



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

DOCTORADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

MODALIDAD TRADICIONAL

TESIS

MOVILIDAD Y TOXICIDAD POR METALES EN SEDIMENTOS Y
SUELOS ALEDAÑOS A AFLUENTES DEL RÍO SAN PEDRO
AFECTADOS POR LA ACTIVIDAD DEL DISTRITO
MINERO DE TEPEZALÁ – ASIENTOS.

PRESENTA

M. en C. Roberto Macías Medrano

PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
EN EL ÁREA DE TOXICOLOGÍA AMBIENTAL

TUTORES

Dr. Francisco Javier Avelar González.
Dra. Alma Lilian Guerrero Barrera.

INTEGRANTE DEL COMITÉ TUTORAL

Dra. Magdalena Samanta Ramos Gómez.

Aguascalientes, Ags. a 16 de Diciembre de 2022.



CARTA DE VOTO APROBATORIO INDIVIDUAL

M. en C. JORGE MARTÍN ALFÉREZ CHÁVEZ
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS
P R E S E N T E

Por este medio, como **CO-TUTOR** designado del estudiante **ROBERTO MACÍAS MEDRANO** con ID 52716, quien realizó la tesis titulada: **MOVILIDAD Y TOXICIDAD POR METALES EN SEDIMENTOS Y SUELOS ALEDAÑOS A AFLUENTES DEL RÍO SAN PEDRO AFECTADOS POR LA ACTIVIDAD MINERA DEL DISTRITO MINERO DE TEPEZALÁ - ASIENTOS** (el cual es un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia), doy fe de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente. Me permito emitir el **VOTO APROBATORIO** para que pueda proceder a imprimirlo, así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 05 de diciembre de 2022.

Dr. Francisco Javier Avelar González
Co-Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado.
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado.

Elaborado por: Depto. de Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Área Académica.
Aprobado por: Depto. de Apoyo al Posgrado y Área Académica.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 00/03/21



CARTA DE VOTO APROBATORIO INDIVIDUAL

M. en C. JORGE MARTÍN ALFÉREZ CHÁVEZ
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS
P R E S E N T E

Por este medio, como **CO-TUTOR** designado del estudiante **ROBERTO MACÍAS MEDRANO** con ID 52716, quien realizó la tesis titulada: **MOVILIDAD Y TOXICIDAD POR METALES EN SEDIMENTOS Y SUELOS ALEDAÑOS A AFLUENTES DEL RÍO SAN PEDRO AFECTADOS POR LA ACTIVIDAD MINERA DEL DISTRITO MINERO DE TEPEZALÁ - ASIENTOS** (el cual es un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia), doy fe de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente. Me permito emitir el **VOTO APROBATORIO** para que pueda proceder a imprimirlo, así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 05 de diciembre de 2022.

Dra. Alma Lilian Guerrero Barrera
Co-Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado.

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado.

Elaborado por: Depto. de Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Área Académica.
Aprobado por: Depto. de Apoyo al Posgrado y Área Académica.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 00/03/21



CARTA DE VOTO APROBATORIO INDIVIDUAL

M. en C. JORGE MARTÍN ALFÉREZ CHÁVEZ
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS
P R E S E N T E

Por este medio, como **ASESOR** designado del estudiante **ROBERTO MACÍAS MEDRANO** con ID 52716, quien realizó la tesis titulada: **MOVILIDAD Y TOXICIDAD POR METALES EN SEDIMENTOS Y SUELOS ALEDAÑOS A AFLUENTES DEL RÍO SAN PEDRO AFECTADOS POR LA ACTIVIDAD MINERA DEL DISTRITO MINERO DE TEPEZALÁ - ASIENTOS** (el cual es un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia), doy fe de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente. Me permito emitir el **VOTO APROBATORIO** para que pueda proceder a imprimirlo, así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 05 de diciembre de 2022.

Dra. Magdalena Samanta Ramos Gómez
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado.

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado.

Elaborado por: Depto. de Apoyo al Posgrado.

Revisado por: Área Académica.

Aprobado por: Depto. de Apoyo al Posgrado y Área Académica.

Código: DO-SEE-FO-07

Actualización: 01

Emisión: 00/03/21



DICTAMEN DE LIBERACIÓN ACADÉMICA PARA INICIAR LOS TRÁMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación dd/mm/aa: 15-dic-22

NOMBRE: ROBERTO MACÍAS MEDRANO **ID** 52716

PROGRAMA: DOCTORADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS, MODALIDAD TRADICIONAL **LGAC (del posgrado):** BIOINGENIERÍA Y TOXICOLOGÍA AMBIENTALES

TIPO DE TRABAJO: Tesis Trabajo práctico

MOVILIDAD Y TOXICIDAD POR METALES EN SEDIMENTOS Y SUELOS ALEDAÑOS A AFLUENTES DEL RÍO SAN PEDRO AFECTADOS POR LA ACTIVIDAD DEL DISTRITO MINERO DE TEPEZALÁ – ASIENTOS.

TÍTULO:

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado):

El estudio realizado permitirá determinar la movilidad de metales pesados en el suelo y sedimentos aledaños a una mina, lo cual permitirá tomar decisiones para el manejo de estos contaminantes

INDICAR SI/NO SEGÚN CORRESPONDA:

Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:

- SI El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
- SI La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
- SI Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
- SI Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
- SI Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
- SI El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
- SI Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
- NO Generó transferencia del conocimiento o tecnológica

El egresado cumple con lo siguiente:

- SI Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
- SI Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
- SI Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
- NO Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
- SI Coincide con el título y objetivo registrado
- SI Tiene congruencia con cuerpos académicos
- SI Tiene el CVU del Conacyt actualizado
- SI Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)

En caso de Tesis por artículos científicos publicados:

- SI Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
- SI El estudiante es el primer autor
- SI El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
- SI En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
- SI Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
- SI La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado

Sí
No

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Dra. ALMA LILIAN GÓRRERO BARRERA

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

DRA. ALMA LILIAN GÓRRERO BARRERA

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano.

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

DR. JUAN JÁUREGUI RINCÓN

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

M. en C. JORGE MARTÍN ALFEREZ CHÁVEZ

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Elaborado por: D. Apoyo al Posg.
Revisado por: D. Control Escolar/D. Gestión de Calidad.
Aprobado por: D. Control Escolar/ D. Apoyo al Posg.

Código: DO-SEE-FO-15
Actualización: 01
Emisión: 20/06/19

Article

Contamination Assessment and Chemical Speciation of Lead in Soils and Sediments: A Case Study in Aguascalientes, México

Roberto Macías¹ , Magdalena Samanta Ramos¹, Alma Lilian Guerrero¹, María Guadalupe Farfán¹, Kerry Mitchell²  and Francisco Javier Avelar^{1,*} 

¹ Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Avenida Universidad #940, Aguascalientes 20100, Mexico

² Department of Public Health and Preventive Medicine, St. George's University, True Blue, St. George's P.O. Box 7, Grenada

* Correspondence: fjavelar@correo.uaa.mx; Tel.: +52-449-910-84-21



Citation: Macías, R.; Ramos, M.S.; Guerrero, A.L.; Farfán, M.G.; Mitchell, K.; Avelar, F.J. Contamination Assessment and Chemical Speciation of Lead in Soils and Sediments: A Case Study in Aguascalientes, México. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 8592. <https://doi.org/10.3390/app12178592>

Academic Editor: Maria Stefania Sinicropi

Received: 1 August 2022
Accepted: 24 August 2022
Published: 27 August 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Lead (Pb) contamination was evaluated in 24 contaminated soils and sediments samples, representative of areas affected by mining, agricultural, commercial and residential activity, during the rainy and dry season. Pseudo-total concentration in soils (15.7–527.2 mg kg⁻¹) and sediments (16.3–4273.3 mg kg⁻¹) was determined and protocols were developed to analyze its chemical form, potential mobility and bioavailability. Five geochemical phases (exchangeable fraction, carbonate fraction, Fe/Mn oxide fraction, organic fraction and residual fraction) were obtained for the determination of Pb speciation and mobility using a modified Tessier sequential extraction procedure. The predominant fraction was the Fe/Mn oxide bound (both for soils and for sediments). However, their calculated mobility factors were 26% and 28%, respectively, representing significant risk to the environment. Geo accumulation values ranged from −0.7 to 4.4 (“Unpolluted”–“Highly to extremely polluted”) for soils and from −0.6 to 7.4 (“Unpolluted”–“Extremely polluted”) for sediments, suggesting the influence of human activity on the environment, mainly at sites located in the vicinity of the mine. Enrichment Factor values ranged from 2.1 to 87.8 for soils and from 2.5 to 698.7 for sediments (“Moderated enrichment”–“Extremely high enrichment”); values above 1.5 suggesting anthropogenic origin, thus representing a risk for biological organisms present in freshwater. In summary, these environmental indicators demonstrated that even in sites with low Pb concentration, contamination was observed, thus highlighting the need for continued monitoring due to the potential for significant public health risks.

Keywords: soil; sediment; mobility factor; geo accumulation index; enrichment factor; speciation; environmental indicators; risk; lead

1. Introduction

Heavy metals are considered serious inorganic pollutants due to their toxic effects and ability to accumulate in the environment [1]. Metals are non degradable and, therefore, remain indefinitely in aquatic and terrestrial environments. They can leach through soils eventually affecting groundwater or taken up by plants, including agricultural crops [2]. Lead (Pb), one of the most toxic and hazardous elements to human health [3], is ranked second on the 2017 Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) Substances Priority List [4]. Pb has deleterious effects on the nervous and cardiovascular systems, with its target organs being the brain and kidneys. Lead has been shown to restrict intelligent quotient (IQ) development [5], and is listed as a group 2A carcinogen by the International Agency for Research on Cancer (IARC) [6].

The impact produced by human activities result in the alteration of the natural balance of the system [7]. Mining is one of the most significant contributors of pollution in the environment by metals and metalloids [8]. Numerous studies have demonstrated that

AGRADECIMIENTOS

Hace algunos años tuve la oportunidad de hacer mi Servicio Social en el Laboratorio de Estudios Ambientales, posteriormente continué ahí como Instructor Beca hasta el término de mis estudios de la Licenciatura en Análisis Químico-Biológicos. Fue precisamente en ese Laboratorio, donde nació el Amor por la Investigación. Un par de años más tarde continué mis estudios de Maestría en la UANL y finalmente, ya como Docente del Departamento de Química, tomé la decisión de ingresar al Programa de Doctorado de la UAA, mi *Alma Mater*.

Por ello, quisiera agradecer a las personas que me han acompañado durante esta etapa de mi vida.

Primeramente, a mi Comité Tutorial, al Dr. Francisco Javier Avelar González, Cotutor, por aceptarme como su tesista y brindarme la oportunidad para poder llevar a cabo esta investigación, además de apoyarme durante todo momento para la realización y terminación de este proyecto. A la Dra. Alma Lilian Guerrero Barrera, Cotutora, por su apoyo durante todo el Doctorado, desde el proceso de selección hasta el término del mismo. Finalmente, a mi Asesora, la Dra. Magdalena Samanta Ramos Gómez por su apoyo en el Laboratorio. Gracias a todos por su tiempo invertido, su dedicación, consejos y apoyo recibido durante todo este tiempo.

Al Dr. Roberto Rico, gracias por todo su apoyo brindado, gracias por proporcionarme un espacio en su laboratorio para la realización de una parte fundamental de mi trabajo, lo estimo y aprecio.

Al Dr. Gustavo Medrano, mil gracias por el apoyo brindado, tanto a mi persona como a mis tesistas de Licenciatura, para la realización de las pruebas de toxicidad.

A la Dra. Ileana Medina, por su apoyo durante estos años, gracias por haberme transmitido sus conocimientos y contribuir a mi formación académica, pero, sobre todo, por brindarme su amistad.

A la I.B.Q. Laurita Yamamoto, gracias por el apoyo brindado en el Laboratorio, por tu amistad y compañerismo. Por demostrar ser una persona imparcial en todo momento.

A Kerry N. Mitchell, compañero de laboratorio durante mi proceso de Doctorado, gracias por tu amistad y apoyo, sé que podremos seguir colaborando en un futuro.

