Sciences 2012 "Transforming Research for Sustainable Community".
  - Stancheva M., Makedonski L. y Petrova E. **Determination of heavy metals (Pb, Cd, As and Hg) in Black Sea grey mullet (mugil cephalus).** Bulgarian Journal of Agricultural Science, 19 (Supplement 1) 2013, 30–34.
  - Trasande L., J.E. Cortes, P.J. Landrigan, M.I. Abercrombie, R.F. Boop y E. Cifuentes (2010). **Methylmercury exposure in a Subsistence Fishing Community in Lake Chapala, Mexico: an Ecological Approach.** Environmental Health 9:1.
  - Uaboi- Egbenni P. O., Okolie P. N. Martins O y Teniola O. (2010). **Studies on the occurrence and distribution of heavy metals in sediments in Lagos Lagoon and their effects on benthic microbial population.** African Journal of Environmental Science & Technology Vol. 4(6), 343-351 pp.



- 
- USEPA.(2003). **Technical summary of information available on the bioaccumulation of arsenic in aquatic organisms.** United States Environmental Protection Agency. EPA-822-R-03-032.
  - Vieira C., Morais S., Ramos S., Delerue-Matos C., Oliveira M. B. P. P.,(2010). **Mercury, cadmium, lead and arsenic levels in three pelagic fish species from the Atlantic Ocean: Intra-and inter-specific variability and human health risk for consumption.** Food and Chemical Toxicology 49 (2011) 923-932.
  - Vital R. B. (2011). **Hábitos alimenticios del género *Chirostoma* del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México.** Tesis de Maestría. Fac. de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 94 pp.
  - Villalobos C. B., Alfaro C. R., Cortés M. R., Márquez B. L. (2010). **Distribution and partitioning of iron, zinc and arsenic in surface sediment in the Grade River mouth to Cuitzeo Lake, México.** Environ. Monit. Assess. DOI 10.1007/s10661-009-1005-7.
  - Wang S. L., Lin C. Y., Cao X. Z y Zhong X. (2012). **Arsenic content, fractionation, and ecological risk in the surface sediments of lake.** Int. J. Environ. Sci. Technol. (2012) 9:31–40.

---

**ANEXO A: Cuadros de los parámetros obtenidos en organismos, agua y sedimentos.**

**Cuadro A1.** Concentraciones de arsénico en *Oreochromis niloticus* y *Oreochromis aureus* (As T) y *Chirostoma jordani* (As Ch). Las unidades están expresadas ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) en los seis sitios de estudio.

Sitio	Muestreo	As Ch	As T
IRA	agosto	1.452358	0.1817
	diciembre	0.786722	0.468988
	marzo	0.613234	0.455236
	junio	1.17370667	2.09204667
AND	agosto	1.697064	0.17702
	diciembre	0.845584	0.59339
	marzo	0.910642	-
	junio	-	-
EQ	agosto	0.201005	0.157715
	diciembre	0.520294	0.80531
	marzo	0.752644	0.461432
	junio	-	-
LP	agosto	-	0.11852
	diciembre	0.436648	0.771232
	marzo	0.644214	0.54198
	junio	-	-
SAP	agosto	0.613234	0.17819
	diciembre	0.281748	0.470726
	marzo	0.926132	0.346806
	junio	0.99169333	1.106308
CAP	agosto	-	-
	diciembre	-	-
	marzo	-	-
CCE-recomendado		2.5	2.5

- no existe muestra.

**Cuadro A2.** Concentraciones de arsénico en agua (As agua) en  $\mu\text{g L}^{-1}$  en los seis sitios de estudio.

<b>Sitio</b>	<b>Muestreo</b>	<b>As agua</b>
<b>IRA</b>	agosto	21.234
	diciembre	24.7212
	marzo	87.3466
	junio	30.214
<b>AND</b>	agosto	21.4808
	diciembre	63.6998
	marzo	69.9978
	junio	54.0412
<b>EQ</b>	agosto	10.8862
	diciembre	46.70224
	marzo	28.3762
	junio	85.8108
<b>LP</b>	agosto	50.624
	diciembre	29.39238
	marzo	48.3118
	junio	78.3648
<b>SAP</b>	agosto	19.1083
	diciembre	14.15276
	marzo	28.4846
<b>CAP</b>	agosto	20.2919
	diciembre	48.95368
	marzo	93.8524
DOF 2001a		25

**Cuadro A3.** Concentraciones de arsénico en sedimento total (As sed), fracción 1 (As F1), fracción 2 (As F2), fracción 3 (As F3), fracción residual (As FR). Las unidades están expresadas en mg kg<sup>-1</sup> para sedimentos y fracciones del sedimento en los seis sitios de estudio.