A mis compañeros de Generación; Lucila, Julieta, Mary Carmen, Lupita, Carlos, Juan y Josafath, por todos los momentos que pasamos. Gracias por ser mis amigos. Mireya, aunque no perteneces a mi generación, gracias por tu amistad.

A todos los Doctores que por uno u otro motivo tuve el gusto de tratarlos durante mis estudios y que ahora me los encuentro en los pasillos y me saludan de muy buen agrado, gracias.

A la M. en C. Irma Adriana Castro Gallo, Jefe del Departamento de Química durante la mayor parte de mi Doctorado, por apoyarme con Horas Clase frente a grupo y demostrar ser una persona muy Humana, gracias.

A los alumnos que tuve como Tesistas; Alexa, Karen, Karina, Pamela, Susana, Alfredo, Efraín, José de Jesús y Ricardo, gracias por permitirme crecer como Tutor e Investigador, les agradezco mucho su apoyo y trabajo, incluso durante las vacaciones, sábados y/o domingos, mil gracias.

A los alumnos que han transitado por el Laboratorio de Estudios Ambientales; como instructores beca y/o de servicio social, y que en su momento me apoyaron y que ahora considero mis amigos, gracias. En especial a Daniela, Mario y Edgar.

A todos los alumnos que tuve la fortuna de impartirles clases, sin duda alguna fueron una parte importante para continuar superándome y desarrollándome en esta profesión llamada "Docencia", en verdad disfruté mucho ser su profesor.

A mi familia, hermanos y cuñados; por el apoyo brindado, antes, durante y después de mis estudios.

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios, No. 651043.

A todas aquellas personas que de alguna u otra manera contribuyeron a la realización de esta Investigación y que por un descuido me olvidara de mencionar, mis más sinceras gracias.

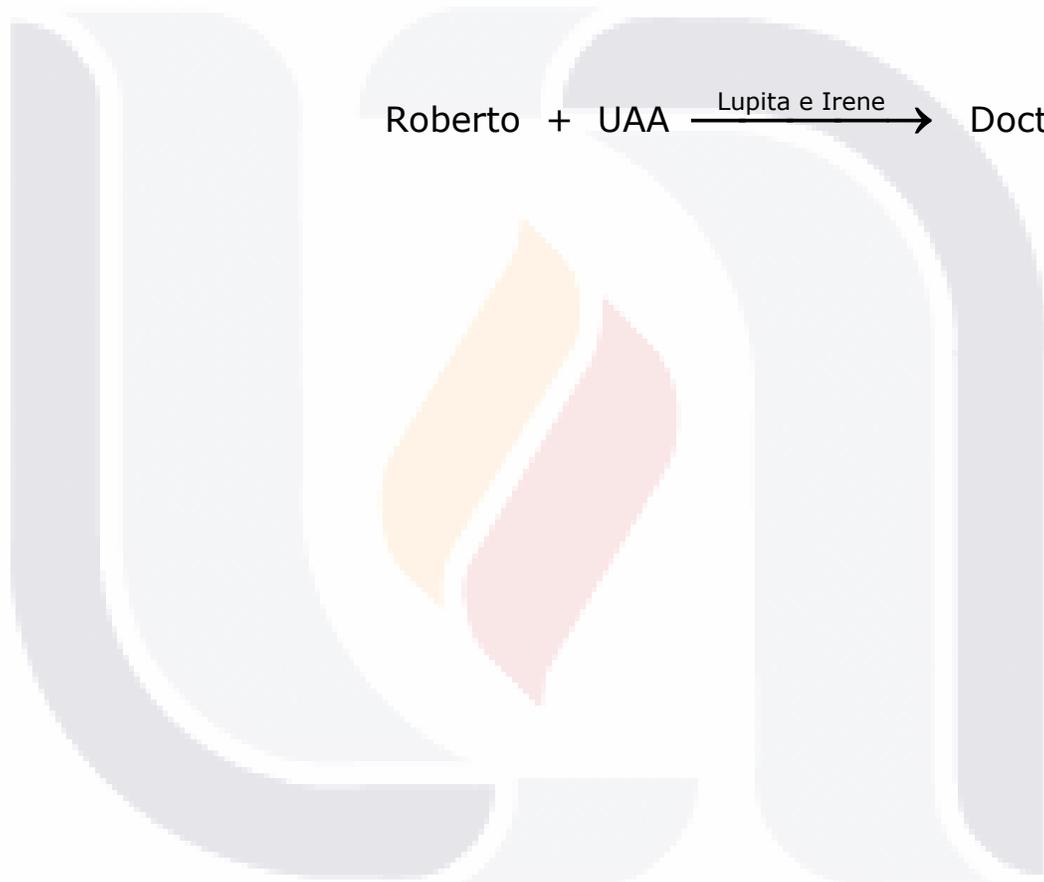
A mi esposa, la M. en C. María Guadalupe Farfán Tavera, por apoyarme en todo momento a iniciar esta etapa de mi vida, por aguantar malos ratos, desveladas, etc. Pero, sobre todo, gracias por siempre estar ahí presente, ayudándome incluso a interpretar datos, dándome tú opinión y ser una parte fundamental para obtener el Doctorado; que bueno que también estudiaste Química y entiendes del tema.

Finalmente, gracias a mi hija Irene Nastienka, gracias por entender que todo esto lo hago para ti, eres mi motivación, gracias por darme parte de tú tiempo, "Te Amo".

DEDICATORIAS

A mi Esposa e Hija.
Catalizadores de este proceso:

Roberto + UAA $\xrightarrow{\text{Lupita e Irene}}$ Doctorado



Con su letra firme y clara, testó:

“...Con el total remanente realizable de mis bienes se procederá como se expresa a continuación:

El capital se invertirá por mis albaceas en valores seguros, y constituirán un fondo cuyos intereses se distribuirán anualmente en forma de premios a aquellos que, durante el año precedente, hayan proporcionado el mayor beneficio a la Humanidad. Dichos intereses se dividirán en cinco partes iguales que se distribuirán del modo siguiente: una parte a la persona que haya hecho el descubrimiento o la invención más importante en el campo de la Física; una parte a la persona que haya hecho el descubrimiento o progreso en el campo de la Química; una parte a la persona que haya hecho el descubrimiento más importante en los dominios de la Filosofía o la Medicina; una parte a la persona que haya producido en el campo de la Literatura la obra más sobresaliente de tendencia idealista; y una parte a la persona que haya hecho la obra mayor o mejor en pro de la Fraternidad entre las Naciones, de la abolición o reducción de los armamentos permanentes y de la celebración o promoción de Congresos de la Paz.

Los premios de Física y Química serán concedidos por la Academia de Ciencias Sueca; los destinados a trabajos de Fisiología o Medicina, por el Instituto Carolina de Estocolmo; los de Literatura, por la Academia de Estocolmo, y los destinados a los Defensores de la Paz, por una Comisión de cinco personas elegidas por el Parlamento Noruego. Es mi especial deseo que en la adjudicación de los premios no debe tomarse en consideración la nacionalidad de los candidatos, de modo que la obra más meritoria recibirá el premio tanto si es escandinava como si no lo es.

Paris, 27 de noviembre de 1895...”

Alfred Bernhard Nobel.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	11
1. INTRODUCCIÓN	13
2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. Metales Pesados	15
2.1.1. Definición.....	15
2.1.2. Toxicología.....	15
2.2. Especiación de Metales.....	16
2.2.1. Procedimientos de Extracción Secuencial.....	18
2.3. Contaminación Ambiental por Metales	19
2.4. Suelo y Sedimento.....	20
2.5. Movilidad y Biodisponibilidad.....	22
2.6. Aguascalientes	23
2.6.1. Geografía.....	23
2.6.2. Hidrografía.....	24
2.6.3. Minería	25
2.7. Antecedentes	26
3. JUSTIFICACIÓN.....	28
4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	30
4.1. Hipótesis	30
4.2. Objetivos.....	30
4.2.1. Objetivos Generales	30
4.2.2. Objetivos Particulares.....	30
5. METODOLOGÍA	32
5.1. Muestreo de Suelo y Sedimento.	32
5.2. Análisis del Metal.....	33
5.2.1. Concentración Total.....	33
5.2.2. Especiación Química.....	34
5.2.3. Lixiviación del Metal	34

5.2.4. Cuantificación del Metal	35
5.2.5. Control de Calidad.....	35
5.3. Propiedades Fisicoquímicas en Suelo y Sedimento	36
5.4. Indicadores Ambientales.....	36
5.4.1. Factor de Movilidad	36
5.4.2. Índice de Geo Acumulación	37
5.4.3. Factor de Enriquecimiento	37
5.5. Pruebas de Toxicidad Aguda.....	38
5.5.1. Obtención de Elutriado.....	39
5.5.2. Prueba de Toxicidad Aguda	39
5.5.2.1. Cálculo de la CL ₅₀	40
5.5.2.2. Cálculo de las Unidades de Toxicidad Aguda.....	40
5.6. Análisis Estadístico.....	40
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
6.1. Puntos de Muestreo	41
6.2. Análisis del Metal.....	42
6.2.1. Metal Total	43
6.2.2. Especiación Química	53
6.2.2.1. Plomo	53
6.2.2.2. Cromo.....	55
6.2.2.3. Zinc	57
6.2.3. Lixiviación del Metal	58
6.2.4. Control de Calidad.....	61
6.3. Propiedades Fisicoquímicas en Suelo y Sedimento	62
6.3.1. pH.....	63
6.3.2. Conductividad Eléctrica	64
6.3.3. Potencial Redox	66
6.3.4. Materia Orgánica.....	67
6.3.5. Capacidad de Intercambio Catiónico	68
6.3.6. Carbonatos	69
6.4. Indicadores Ambientales.....	70
6.4.1. Factor de Movilidad	70

6.4.2. Índice de Geo Acumulación	74
6.4.3. Factor de Enriquecimiento	77
6.5. Pruebas de Toxicidad Aguda.....	80
6.5.1. Prueba de Toxicidad Aguda	80
6.5.1.1. Concentración Letal 50 (CL ₅₀).....	80
6.5.1.2. Unidades de Toxicidad Aguda (UTa)	84
6.6. Análisis Estadístico Complementario.....	87
7. CONCLUSIÓN.....	89
8. RECOMENDACIONES.....	92
9. GLOSARIO.....	93
10. BIBLIOGRAFÍA	94
11. ANEXOS	104
ANEXO A. Metal Total.....	105
ANEXO B. Especiación Química.....	106
ANEXO C. Potenciales de Lixiviación.....	112
ANEXO D. Propiedades Fisicoquímicas de Suelo y Sedimento	113
ANEXO E. Valores de Fondo y Concentraciones de Aluminio	114
ANEXO F. Conteo de Organismos Muertos de la Prueba de Toxicidad Aguda	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Superficie Estatal (Porcentaje) por Región, Cuenca y Subcuenca Hidrológica.....	25
Tabla 2.	Agente Extractor y Condiciones Operacionales para cada Fracción.....	34
Tabla 3.	Igeo y Clasificación de la Contaminación del Metal.....	37
Tabla 4.	Clases del FE respecto a la Calidad de la Muestra.....	38
Tabla 5.	Coordenadas de Localización de los Puntos Muestreados.....	42
Tabla 6.	Límites Permisibles para Suelo.....	43
Tabla 7.	Límites Permisibles para Sedimento en Agua Dulce.....	43
Tabla 8.	Concentración Total del Metal en los 8 puntos seleccionados.....	44
Tabla 9.	Control de Calidad de los Materiales de Referencia NIST para Plomo.....	61
Tabla 10.	Control de Calidad de los Materiales de Referencia NIST para Cromo.....	62
Tabla 11.	Control de Calidad de los Materiales de Referencia NIST para Zinc.....	62
Tabla 12.	CL_{50} para <i>Alona guttata</i>	82
Tabla 13.	CL_{50} para <i>Lecane quadridentata</i>	84
Tabla 14.	UTa para <i>Alona guttata</i>	85
Tabla 15.	UTa para <i>Lecane quadridentata</i>	85
Tabla 16.	Correlación de Pearson para Pb.....	87
Tabla 17.	Correlación de Pearson para Cr.....	87
Tabla 18.	Correlación de Pearson para Zn.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Hidrografía del Estado de Aguascalientes.....	25
Figura 2.	Diagrama de Flujo para la Determinación de Metales por Digestión Abierta, método modificado ISO-11466 (1995).....	33
Figura 3.	Diagrama de Extracción aplicado para la Prueba de Lixiviación.....	35
Figura 4.	Diagrama de Flujo para la Obtención del Elutriado.....	39
Figura 5.	Área de estudio y localización geográfica de los sitios muestreados.....	41
Figura 6.	Concentración de Pb en Suelo, respecto al valor promedio de la corteza terrestre.....	45
Figura 7.	Concentración de Pb en Sedimento, respecto al valor promedio de la corteza terrestre.....	47
Figura 8.	Análisis comparativo de Pb por Temporada.....	48
Figura 9.	Concentración de Cr en Suelo, respecto al valor promedio de la corteza terrestre.....	48
Figura 10.	Concentración de Cr en Sedimento, respecto al valor promedio de la corteza terrestre.....	49
Figura 11.	Análisis comparativo de Cr por Temporada.....	50
Figura 12.	Concentración de Zn en Suelo, respecto al valor promedio de la corteza terrestre.....	50
Figura 13.	Concentración de Zn en Sedimento, respecto al valor promedio de la corteza terrestre.....	51
Figura 14.	Análisis comparativo de Zn por Temporada.....	52
Figura 15.	Especiación Química de Plomo en Suelo por Temporada.....	54
Figura 16.	Especiación Química de Plomo en Sedimento por Temporada.....	55

Figura 17. Especiación Química de Cromo en Suelo por Temporada..... 56

Figura 18. Especiación Química de Cromo en Sedimento por Temporada..... 56

Figura 19. Especiación Química de Zinc en Suelo por Temporada..... 57

Figura 20. Especiación Química de Zinc en Sedimento por Temporada..... 58

Figura 21. Porcentaje de Lixiviación de Plomo por Sustrato y Temporada..... 59

Figura 22. Concentración Lixiviada de Plomo por Sustrato y Temporada..... 59

Figura 23. Porcentaje de Lixiviación de Zinc por Sustrato y Temporada..... 60

Figura 24. Concentración Lixiviada de Zinc por Sustrato y Temporada..... 61

Figura 25. Análisis comparativo del pH por Sustrato y Temporada..... 63

Figura 26. Proceso que da lugar a la transferencia del catión metálico desde la fase sólida a la disolución del suelo..... 64

Figura 27. Análisis comparativo de la CE por Sustrato y Temporada..... 65

Figura 28. Análisis comparativo del Eh por Sustrato y Temporada..... 66

Figura 29. Análisis comparativo de la MO por Sustrato y Temporada..... 67

Figura 30. Análisis comparativo de la CIC por Sustrato y Temporada..... 69

Figura 31. Análisis comparativo de CO_3^{2-} por Sustrato y Temporada..... 70

Figura 32. Factor de Movilidad para Pb por Sustrato y Temporada..... 71

Figura 33. Factor de Movilidad para Cr por Sustrato y temporada..... 73

Figura 34. Factor de Movilidad para Zn por Sustrato y temporada..... 73

Figura 35. Índice de Geo Acumulación para Pb por Sustrato y Temporada..... 74

Figura 36. Índice de Geo Acumulación para Cr por Sustrato y Temporada..... 76

Figura 37. Índice de Geo Acumulación para Zn por Sustrato y Temporada..... 76

Figura 38. Factor de Enriquecimiento para Pb por Sustrato y Temporada..... 78

Figura 39. Factor de Enriquecimiento para Cr por Sustrato y Temporada..... 79

Figura 40. Factor de Enriquecimiento para Zn por Sustrato y Temporada..... 80

Figura 41. Análisis discriminatorio de los sitios para *Alona guttata*..... 81

Figura 42. Análisis discriminatorio de los sitios para *Lecane quadridentata*..... 83

Figura 43. Comparativo entre CL₅₀ y UTa de las ocho muestras en común que resultaron tóxicas tanto para *A. guttata* como *L. quadridentata*..... 86

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Factor de Movilidad (MF)..... 37

Ecuación 2. Índice de Geo Acumulación (Igeo)..... 37

Ecuación 3. Factor de Enriquecimiento (FE)..... 38

Ecuación 4. Unidades de Toxicidad Aguda (UTa)..... 40

ACRÓNIMOS

*La ciencia no sólo es una disciplina de razón,
sino también de romance y pasión.
— Stephen Hawking —*

CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico
CL₅₀	Concentración Letal 50
DER	Desviación Estándar Relativa
CE	Conductividad Eléctrica
Eh	Potencial Redox
FE	Factor de Enriquecimiento
FM	Factor de Movilidad
Igeo	índice de Geo Acumulación
MO	Materia Orgánica
PEL	Probable Effect Level (Nivel de Efecto Probable)
pH	Potencial de Hidrógeno
TEL	Threshold Effect Level (Nivel de Efecto Umbral)
UTa	Unidades de Toxicidad aguda

RESUMEN

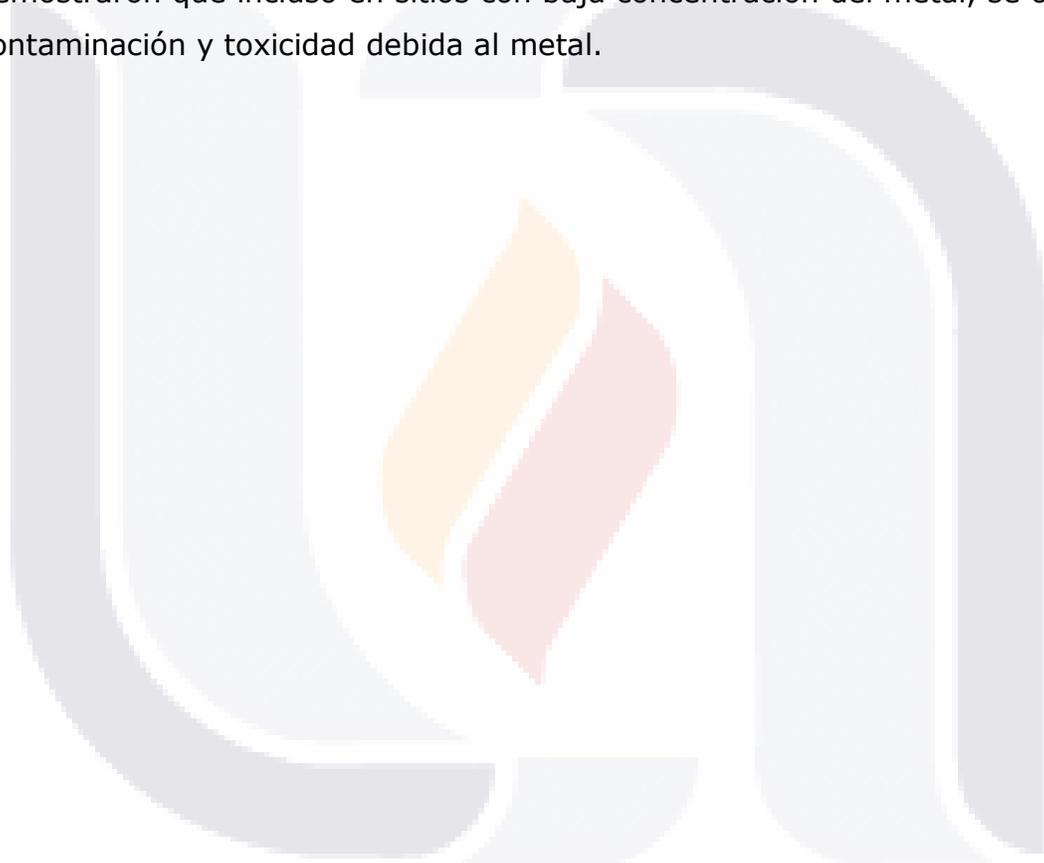
La minería es una de las principales actividades humanas que contribuye a la contaminación de suelos y sedimentos por metales, los cuales, eventualmente pueden ser absorbidos por organismos y transportarse a otros eslabones de la cadena alimenticia; además tienen la capacidad de bioacumularse y biomagnificarse incrementando su peligrosidad.

El presente estudio se centró en determinar la Movilidad y Toxicidad de Plomo, Cromo y Zinc, considerados metales pesados, en la temporada de estiaje y lluvias. El estudio se centró en el Río Piedras Negras, ubicado en el municipio de Asientos, continuando por los Ríos Zarco, Chicalote y San Pedro y terminando en la Presa El Niágara, cuerpo receptor final de agua del Estado de Aguascalientes.

Posterior a la determinación de la concentración total de los metales, el estudio se centró en 8 sitios los cuales mostraron que: los sitios más cercanos a la Mina resultaron ser los más contaminados para Pb y Zn; la concentración total de Pb en suelo ($15.7\text{--}527.2\text{ mg kg}^{-1}$), Pb en sedimento ($16.3\text{--}4273.3\text{ mg kg}^{-1}$), Cr en suelo ($1.2\text{--}53.1\text{ mg kg}^{-1}$), Cr en sedimento ($4.2\text{--}87.3\text{ mg kg}^{-1}$), Zn en suelo ($41.6\text{--}2277.8\text{ mg kg}^{-1}$) y Zn en sedimento ($74.5\text{--}21799.2\text{ mg kg}^{-1}$) se determinó mediante Absorción Atómica, encontrándose que existen sitios que superan la normatividad vigente nacional y/o internacional; el procedimiento de extracción secuencial indicó que la fracción predominante para el Pb, tanto para suelo como sedimento, fue la fracción unida a óxidos de Fe/Mn, mientras que la fase predominante para Cr y Zn fue la fracción residual; la Presa El Niágara, contribuye significativamente a disminuir la concentración de los metales; no existe diferencia significativa entre temporadas, considerando un valor de $\alpha=0.5$; el orden de lixiviación fue $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cr}$; el Factor de Enriquecimiento resultó ser el indicador ambiental más eficiente para mostrar el riesgo por contaminación de un sitio; en cuanto a las pruebas de toxicidad aguda, estas

revelaron que *Lecane quadridentata* es más sensible que *Alona guttata*, sin embargo, *Alona guttata*, mostro mejor correlación con la concentración total de Pb, Zn y el factor de enriquecimiento de ambos metales, resultando idónea para estudios posteriores y por último, las Unidades de Toxicidad Aguda calculadas, mostraron que los sitios representan un riesgo para los ecosistemas acuáticos.

En resumen, los indicadores ambientales y pruebas de toxicidad, demostraron que incluso en sitios con baja concentración del metal, se observó contaminación y toxicidad debida al metal.



ABSTRACT

Mining is one of the principal human activities that contributes to the contamination of soils and sediments by metals, which can eventually be absorbed by organisms and transported to other links in the food chain; they also have the ability to bioaccumulate and biomagnified, increasing their danger.

The present study focused on determining the Mobility and Toxicity of Lead, Chromium and Zinc, considered heavy metals, between the dry and rainy season. The study area started at the Piedras Negras River municipality of Asientos; continued along the Zarco, Chicalote and San Pedro Rivers and ended at the El Niagara Reservoir, the final receiving body of water in the State of Aguascalientes.

After determining the total concentration of metals, the study focused on 8 sites which showed that: sites closest to the Mine were the most contaminated for Pb and Zn; total concentration of Pb in soil ($15.7\text{--}527.2\text{ mg kg}^{-1}$), Pb in sediment ($16.3\text{--}4273.3\text{ mg kg}^{-1}$), Cr in soil ($1.2\text{--}53.1\text{ mg kg}^{-1}$), Cr in sediment ($4.2\text{--}87.3\text{ mg kg}^{-1}$), Zn in soil ($41.6\text{--}2277.8\text{ mg kg}^{-1}$) and Zn in sediment ($74.5\text{--}21799.2\text{ mg kg}^{-1}$) was determined by Atomic Absorption, finding that there are some sites that exceed the Mexican Regulation and/or International Regulation; sequential extraction procedure indicated that the predominant fraction for Pb, both for soil and sediment, was the Fe/Mn oxide bound, while the predominant fraction to Cr and Zn was the residual fraction; the Niagara Reservoir contributes significantly to reducing the concentration of metals; there is no significant difference between seasons, considering a value of $\alpha=0.5$; leaching order was $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cr}$; Enrichment Factor turned out to be the most efficient environmental indicator to show the risk of contamination of a site; regarding acute toxicity tests, these revealed that *Lecane quadridentata* is more sensitive than *Alona guttata*, however, *Alona guttata*, showed a better correlation with total concentration of Pb, Zn and enrichment factor of both metals, being ideal

for subsequent studies and finally, the calculated Acute Toxicity Units, showed that the sites represent a risk for aquatic ecosystems.