<b>Sitio</b>	<b>Muestreo</b>	<b>As sed</b>	<b>As F1</b>	<b>As F2</b>	<b>As F3</b>	<b>As FR</b>
<b>IRA</b>	agosto	17.33175	0.111188	0.284676	1.034392	0.22875775
	diciembre	9.7159	0.3357552	0.3419512	0.201285	0.21963175
	marzo	6.19464	0.5030368	0.3419512	0.230716	0.20670325
	junio	9.1502	0.2378293	0.472792	0.188466	0.274768
<b>AND</b>	agosto	15.459	0	0.179344	0.3328625	0.20898475
	diciembre	15.7087	0.0271944	0.315928	0.143972	0.22571575
	marzo	7.756032	0.0148024	0.6528568	0.029346	5.158387
	junio	4.1862	0.0812768	1.0419973	0.114006	3.7463335
<b>EQ</b>	agosto	4.83203	0.21013	0.15456	0.3197	4.736394
	diciembre	17.28344	0.1325264	0.3828448	0.258598	2.31919307
	marzo	7.136432	0.1077424	0.3506256	0.230716	3.21059093
	junio	3.938	0.1021256	0.5290507	0.249275	2.77026187
<b>LP</b>	agosto	5.9883333	0.12004	0.12358	0.1836875	3.28576907
	diciembre	5.75888	0.0333904	0.0941112	0.043287	2.79174133
	marzo	3.4684	0.0160416	0.1213736	0.02315	2.98505653
	junio	17.318858	0.0889093	0.2907787	0.130139	2.46954933
<b>SAP</b>	agosto	15.12286	0.10951	0.111188	0.047675	2.7810016
	diciembre	15.92032	0.0346296	0.0532176	0.066522	1.19152107
	marzo	5.996368	0.0817192	0.068088	0.075816	0.866866
<b>CAP</b>	agosto	6.4427067	0.13057	0.1647733	0.275825	1.286324
	diciembre	14.74308	0.0569352	0.0420648	0.095953	0.866866
	marzo	6.492048	-	0.0891544	0.030895	0.447408
CCME-recomendado		5.9				
CCME-efecto		17				

- no existe muestra.

**Cuadro A4.** Concentración de arsénico en sedimentos de la fase disponible (FD) y fase no disponible (FND) en  $\text{mg kg}^{-1}$  para los seis sitios de estudio.

<b>Sitio</b>	<b>Muestreo</b>	<b>FD</b>	<b>FND</b>
IRA	agosto	0.395864	16.935886
	diciembre	0.6777064	9.0381936
	marzo	0.844988	5.349652
	junio	0.71062133	8.43957867
AND	agosto	0.255624	15.203376
	diciembre	0.3431224	15.3655776
	marzo	0.6676592	7.0883728
	junio	1.12327413	3.06292587
EQ	agosto	0.36469	4.46734
	diciembre	0.5153712	16.7680688
	marzo	0.458368	6.678064
	junio	0.63117627	3.30682373
LP	agosto	0.24362	5.74471333
	diciembre	0.1275016	5.6313784
	marzo	0.1374152	3.3309848
	junio	0.379688	16.981032
SAP	agosto	0.220698	14.902162
	diciembre	0.0878472	15.8324728
	marzo	0.1498072	5.8465608
CAP	agosto	0.29534333	6.14736333
	diciembre	0.099	14.64408
	marzo	0.0891544	6.4028936

**Cuadro A5.** Porcentaje de arsénico en sedimentos de la fase disponible (FD) y fase no disponible (FND) en los seis sitios de estudio.

Sitio	Muestreo	Porcentaje FD	Porcentaje FND
IRA	agosto	23.86	76.14
	diciembre	11.23	88.77
	marzo	19.37	80.63
	junio	40.24	59.76
AND	agosto	31.63	68.37
	diciembre	8.11	91.89
	marzo	19.14	80.86
	junio	44.51	55.49
EQ	agosto	40.93	59.07
	diciembre	9.35	90.65
	marzo	12.48	87.52
	junio	36.12	63.88
LP	agosto	34.70	65.30
	diciembre	5.12	94.88
	marzo	5.22	94.78
	junio	39.67	60.33
SAP	agosto	46.23	53.77
	diciembre	2.61	97.39
	marzo	4.98	95.02
CAP	agosto	37.06	62.94
	diciembre	3.34	96.66
	marzo	6.80	93.20

**Cuadro A6.** Parámetros del agua *in situ*: Salinidad, temperatura (T°C), pH, oxígeno disuelto (O.D.) y conductividad eléctrica (C.E.) en los seis sitios de estudio.