In summary, the environmental indicators and toxicity tests demonstrated that even in sites with low concentrations of the metal, contamination and toxicity due to the metal were observed.



1. INTRODUCCIÓN

*Si alguna vez una teoría te parece la única posible,
tómalo como una señal de que no has entendido ni
la teoría ni el problema que se pretendía resolver.*

— Karl Popper —

Los elementos metálicos conforman la mayoría de los elementos de la tabla periódica, dentro de esta clasificación se encuentran los denominados metales pesados. Aunque su concentración procedente de la meteorización química de las rocas se encuentra en un estado estacionario, no ocurre lo mismo con la emisión antropogénica, pues da lugar a un aumento continuo de la concentración ambiental de algunos de estos metales (Domènech & Peral, 2012).

La minería es una de las actividades antropogénicas que contribuyen en gran medida con la contaminación ambiental por metales (Pourret, Lange, Bonhoure, Colinet, Decrée, Mahy & Faucon, 2016). Aguascalientes cuenta con 5 Regiones Mineras y 1 Distrito Minero (Tepezalá - Asientos) donde se lleva a cabo la extracción de Cobre, Plomo, Zinc, Oro y Plata (SGM, 2016).

Dentro de los sistemas naturales que se pueden ver afectados por la minería se encuentran el suelo y el sedimento (Harrison, 1999). Los contaminantes en el suelo no suelen permanecer atrapados, el agua de lluvia los transporta a través del suelo y estos pueden contaminar las aguas subterráneas. El sedimento se compone de suelo, limo, minerales y materiales orgánicos que se han transportado por escorrentía del agua de lluvia del suelo circundante a un lago, río u otro cuerpo de agua (Hill, 2010). La acumulación de contaminación por metales en los sedimentos puede plantear serios problemas ambientales para los sistemas acuáticos (Javan, Hassani, Ahangar & Soltani, 2015). La exposición humana a los metales no está exenta y puede ocurrir por diversas rutas (Hill, 2010); la toxicidad del metal depende de la concentración, su forma

química y las condiciones fisicoquímicas del medio en que se encuentra la especie (Domènech & Peral, 2012).

Los suelos y sedimentos pueden contaminarse por varias vías, incluida la eliminación de desechos sólidos industriales y domésticos, la deposición húmeda y seca de la atmósfera y la infiltración de aguas contaminadas (Harrison, 1999). Los metales pueden ensuciar arroyos y ríos a lo largo de muchas millas río abajo. A menos que la tierra se administre adecuadamente durante la minería y se recupere cuidadosamente después, lo que generalmente no sucede, puede ser inútil para otros fines (Hill, 2010).

El Río San Pedro es el afluente más importante del Estado de Aguascalientes, el cual se aprovecha para el riego agrícola. Nace en el estado de Zacatecas, atraviesa el estado de Aguascalientes de norte a sur y termina uniéndose al Río Verde en Jalisco. Recibe aportaciones de otros ríos de menor cauce, entre los que se encuentra el Río Chicalote, río que le da nombre a la Subcuenca Hidrológica en la cual se encuentra el Distrito Minero Tepezalá - Asientos (CCAPAMA, 2010; INEGI, 2015).

2. MARCO TEÓRICO

A menos que nuestro conocimiento se mida y se exprese en números, no significa mucho.

— Lord Kelvin —

2.1. Metales Pesados

2.1.1. Definición

De los 106 elementos identificados, cerca de 80 de ellos son metales, estos elementos metálicos, pueden dividirse en dos grupos: aquellos esenciales para la vida como el Hierro y el Calcio y aquellos que son tóxicos, como el Cadmio y el Plomo (Wang, Chen, Hung & Shammass, 2009).

El término "metal pesado", a pesar de ser ampliamente utilizado, no tiene una base científica rigurosa o una definición química. Estrictamente, y desde el punto de vista químico, los metales pesados están constituidos por elementos de transición y post-transición (INECC, 2012), frecuentemente se incluye en este grupo al As, Sb y Te (metaloides) y al Se (no metal) e incluso esenciales para la vida (Fe, Cu y Cr) (Jaramillo, Rincón & Rico, 2009). Una forma opcional de nombrar a este grupo es como "elementos tóxicos" (INECC, 2012).

2.1.2. Toxicología

El ser humano siempre ha estado expuesto a los metales pesados en el entorno (Bruton, Chabner & Knollmann, 2012). Debido a su origen natural y a su uso milenario como materias primas, los metales pesados no fueron considerados contaminantes peligrosos sino hasta la segunda mitad del siglo XX (Jaramillo et al, 2009). En zonas con concentraciones altas, la contaminación de los alimentos y el agua fue tal vez lo que ocasionó las primeras intoxicaciones causadas por estos metales (Bruton et al, 2012).

Los metales pesados son considerados un serio contaminante inorgánico, ya que tienen efectos tóxicos, un alto factor de enriquecimiento y una tasa de remoción lenta (Naji, Ismail & Ismail, 2010).

Los efectos tóxicos de tales metales han sido de enorme importancia para el desarrollo de la toxicología (Bruton et al, 2012).

Metales como el Hg, Cd, Pb, Sn, Cr y As, generalmente no son requeridos para actividades metabólicas y son tóxicos en un organismo vivo aun a concentraciones bajas. El mecanismo de su toxicidad es muy complicado, usualmente es el resultado de un bloqueo a un grupo funcional (-OH, -SH y -N) del organismo con actividad biológica o modificando la conformación activa de alguna enzima, DNA, etc. (Zekarias & Rao, 2012). Cabe señalar que el metal está presente en diferentes especies químicas, lo que modificara su toxicocinética y toxicodinamia (Jaramillo, Rincón & Posadas, 2006).

Otro aspecto importante es la posible acumulación de los metales en los tejidos del animal, los cuales pueden sobrevivir a niveles bajos del contaminante sin aparente efecto, pero continua el proceso de acumulación del metal, por ingestión o contacto con las partículas hasta que el nivel alcanzado del metal se vuelve peligrosa para el órgano diana (Abel, 2002). Una manera de medir la toxicidad letal es determinar la concentración que mata a la mitad de la población en un periodo específico, este valor es llamado Concentración Letal 50 (CL₅₀).

2.2. Especiación de Metales

La concentración total del metal es un dato útil, pero la especiación del metal ofrece un panorama sobre la cantidad de metal biológicamente extraíble (biodisponibilidad) (Cottenie, Camerlynck, Verloo & Dhaese, 1980), lo que

significa que hay especies del metal que son más disponibles que otras (Nelson & Donkin, 1985) para ser absorbidas por un ser vivo como una planta o animal.

La Especiación, expresa la idea de que la forma química de un elemento debe ser considerado individualmente. La razón de la especiación radica en que las características de una especie química tienen un impacto diferente sobre los sistemas en comparación con otra especie química, aun tratándose de compuestos con el mismo elemento en común (Cornelis, Crews, Caruso & Heumann, 2003).

Según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, por sus siglas en inglés), la especiación puede ser considerada como (Cornelis et al., 2003):

- i) Especies Químicas: Composición Isotópica, eléctrica o estado de oxidación y/o estructura molecular o compleja.
- ii) Análisis de Especiación: Identificar o medir la cantidad de una o más especies químicas de manera individual.
- iii) Especiación de un elemento: Distribución de un elemento en un sistema.

Aunque la especiación clásica es preferible, rara vez es posible llevarla a cabo en una muestra sólida, tal como un suelo o sedimento (Davidson, Wilson & Ure, 1999) y usualmente una especie química se puede definir: (a) funcionalmente, de acuerdo a su papel, o (b) operacionalmente, de acuerdo al procedimiento de extracción (Davidson et al, 1999; Naji et al, 2010), donde el método operacional es comúnmente usado (Davidson et al, 1999).

La especiación química es de gran interés en la química analítica porque realza el hecho de que el comportamiento del metal depende no solo de la cantidad presente sino también de su especie (Davidson et al, 1999).

2.2.1. Procedimientos de Extracción Secuencial

Los metales pesados se pueden encontrar en varias formas físicas o químicas, tales como iones, complejos orgánicos, complejos inorgánicos, iones adsorbidos en materia particulada o coloides, etc. (Shimizu, Hiroaka, Mikuchi & Uehara, 2005).

Dentro de las técnicas de separación más utilizadas se encuentran (Landner, L., 1987):

1. Extracción Química (extracción secuencial)
2. Cromatografía de intercambio iónico/gel
3. Filtración, centrifugación y tamizado
4. Extracción con solvente

Los procedimientos de extracción secuencial, son usados para aislar a la especie química. Esto es sustentado por la acción de agentes químicos que permiten lixiviar a la especie química de la muestra sólida simulando cambios en las condiciones ambientales correspondiendo a la liberación del elemento enlazado al componente específico del sedimento superficial. Cada fracción incluye un grupo de compuestos con propiedades similares de movilidad y biodisponibilidad (Kurilov, Kruglyakova, Savitskaya & Fedotov, 2009).

La teoría atrás del Procedimiento de Extracción Secuencial, radica en que la especie más móvil es removida primero y continua en orden de disminución de movilidad del metal (Zimmerman & Weindorf, 2010).

Un ejemplo muy característico al respecto, es el procedimiento descrito por Tessier y colaboradores (1979) donde las especies se clasifican dentro de las siguientes fracciones: (1) Intercambiable, (2) Ligada a carbonatos, (3) Ligada a óxidos de hierro y manganeso, (4) Ligada a materia orgánica y (5) Residual.

Existen muchos Procedimientos de Extracción Secuencial que pueden ser utilizados para entender el comportamiento del metal. El investigador tratará de determinar cuál procedimiento es el más apropiado para sus muestras, considerando varios factores como tipo de suelo, nivel de contaminación, resultados esperados, problemas potenciales o limitaciones asociadas con el Procedimiento de Extracción Secuencial (Zimmerman & Weindorf, 2010).

Típicamente los metales de origen antropogénico se obtienen en las primeras fracciones y el metal de origen natural se encuentra en la fracción residual (roca madre) (Zimmerman & Weindorf, 2010).

La clave para llevar a cabo la especiación de un metal está en preservar la especie que se desea analizar, durante el proceso analítico. Esto incluye el recipiente donde se va a guardar, como va a ser tratada, como se va a almacenar, etc. (Cornelis et al., 2003).

2.3. Contaminación Ambiental por Metales

Los metales están estrechamente relacionados con el deterioro ambiental y la calidad de vida del ser humano (Wang et al, 2009). La minería y la industria son las principales fuentes causantes de introducir cada vez más metales en diversos ambientes (Romero, Vandecasteele & Cooreman, 2000; Jaramillo et al., 2009). La extracción minera genera aumento de la cantidad de metales en el medioambiente, afectando negativamente la biota y calidad del suelo. Excesivas concentraciones de metales en el suelo podrían impactar la calidad de los alimentos que posteriormente se incorporarían a la cadena alimenticia (Puga, Sosa, Lebgue, Quintana & Campos, 2006).

El impacto producido por las actividades humanas resulta en la alteración del balance natural de un sistema (Rendina, Cabo, Arreghini, Bargiela & Fabrizio de Iorio, 2001).

Los contaminantes liberados al ambiente por estas actividades industriales eventualmente pueden llegar a los cuerpos de agua, por escurrimiento a las fuentes superficiales y por infiltración a los acuíferos (Jaramillo et al, 2009).

Los metales tienen tendencia a formar asociaciones, con sustancias minerales (carbonatos, sulfatos, etc.) y en mayor grado con sustancias orgánicas, mediante fenómenos de intercambio iónico, adsorción, quelación, formación de combinaciones químicas, entre otros, por lo que se acumulan en el medio ambiente, principalmente en los sedimentos de los cuerpos de agua (Rosas, 2001), actuando como reservorios y bajo ciertos cambios de las condiciones ambientales del sistema acuático, provocados por variaciones (Rosas, 2001; Salomons & Förstner, 1994) de pH, potencial redox, oxígeno disuelto, así como la presencia de agentes quelatantes, pueden ser liberados a la columna del agua (Romero et al, 2000; Rosas, 2001; West & Nürnberg, 1988).

El transporte y acumulación de metales pesados en aire, agua y suelo, ha llegado a ser un gran tópico de investigación. Además, existe una gran lista de métodos para el tratamiento de la contaminación por metales, tales como la adsorción, lodos activados, fitoextracción, métodos electrocinéticos, electroósmosis e intercambio iónico (Wang et al, 2009).

2.4. Suelo y Sedimento

El suelo es una mezcla variable de minerales, materia orgánica y agua capaz de sustentar la vida vegetal en la superficie terrestre, es el requisito más fundamental para la agricultura. Es el producto final de la acción meteorológica

de los procesos físicos, químicos y biológicos en las rocas, que en gran medida produce minerales arcillosos (Manahan, 2010; Radojević & Bashkin, 2006). Exhibe una gran variedad de características que se utilizan para su clasificación para diversos fines, incluida la producción de cultivos, la construcción de carreteras y la eliminación de desechos (Manahan, 2010). Está conformado por varias capas o estratos. La capa superior que contiene materia orgánica y humedad, se conoce como suelo fértil y, aunque sólo mide alrededor de 10 cm, es la capa que soporta toda la producción agrícola y vegetal (Baqueiro, 2008). Es un componente clave en los ciclos químicos ambientales (Martín & Santamaría, 2000), tiene gran importancia, ya que de él dependen en gran medida la agricultura, la ganadería, los recursos forestales, las infiltraciones de agua a los mantos acuíferos, los ecosistemas de flora y fauna, la minería y además, es el soporte de los asentamientos humanos (Baqueiro, 2008). El suelo es considerado un reservorio de contaminantes provenientes del aire y agua, además, es una interfase natural entre diferentes sistemas (hidrósfera, biosfera, geosfera, litosfera, etc. (Armon & Hänninen, 2015).

Los sedimentos son las capas de materia finamente dividida que cubren el fondo de los ríos, arroyos, lagos, embalses, bahías, estuarios y océanos (Manahan, 2010); se forman en los cuerpos de agua como resultado del asentamiento gravitacional de la materia en suspensión (Radojević & Bashkin, 2006). Consisten generalmente en mezclas de minerales de grano fino, medio y grueso, que incluyen arcilla, limo y arena, mezclados con materia orgánica. Pueden variar en composición desde materia mineral pura hasta materia predominantemente orgánica. Son reservorios de una variedad de detritos biológicos, químicos y contaminantes en los cuerpos de agua y son depósitos de contaminantes, como metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos. De particular preocupación es la transferencia de especies químicas de los sedimentos a las cadenas alimentarias acuáticas a través de organismos que pasan una parte significativa de sus ciclos de vida en contacto con sedimentos o viviendo en ellos (Manahan, 2010).

Los contaminantes en el suelo no suelen permanecer atrapados, el agua de lluvia los transporta a través del suelo y estos pueden contaminar los cuerpos de agua y llegar a los sedimentos (Hill, 2010).

2.5. Movilidad y Biodisponibilidad

La determinación de la concentración total de un metal en una muestra, no proporciona suficiente información acerca de la movilidad y de sus propiedades biológicas y fisicoquímicas del metal (Altundag, Imamoglu, Doganci, Baysal, Albayrak & Tuzen, 2013).

La movilidad puede definirse como la capacidad de un elemento para moverse o transportarse a otro lugar o sistema, siendo la mayor preocupación aquellas especies más solubles o gaseosas (Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007; Selim & Iskandar, 1999). La movilidad es un concepto usado para estimar el riesgo de contaminación de otro compartimento ambiental por algún contaminante (Selim & Iskandar, 1999).

La biodisponibilidad es un concepto ampliamente aceptado basado en el conocimiento implícito de que un organismo puede acumular o mostrar una respuesta biológica debida a la interacción con un químico (Newman & Clements, 2008).

La disponibilidad de los metales para un proceso metabólico está estrechamente relacionada con su especie química (Landner, 1987), como ejemplo tenemos al Cromo (III) y Cromo (VI), en donde se sabe que el Cromo (VI) es considerado letal para el ser humano si se ingiere más de 3g mientras que para el Cromo (III) no se han reportado efectos tóxicos (Wang et al, 2009). Además, existen características fisicoquímicas, como el pH, potencial redox y

contenido de materia orgánica, que pueden reducir o aumentar su movilidad y biodisponibilidad (Puga et al, 2006).

La movilidad, disponibilidad biológica y toxicidad de un elemento depende de su especiación y los enlaces a los sustratos de la matriz (Kurilov et al, 2009). La movilidad del metal es generalmente determinada mediante técnicas de extracción secuencial (Allen, Huang, Bailey & Bowers, 1995), lo que nos permite distinguir entre los compuestos más móviles de los no móviles relacionados a silicatos (Rendina et al, 2001). De acuerdo a la metodología desarrollada por Tessier y colaboradores, aquellos compuestos metálicos que se encuentran en las fracciones débilmente unidas a los componentes del suelo (fracción intercambiable y fracción unida a carbonatos) son muy móviles y disponibles (Iwegbue, 2013), por el contrario, otros compuestos, se encuentran en fracciones que son extremadamente inmóviles y que solo tienen interés para estudios geoquímicos y poca importancia para estudios ambientales (Kurilov et al, 2009).

La extracción secuencial puede proveer información acerca de la identificación de los principales sitios de enlace, la fuerza con que el metal está unido a las partículas y las asociaciones de este con la matriz. Esto nos puede ayudar a entender el proceso geoquímico que gobierna la movilidad y riesgo potencial inducido (Naji et al, 2010).

2.6. Aguascalientes

2.6.1. Geografía

El estado de Aguascalientes, está ubicado en la parte central de la República Mexicana, entre los paralelos 22 ° 27' 35" al norte, 21° 37' 20" al sur, 101 ° 50' 07" al este y 102 ° 52' 27" al oeste respecto al meridiano de Greenwich. La superficie estatal es de 5,589.2 km² y representa el 0.3% del total del territorio

nacional, con lo cual ocupa el lugar 29 en extensión territorial. Colinda al norte, noreste y oeste con el estado de Zacatecas y al sureste y sur con el estado de Jalisco. La división política consta de 11 municipios y su capital es la ciudad de Aguascalientes (INEGI, 2015; SGM, 2016).

En términos generales el clima de la entidad es de carácter semiseco con una temperatura media anual 17.4°C y una precipitación pluvial media de 526 mm (SGM, 2016).

2.6.2. Hidrografía

El Río San Pedro nace en tierras interiores del estado vecino de Zacatecas, en la Sierra de Piedra Gorda, en su trayecto es alimentado por diversos afluentes y manantiales, hasta unirse al Río Verde, afluente del Río Santiago. El Río San Pedro forma parte de dos subcuencas, las cuales se encuentran integrando la Cuenca Hidrológica "Río Verde Grande", y esta a su vez forma parte de la Región Hidrológica No. 12 "Lerma - Santiago" (CCAPAMA, 2010; INEGI, 2015).

Entre los Ríos que descargan sus aguas al Río San Pedro se encuentran: Río Pabellón, Río Santiago, Río Morcinique, Río Calvillito y Río Chicalote, este último con su origen dentro de la Región Minera de Tepezalá - Asientos, el cual cruza pequeñas poblaciones, rancherías y ejidos, conduce sus aguas y vierte en el Río San Pedro cerca de la carretera 45 Norte dentro del territorio de Jesús María (CCAPAMA, 2010).

Al igual que el Río San Pedro, el Río Chicalote también es una subcuenca perteneciente al Río Verde Grande, la Tabla 1 muestra el porcentaje que ocupa la Subcuenca Río Chicalote en el Estado de Aguascalientes.

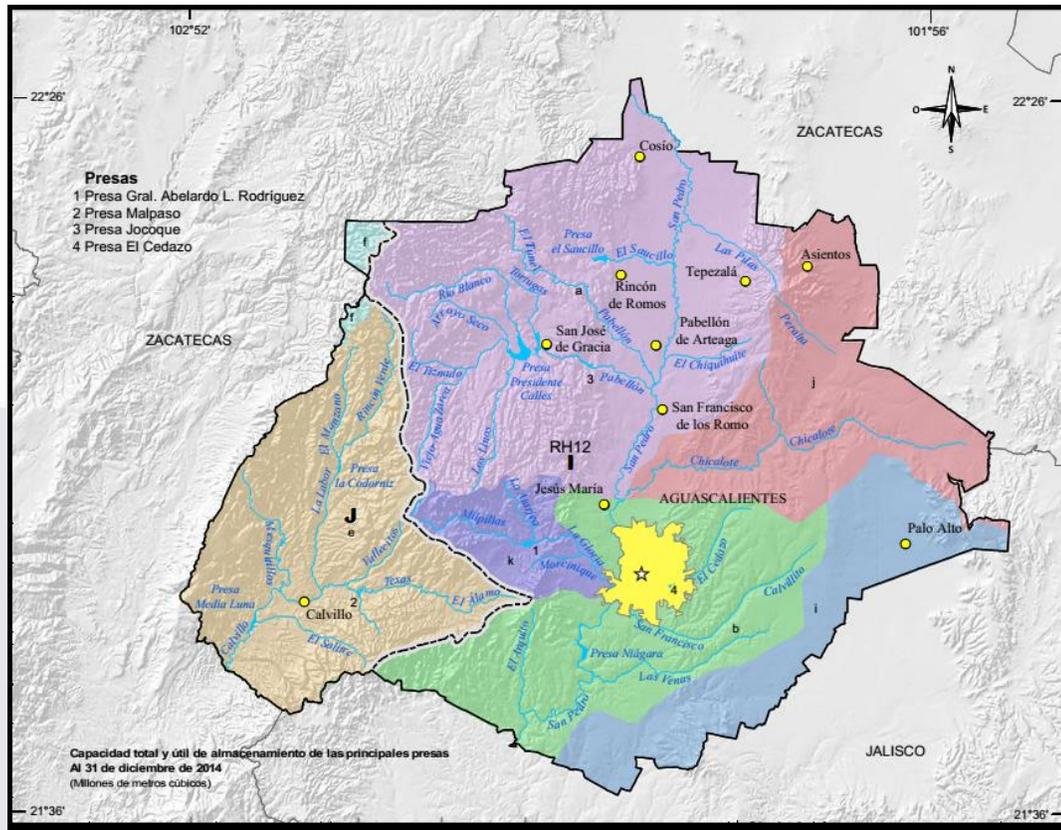


Figura 1. Hidrografía del Estado de Aguascalientes (INEGI, 2015).

Tabla 1. Superficie Estatal (Porcentaje) por Región, Cuenca y Subcuenca Hidrológica.

Región		Cuenca		Total	Subcuenca		%
Clave	Nombre	Clave	Nombre		Clave	Nombre	
100.00							
RH12	Lerma-Santiago	I	R. Verde Grande	79.36	a	R. San Pedro	32.72
					b	R. Aguascalientes	17.76
					i	R. Encarnación	10.08
					j	R. Chicalote	14.29
					k	R. Morcinique	4.51
		J	Juchipila	20.64	e	R. Calvillo	19.94
					f	R. Zapochi	0.70

(INEGI, 2015)

2.6.3. Minería

La minería en el estado tuvo sus inicios en tiempos de la Colonia, y debido al descubrimiento y explotación del yacimiento de plata en el cerro de la Bufa en Zacatecas se hizo necesario abrir caminos entre Zacatecas y Guadalajara, a

la ciudad de México, Querétaro y Michoacán a donde llevaban buena parte de la plata extraída para proteger el transporte de este mineral (SGM, 2016).