Sitio	Muestreo	Salinidad (%)	T°C °C	pH	O.D. mg L <sup>-1</sup>	C.E. μS cm <sup>-1</sup>
IRA	agosto	0.3	22.9	8.5	2.7	534
	diciembre	0.5	18.5	9.6	4.9	1080
	marzo	1.6	24.3	9.15	7.2	3090
	junio	3.2	30	8.88	1.6	5850
AND	agosto	1.2	30.4	9.52	5.6	2360
	diciembre	1.2	24.9	9.72	7.7	2230
	marzo	1.7	15.5	9.37	5.51	3200
	junio	3	24	9.4	3.75	5590
EQ	agosto	0.3	33.6	8.67	6.7	568
	diciembre	0.6	22	9.44	7.18	1246
	marzo	1.2	27	9.36	6.83	2270
	junio	*	35.3	9.37	2.68	5420
LP	agosto	1.1	32.5	9.2	7.4	2270
	diciembre	0.7	15.6	8.93	3.7	1487
	marzo	1.1	13.7	9.4	4.62	2170
	junio	6.7	20.9	9.53	3.11	1182
SAP	agosto	0.6	28.1	8.95	6.8	1218
	diciembre	0.4	18.9	8.7	4.5	740
	marzo	1	18.9	9.23	5.48	2000
CAP	agosto	7.5	27.9	9.53	4.3	13030
	diciembre	4.1	17	9.61	3.61	7420
	marzo	10.4	14.8	9.91	5.22	17750

\* no detectado por el equipo.

**Cuadro A7.** Valores de DQO, DBO<sub>5</sub>, dureza total (Dza total), alcalinidad total (A.T), sólidos totales (S.T.), sólidos suspendidos totales (S.S.T.) y sólidos disueltos totales (S.D.T.) en mg L<sup>-1</sup> en los seis sitios de estudio.

Sitio	Muestreo	DQO	DBO <sub>5</sub>	Dza total	A.T.	S.T.	S.S.T.	S.D.T.
IRA	agosto	26	16	147.82	132	440	46	394
	diciembre	36	20	295.77	286	774	28	746
	marzo	90	50	435.34	718	2576	280	2296
	junio	100	70	783.76	1346	5004	1233	3771
AND	agosto	50	33	416.59	484	1818	92	1726
	diciembre	45	30	602.01	552	1690	16	1674
	marzo	90	48	435.34	660	2142	425	1717
	junio	104	68	572.69	1380	4612	820	3792
EQ	agosto	30	18	127	130	456	84	372
	diciembre	42	25	229.08	338	944	14	930
	marzo	83.3	44	341.4	656	1928	200	1728
	junio	105	68	530.48	1110	4226	600	3626
LP	agosto	46	30	362.39	442	1764	138	1626
	diciembre	38	22	318.67	414	1040	30	1010
	marzo	80.3	42.67	243.42	628	2084	475	1609
	junio	100	60	1336.18	1580	9296	573	8723
SAP	agosto	36	23	274.95	300	944	146	798
	diciembre	35	23	156.15	270	572	36	536
	marzo	86.6	45.3	283.82	720	1572	179	1393
CAP	agosto	40	26	845.67	2810	8638	316	8322
	diciembre	40	25	799.93	1750	4914	40	4874
	marzo	80.6	44	1234.34	4540	14028	325	13703
DOF 2001a				500				1000
DOF 1996 riego			150				125	
DOF 1996 uso público			60				60	
DOF 1997			20				20	



**Cuadro A8.** Concentraciones de iones calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) en ( $\text{meq L}^{-1}$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) en  $\text{mg L}^{-1}$  en los seis sitios de estudio.