Los primeros trabajos mineros, datan de 1548, sobre la veta Santa Francisca, fundándose Real de Asientos. La mina Santa Francisca, ha abierto y cerrado operaciones en varias ocasiones y actualmente se encuentra en funcionamiento (SGM, 2016).

Existen 5 Regiones Mineras dentro del estado (Tepezalá – Asientos, Palo Alto, Jesús María, Calvillo y Cosió) y solo un Distrito Minero (Tepezalá – Asientos) dentro del estado. Actualmente se encuentra explotando el Grupo FRISCO, S.A. de C.V., con la compañía Real de Ángeles, S.A. de C.V. (Unidad Santa Francisca) con una capacidad instalada de 3,500 ton/día, en donde se lleva a cabo la extracción de Cobre, Plomo, Zinc, Oro y Plata (SGM, 2016).

2.7. Antecedentes

En cuanto a investigaciones realizadas, mucho se ha investigado sobre la contaminación en el Río San Pedro, destacan aquellas llevadas a cabo y/o dirigidas por los Doctores: Francisco Javier Avelar González y Roberto Rico Martínez, ambos Docentes de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, sin embargo, la mayoría se enfoca en el cauce del propio Río San Pedro y poco se sabe o se ha estudiado sobre los afluentes (Guzman-Colis, 2011; Mora, 2007; Ramos, 2012; Santos, Ramírez, Hernández, Azuara & Rico, 2007). Hasta el momento, solo la tesis doctoral realizada a cabo por el Lic. en Ciencias Ambientales Kerry Nigel Mitchell y el equipo del Dr. Francisco Javier Avelar titulada: "Stabilisation of Metals in Soils and Sediments Contaminated by Mining Activity Using Biomass", enfoco su investigación en el Río Piedras Negras, el cual se encuentra dentro del Distrito Minero de Tepezalá – Asientos; en ella se analizó

la concentración total del metal y la concentración de las especies químicas usando una modificación del método de Tessier et. al. (1979), aunado todo lo anterior con una caracterización fisicoquímica del sustrato, encontrándose que dichas propiedades influyen sobre la movilidad del metal (Mitchell, Ramos, Guerrero, Yamamoto, Flores & Avelar, 2016).



3. JUSTIFICACIÓN

*Sorprendernos de algo es el primer paso
de la mente hacia el descubrimiento.
— Louis Pasteur —*

El estudio de los metales pesados es de gran importancia debido a su toxicidad, además algunos de ellos, al ser absorbidos, se bioacumulan y biomagnifican en los organismos, transportándose a todos los eslabones de la cadena alimenticia.

A diferencia de muchos compuestos orgánicos, que eventualmente se degradan a dióxido de carbono y agua, los metales circulan libremente entre la atmosfera, el agua, el suelo y el sedimento.

Para que un metal que se encuentra en el suelo o sedimento sea liberado, depende en gran medida de la forma química en la que se encuentre el metal, y esto a su vez, está determinado en gran parte por variables fisicoquímicas.

El Río San Pedro ha sido sujeto de varios estudios ambientales y toxicológicos, entre los que se encuentran el análisis de metales a través de su cauce. Sin embargo, dichos estudios muestran la concentración total de los metales, la cual no necesariamente implica que la totalidad del metal sea móvil y/o biodisponible a los organismos.

Por tal motivo, en el presente trabajo, se pretende llevar a cabo la determinación total del metal y su especiación química mediante el Procedimiento de Extracción Secuencial modificado de Tessier, lo que nos permitirá determinar el porcentaje de movilidad del metal. Además, se completará el trabajo mediante la determinación de algunos Indicadores Ambientales (Índice de Geo acumulación y Factor de Enriquecimiento). Aunado a los análisis anteriores, se realizarán pruebas de Toxicidad Aguda sobre *Alona*

guttata y *Lecane quadridentata*, para evaluar si el sitio puede considerarse tóxico y pone en riesgo la vida acuática. Todo lo anterior se llevará a cabo en muestras de suelo y sedimento provenientes desde el Distrito Minero Tepezalá – Asientos hasta la Presa El Niágara.



4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

*Un científico tiene la libertad, y debe tomársela,
de plantear cualquier cuestión, de dudar de
cualquier afirmación, de buscar cualquier
evidencia, de corregir errores.
— Robert Oppenheimer —*

4.1. Hipótesis

Los Metales presentes en Sedimentos y Suelos aledaños a afluentes del Río San Pedro, afectados por Actividad Minera, presentan una alta Movilidad implicando un Riesgo Toxicológico Potencial.

4.2. Objetivos

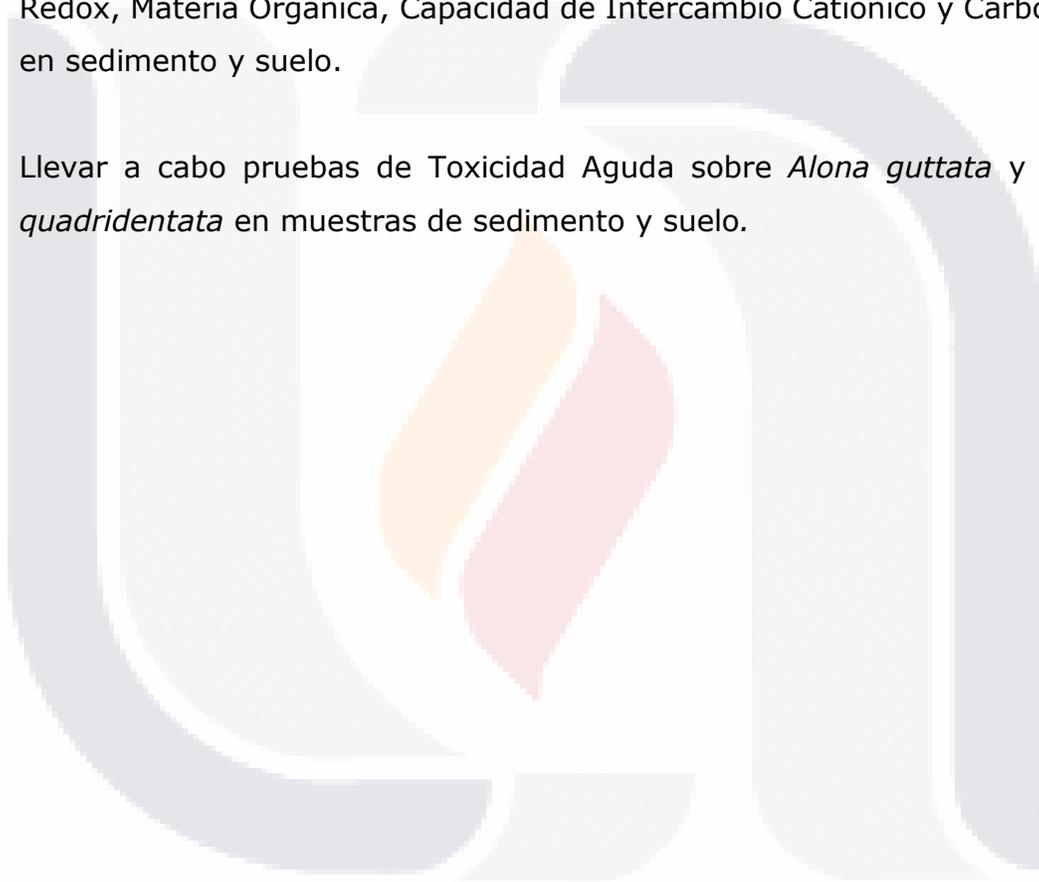
4.2.1. Objetivos Generales

1. Determinar la Movilidad de Metales en Sedimentos y Suelos Aledaños a Afluentes del Río San Pedro Afectados por la Actividad del Distrito Minero de Tepezalá – Asientos.
2. Determinar la Toxicidad Aguda de Elutriados obtenidos de Sedimentos y Suelos Aledaños a Afluentes del Río San Pedro Afectados por la Actividad del Distrito Minero de Tepezalá – Asientos.

4.2.2. Objetivos Particulares

1. Determinar la concentración total de los metales en muestras de sedimento y suelo.

2. Caracterizar geoquímicamente la distribución de los metales en sedimento y suelo.
3. Determinar el Factor de Movilidad, Índice de Geo Acumulación y Factor de Enriquecimiento en sedimento y suelo.
4. Caracterizar fisicoquímicamente (pH, Conductividad Eléctrica, Potencial Redox, Materia Orgánica, Capacidad de Intercambio Catiónico y Carbonatos) en sedimento y suelo.
5. Llevar a cabo pruebas de Toxicidad Aguda sobre *Alona guttata* y *Lecane quadridentata* en muestras de sedimento y suelo.



5. METODOLOGÍA

El investigador verdaderamente exitoso es casi siempre un hombre que elige un problema importante y después decide la mejor manera de resolverlo.

— Sir John Henry Gaddum —

5.1. Muestreo de Suelo y Sedimento.

Los puntos muestreados se seleccionaron considerando factores topográficos, geológicos e hidrológicos, además de cercanía de poblaciones y sitios muestreados en proyectos anteriormente realizados por el equipo de trabajo del Laboratorio de Estudios Ambientales de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Los muestreos fueron de tipo simple y de corte transversal, de acuerdo a la metodología descrita por la USEPA (2001); efectuándose por etapas, la primera de ellas en temporada de sequía (Abril – Mayo) y la segunda en temporada de lluvias (Octubre), debido a cuestiones de logística, unas muestras se recolectaron en el año del 2015 y otras en el 2016.

La posición geográfica de todos los sitios de muestreo se determinó mediante un equipo GPS Magellan Systems (S/N 0038549).

En cada sitio se tomaron muestras compuestas de sedimentos y suelo superficial (1 Kg para c/u) por la técnica de cuarteo. La toma de muestra de suelo superficial se llevó a cabo según lo descrito en la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006 (2006), mientras que la toma de muestras de sedimentos fue mediante una selección aleatoria simple, colectando muestras de superficie a 10 cm de profundidad de acuerdo al método de la EPA 823-B-01-002 (USEPA, 2001). Posterior a su recolección, las muestras se secaron a 60°C, homogenizaron y tamizaron (<0.5 mm).

5.2. Análisis del Metal

5.2.1. Concentración Total

Para la cuantificación de la concentración total del metal en las muestras de suelo y sedimento, se utilizó una modificación al método ISO-11466 (1995), la metodología se muestra en la Figura 2.

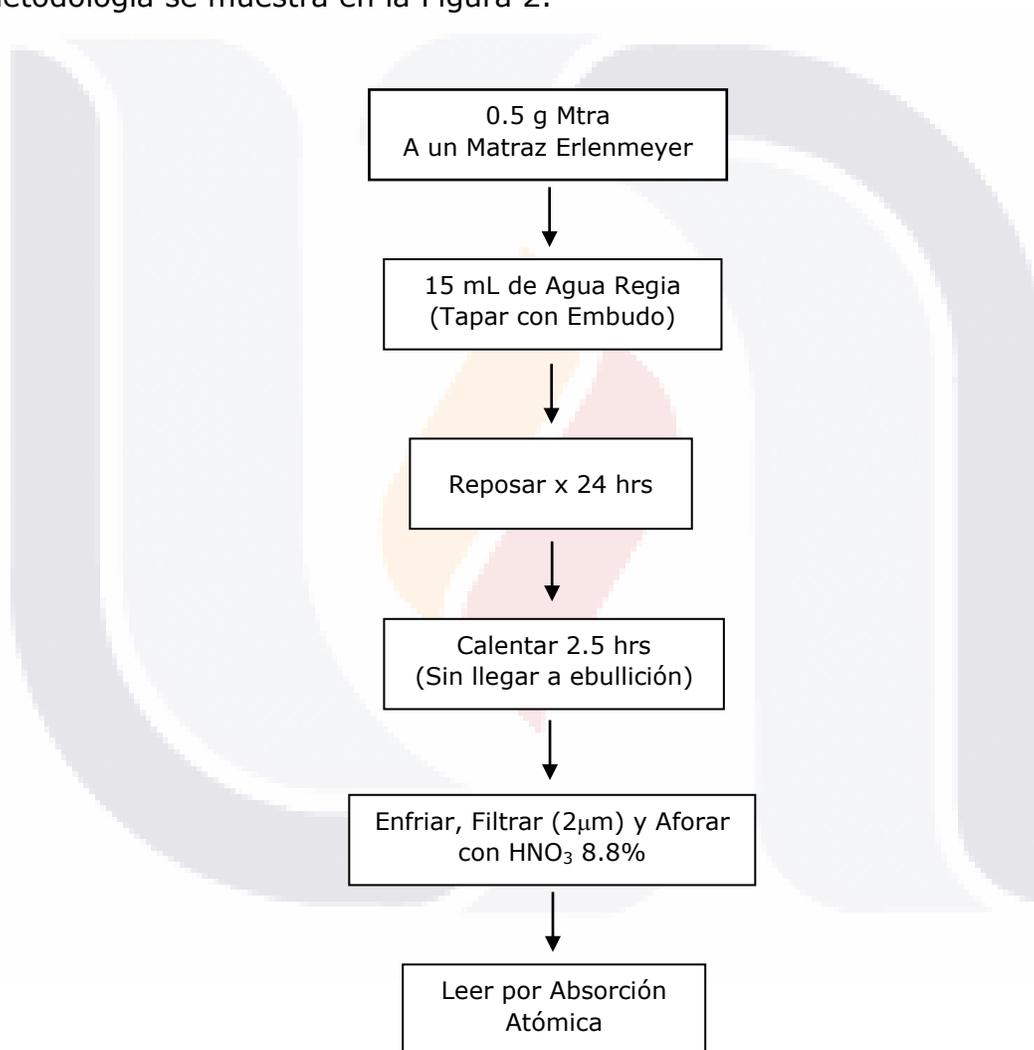


Figura 2. Diagrama de Flujo para la Determinación de Metales por Digestión Abierta, método modificado ISO-11466 (1995).

5.2.2. Especiación Química

La especiación del metal se determinó aplicando el Procedimiento de Extracción Secuencial modificado de Tessier y colaboradores (1979). Aproximadamente 1 g del sustrato se pesó y entre cada etapa se centrifugo por 15 mins a 5000 rpm para extraer el sobrenadante y minimizar la pérdida de material sólido. Detalles del procedimiento se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Agente Extractor y Condiciones Operacionales para cada Fracción^[a]

Fracción	Agente Extractor	Condiciones de Extracción
F1 Intercambiable	8 mL MgCl ₂ 1.0 M (pH 7.0)	Agitación continua x 1 h a temperatura ambiente.
F2 Unida a Carbonatos	8 mL CH ₃ COONa 1.0 M (pH 5.0)	Agitación continua x 5 h a temperatura ambiente
F3 Unida a Óxidos de Fe/Mn	20 mL NH ₂ OH·HCl in 25 % (v/v) Ac. acético	Agitación ocasional x 6 h a 96°C
F4 Unida a Materia Orgánica	3 mL HNO ₃ 0.02 M + 5 mL H ₂ O ₂ 30% (p/v) (pH 2.0) 3 mL H ₂ O ₂ 30% (p/v) (pH 2.0) 5 mL NH ₄ OAc 3.2 M	Agitación ocasional x 2 h a 85°C Agitación ocasional x 3 h a 85°C Agitación continua x 30 min a temperatura ambiente
F5 Residual	25 mL agua regia	Protocolo ISO-11466:1995

^[a] 1 g Sustrato.

5.2.3. Lixiviación del Metal

La lixiviación se define como la parte líquida que se percola a través de un sólido, es una prueba que permite determinar rápidamente la cantidad del contaminante que bajo condiciones naturales puede ser retirado del sustrato (Cabildo, Cornago, Escolástico, Esteban, López & Sanz, 2013; Rizzotto, 2007).

El protocolo desarrollado por Quevauviller (1998) aprobado por la Standards Measuring and Testing (SMT) se implementó para realizar la prueba de lixiviación. Detalles del procedimiento se muestran en la Figura 3.

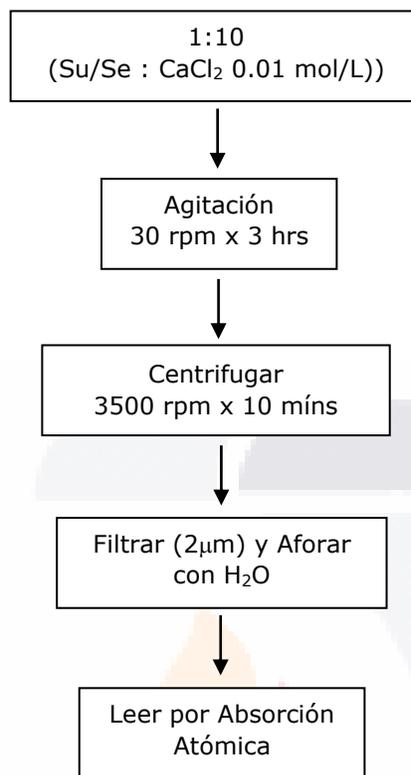


Figura 3. Diagrama de Extracción aplicado para la Prueba de Lixiviación (Quevauviller, 1998).

5.2.4. Cuantificación del Metal

La cuantificación del metal se llevó a cabo mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (Perkin Elmer Mod. PinAAcle 900H). Dependiendo del metal estudiado y la sensibilidad requerida, se empleó la modalidad de flama (3111 B) u horno de grafito (3113 B) de acuerdo a las recomendaciones APHA (2005).

5.2.5. Control de Calidad

Todas las determinaciones analíticas se desarrollaron bajo los controles de calidad recomendados en los Métodos Normalizados (3020B), incluyendo blancos, duplicados y fortificados (APHA, 2005). Límites de Detección y Límite

de Cuantificación también fueron calculados (Funk, Dammann & Donnevert, 1995).

El uso de Materiales de Referencia Estandarizados (SRM) se utilizaron para evaluar la exactitud y precisión del método; Montana Soil 2710, San Joaquin Soil 2709 y Buffalo River Sediment 8704 fueron los SRM elegidos.

5.3. Propiedades Fisicoquímicas en Suelo y Sedimento

Las propiedades fisicoquímicas de las muestras de suelo y sedimento se determinaron sobre un extracto líquido, obtenido por agitación a 60 rpm durante 48 hrs con agua destilada en una relación 1:10 p/v (Carter and Gregorich, 2008; CEN/TS 14997, 2006; Nagib & Ionue, 2000; Radojević & Bashkin, 2006).

Las propiedades fisicoquímicas que se determinaron fueron: pH, Potencial Redox (Eh) y Conductividad Eléctrica (CE) de acuerdo a la Norma Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, Materia Orgánica (método Walkley – Black), Carbonatos y Bicarbonatos (método titulométrico) y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (método USEPA 9081) (SEMARNAT, 2002; USEPA, 1986).

5.4. Indicadores Ambientales

5.4.1. Factor de Movilidad

El factor de movilidad (FM) describe el movimiento potencial del metal fuera del medio contaminante (Ogundiran & Osibanjo, 2009). La determinación del contenido del metal en las fracciones obtenidas mediante la metodología de Tessier, nos permitió calcular el factor de movilidad mediante la siguiente ecuación:

$$MF = \frac{F1+F2}{F1+F2+F3+F4+F5} \times 100 \quad (1)$$

(Iwegbue, 2013)

5.4.2. Índice de Geo Acumulación

El índice de geo acumulación (Igeo), relaciona las cargas actuales del metal con las anteriores a la civilización, fue descrito por Müller (1969) y se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 B_n} \right) \quad (2)$$

donde C_n es la concentración del metal en la muestra, B_n es el valor de fondo geoquímico del metal (McLennan, 2001), la constante 1.5 compensa las fluctuaciones de origen natural y antropogénico. El resultado es comparado con siete clases (Tabla 3) propuestas por Müller (1969).

Tabla 3. Igeo y Clasificación de la Contaminación del Metal

Clase	Valor	Grado de Contaminación
0	< 0	No contaminado
1	0 - 1	No contaminado a Moderadamente Contaminado
2	1 - 2	Moderadamente Contaminado
3	2 - 3	De Moderado a Fuertemente Contaminado
4	3 - 4	Fuertemente Contaminado
5	4 - 5	De Fuerte a Extremadamente Contaminado
6	> 5	Extremadamente Contaminado

5.4.3. Factor de Enriquecimiento

El Factor de Enriquecimiento (FE), determina la contribución antropogénica del metal en el sitio, hace uso de un elemento normalizador, generalmente se usa un elemento muy abundante; se determinó mediante la siguiente ecuación (Khalil, Hanich, Bannari, Zouhri, Pourret & Hakkou, 2013):

$$FE = (Pb_{Mtra}/Al_{Mtra})/(Pb_{Crust}/Al_{Crust}) \quad (3)$$

donde los subíndices "Mtra" y "Crust" indican la concentración de la muestra o el valor de fondo geoquímico. Los Valores para sustituir en "Crust" se consideraron los propuestos por McLennan (2001). El Factor de Enriquecimiento considera 5 categorías o clases (Tabla 4).

Tabla 4. Clases del FE respecto a la Calidad de la Muestra

Clase	Valor	Grado de Enriquecimiento
1	< 2	No enriquecido
2	2 - 5	Moderadamente Enriquecido
3	5 - 20	Significativamente Enriquecido
4	20 - 40	Altamente Enriquecido
5	> 40	Extremadamente Enriquecido

5.5. Pruebas de Toxicidad Aguda

La investigación de los efectos agudos pretende clasificar a las sustancias por su peligrosidad. Se entiende por toxicidad aguda la capacidad de una sustancia para producir efectos adversos tras una sola exposición (Repetto & Repetto, 2009) durante un periodo corto, usualmente en días (Castillo, 2004).

Por ser un parámetro muy evidente, se ha considerado tradicionalmente la dosis letal media (DL₅₀) como el mejor indicativo de la capacidad tóxica de una sustancia (Repetto & Repetto, 2009), sin embargo, por tratarse de un contaminante ambiental, el concepto cambia a Concentración Letal Media (CL₅₀): que representa la concentración a la cual el 50% de los organismos expuestos a ese tóxico mueren (Hodgson, 2004).

5.5.1. Obtención de Elutriado

Por tratarse de una muestra sólida, primeramente, se obtuvo un extracto del suelo y el sedimento (elutriado). El procedimiento para la obtención del elutriado se basó en lo recomendado por la American Society for Testing and Materials Guide E1391 (ASTM, 2000) y USEPA-US Army Corps of Engineers (USEPA-USACE, 1998). La metodología se muestra en el siguiente diagrama:

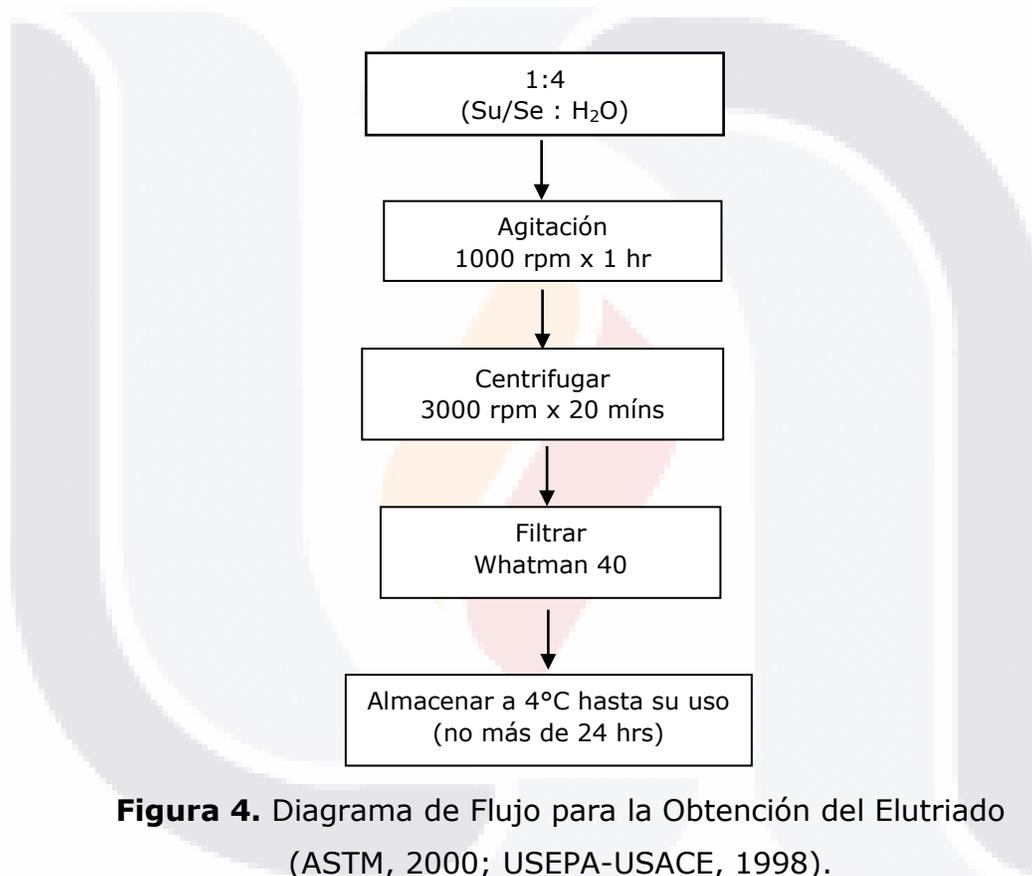


Figura 4. Diagrama de Flujo para la Obtención del Elutriado (ASTM, 2000; USEPA-USACE, 1998).