Sitio	Muestreo	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{Cl}^-$
IRA	agosto	57.57	34.20828	15.157285	56.44045	64.57
	diciembre	87.95	34.20828	15.157285	56.44045	82.57
	marzo	303.66	80.32032	57.03126	482.79	327.27
	junio	444.9	127.518528	113.024483	754.78469	522.53
AND	agosto	206.55	108.53664	35.39536	330.41228	228.94
	diciembre	185.57	108.53664	35.39536	330.41228	206.74
	marzo	318.84	81.939552	68.157947	485.176362	375.34
	junio	443.75	120.24	66.1949145	835.77846	408.52
EQ	agosto	62.77	28.37664	13.650065	66.02728	53.53
	diciembre	100	28.37664	13.650065	66.02728	87.69
	marzo	176.77	77.121936	48.301539	332.84922	204.81
	junio	447.24	125.658816	52.6663995	772.385834	503.53
LP	agosto	243.1	75.12996	42.46957	313.97443	207.45
	diciembre	88.18	75.12996	42.46957	313.97443	118.81
	marzo	142.13	47.526864	30.304846	366.350248	191.01
	junio	873.51	303.109008	137.122986	1852.83537	1415.1
SAP	agosto	112.08	58.43664	31.347745	147.25095	101.84
	diciembre	15.83	58.43664	31.347745	147.25095	43.55
	marzo	85.39	53.234256	36.654618	315.60672	115.41
CAP	agosto	524.17	188.65656	91.01664	1971.33273	825.9
	diciembre	618.54	145.10964	106.295475	1188.90486	522.36
	marzo	1097.98	291.085008	123.33557	3200.84942	1518.87
DOF 2001a		400			200	250
DOF 1996 riego						
DOF 1996 uso público						

**Cuadro A9.** Concentraciones de iones carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), nitrógeno de nitratos ( $\text{N-NO}_3$ ) y nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ) en  $\text{mg L}^{-1}$  en los seis sitios de estudio.

Sitio	Muestreo	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{N-NO}_3$	$\text{N-NH}_3$
IRA	agosto	0	132	0.466	1.008
	diciembre	60	226	0.897	0.616
	marzo	88	630	0.239	3.6
	junio	132	1214	0.485	3.808
AND	agosto	216	268	0.736	0.85
	diciembre	96	456	0.897	0.616
	marzo	120	540	0.312	3.488
	junio	120	1180	0.261	2.36
EQ	agosto	20	110	0.31	1.456
	diciembre	60	278	0.333	0.616
	marzo	88	568	0.23	1.288
	junio	120	990	0.255	1.8
LP	agosto	112	330	1.011	0.65
	diciembre	68	346	0.316	0.224
	marzo	100	528	0.268	3.092
	junio	360	2220	0.2121	1.168
SAP	agosto	80	220	0.368	0.85
	diciembre	52	218	0.736	0.28
	marzo	120	600	0.2	3.608
CAP	agosto	1200	1610	0.695	0.45
	diciembre	600	1150	0.132	0.2
	marzo	1200	3340	0.559	0
DOF 2001a				10	0.5
DOF 1996 riego					
DOF 1996 uso público					

**Cuadro A10.** Valores de pH en sedimento para el muestreo de agosto en los seis sitios de estudio.

<b>Sitio</b>	<b>pH</b>
IRA	7.9
AND	8.86
EQ	8.98
LP	9.01
SAP	8.11
CAP	10.18

**Cuadro A11.** Color de las muestras de sedimento.

<b>Muestra</b>	<b>Determinación</b>	<b>Matiz (Hue)</b>	<b>Brillo (Value)</b>	<b>Intensidad (Chroma)</b>	<b>Color</b>
<b>IRA</b>	húmedo	10YR	2/	1	negro
	seco	2.5 Y	5/	1	gris
<b>AND</b>	húmedo	2.5 Y	3/	2	café-gris muy oscuro
	seco	10YR	7/	1	gris claro
<b>EQ</b>	húmedo	10YR	3/	1	gris muy oscuro
	seco	2.5 Y	6/	1	gris
<b>LP</b>	húmedo	10YR	4/	1	gris oscuro
	seco	10YR	6/	1	gris
<b>SAP</b>	húmedo	10YR	3/	1	gris muy oscuro
	seco	2.5 Y	5/	2	café-gris
<b>CAP</b>	húmedo	10YR	3/	2	café-gris muy oscuro
	seco	10YR	6/	2	gris-café claro

---

**Cuadro A12.** Distribución de tamaño de partícula y clase textural en sedimentos.

<b>Muestra</b>	<b>% arenas</b>	<b>% limos</b>	<b>% arcillas</b>	<b>Clase textural</b>
<b>IRA</b>	28.20	56.75	15.05	arcilla
<b>AND</b>	17.93	59.65	22.42	arcillo limoso
<b>EQ</b>	36.82	47.71	15.47	arcilla
<b>LP</b>	11.26	65.35	23.39	franco arcillo limoso
<b>SAP</b>	8.66	59.50	31.84	arcillo limoso
<b>CAP</b>	24.31	50.75	24.94	arcilla