5.5.2. Prueba de Toxicidad Aguda

Para la realización de la prueba se seleccionó a los organismos: *Alona guttata* (cladóceros) y *Lecane quadridentata* (rotíferos). La metodología seguida para realizar la prueba de toxicidad fue la descrita en la Norma Mexicana NMX-AA-087-SCFI-2010 usada para evaluar la toxicidad aguda con *Daphnia magna* (2010). Este método usa neonatos de no más de 24 horas y se exponen durante

48 horas al tóxico bajo una temperatura controlada (25°C) bajo un ciclo de Luz:Oscuridad (L:O) 16:8 hrs; para la prueba se usaron microplatos de poliestireno con 24 pozos (Costar Co. USA), con 10 organismos por pozo por triplicado. Posterior a ese tiempo se procedió al conteo de organismos muertos.

5.5.2.1. Cálculo de la CL_{50}

Aquellas pruebas que resultaron tóxicas al análisis discriminatorio (elutriado al 100%), se procedió a realizar la prueba con diluciones, el dato de mortalidad obtenido se utilizó para determinar la CL_{50} . El método utilizado para el cálculo, fue el método denominado PROBIT como lo recomienda la Norma Mexicana NMX-AA-087-SCFI-2010 (2010).

5.5.2.2. Cálculo de las Unidades de Toxicidad Aguda

Las Unidades de Toxicidad Aguda (UTa), son otra manera de expresar el grado de toxicidad de una muestra, de la cual no se conoce la concentración. Se calcula mediante la siguiente ecuación (NMX-AA-087-SCFI-2010, 2010):

$$UTa = 100/CL_{50} \quad (4)$$

en donde 100 es la concentración inicial de la muestra referida en por ciento.

5.6. Análisis Estadístico

El análisis de estadística descriptiva e inferencial se llevó a cabo empleando diferentes softwares, según las necesidades; Excel 2016, Minitab v.15 o GraphPad Prism v6.01. En todos los casos se manejó un Nivel de Significancia de 0.05 (equivalente al 5%).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

*El descubrimiento es ver lo que todo el mundo ha visto
y pensar lo que nadie ha pensado.
— Albert Szent-Györgi —*

6.1. Puntos de Muestreo

Un total de 24 sitios fueron muestreados, desde el poblado de Asientos hasta la Presa El Niágara; la Figura 5 muestra, gráficamente, la localización de los sitios donde se tomó la muestra de suelo y sedimento. Por su parte las coordenadas de localización se pueden observar en la Tabla 5.

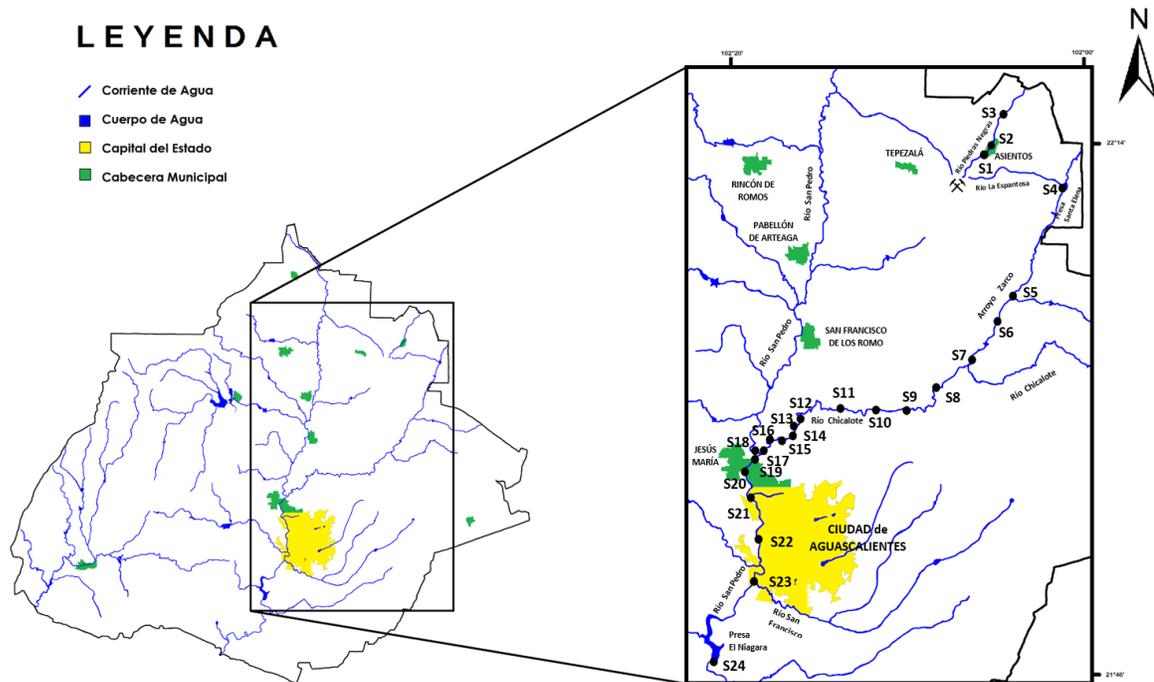


Figura 5. Área de estudio y localización geográfica de los sitios muestreados.

Tabla 5. Coordenadas de Localización de los Puntos Muestreados.

Sitio	Nombre	Cuerpo de Agua	Latitud (N)	Longitud (O)	Observaciones
S1	Entrada Asientos	Río Piedras Negras	22°13'48"	102° 6'11"	Agrícola
S2	Asientos	Río Piedras Negras	22°14'22"	102° 5'27"	Residencial / Comercial
S3	Salida Asientos	Río Piedras Negras	22°16'31"	102° 4'14"	Agrícola
S4	Ciénega Grande	Tanque Sta. Elena	22°12'16"	102° 1'10"	Agrícola
S5	Villa Juárez	Arroyo Zarco	22° 6'1"	102° 3'47"	Residencial / Comercial
S6	El Llaverero	Arroyo Zarco	22° 3'40"	102° 5'57"	Rancho Agropecuario
S7	La Dichosa	Arroyo Zarco	22° 2'41"	102° 6'45"	Residencial / Comercial
S8	Jaltomate	Río Chicalote	22° 1'29"	102° 8'48"	Residencial / Comercial
S9	El Becerro	Río Chicalote	22° 0'11"	102°10'36"	Rancho Agropecuario
S10	Cañada Onda	Río Chicalote	22° 0'15"	102°12'0"	Residencial / Comercial
S11	Loretito	Río Chicalote	22° 0'18"	102°14'33"	Residencial / Comercial
S12	Gómez Portugal	Río Chicalote	21°59'42"	102°16'51"	Agrícola
S13	Cremería	Río Chicalote	21°59'24"	102°17'15"	Residencial / Comercial
S14	Puente Carr. 45	Río Chicalote	21°59'7"	102°17'19"	Residencial / Comercial
S15	PIVA	Río Chicalote	21°58'49"	102°17'33"	Industrial
S16	La Florida	Río Chicalote	21°58'55"	102°18'1"	Agrícola
S17	Paso Blanco	Río Chicalote	21°58'20"	102°18'58"	Residencial / Comercial
S18	Los Ramírez	Río San Pedro	21°58'6"	102°19'20"	Residencial / Comercial
S19	Los Arenales	Río San Pedro	21°57'54"	102°19'19"	Residencial / Comercial
S20	San Miguelito	Río San Pedro	21°57'15"	102°20'5"	Residencial / Comercial
S21	San Nicolás	Río San Pedro	21°55'38"	102°19'47"	Residencial / Comercial
S22	Curtidores	Río San Pedro	21°53'20"	102°19'20"	Residencial / Comercial
S23	San Francisco	Río San Pedro	21°51'0"	102°19'44"	Residencial / Comercial
S24	Niágara	Presa El Niágara	21°46'47"	102°22'14"	Agrícola

6.2. Análisis del Metal

Posterior a su recolección, secado y tamizaje, las muestras de suelo y sedimento fueron sometidas a Digestión Ácida para la cuantificación de los Metales. Los metales seleccionados para el presente estudio fueron: Plomo (Pb), Cromo (Cr) y Zinc (Zn).

6.2.1. Metal Total

A los 24 sitios muestreados, se les determinó la concentración total de Pb, Cr y Zn por Absorción Atómica en la modalidad de Flama, los resultados los podemos apreciar en el Anexo A.

Después de la cuantificación de la concentración total de los metales, el estudio se centró en 8 puntos. Los criterios utilizados para su selección fueron, entre otros, su localización y alta concentración, tomando como guía los límites permisibles para suelo según la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004) y los límites reportados por el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME, 2006), Tabla 6; de manera similar, para sedimento se consideraron los límites reportados por el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME, 2002), Tabla 7.

Tabla 6. Límites Permisibles para Suelo

Uso de Suelo	Pb ^[a] [mg kg ⁻¹]	Pb ^[b] [mg kg ⁻¹]	Cr ^[a] [mg kg ⁻¹]	Cr ^[b] [mg kg ⁻¹]	Zn ^[a] [mg kg ⁻¹]
Agrícola	70	400	64	280	200
Residencial	140	400	64	280	200
Comercial	260	400	87	280	360
Industrial	600	800	87	510	360

^[a] Soil Quality Guidelines (CCME, 2006).

^[b] Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004).

Tabla 7. Límites Permisibles para Sedimento de Agua Dulce^[a]

Metal	Unidades	TEL	PEL
Pb	mg kg ⁻¹	35.0	91.3
Cr	mg kg ⁻¹	37.3	90.0
Zn	mg kg ⁻¹	123.0	315.0

^[a] Sediment Quality Guidelines (CCME, 2002).

TEL = Threshold Effect Level (Nivel de Efecto Umbral)

PEL = Probable Effect Level (Nivel de Efecto Probable)

Los puntos seleccionados fueron: S1, por ser el punto más cercano a la Mina, además de mostrar los valores más altos en algunas lecturas; S2, segundo punto con las concentraciones más elevadas en algunas lecturas, además de que este

punto se encuentra dentro del poblado de Tepezalá; S4, sitio que representa a una Presa cercana a la Mina, también mostro concentraciones elevadas en algunas lecturas; S15, punto que se encuentra después del Parque Industrial del Valle de Aguascalientes (PIVA), único punto que mostro concentraciones por encima de los límites permitidos por CCME (2006) para los tres metales en sedimento; S22, sitio dentro de la ciudad de Aguascalientes con altas concentraciones en Pb y Zn; S24 (Presa el Niágara), se seleccionó por ser el cuerpo receptor final de agua del estado y resulta importante el conocer la calidad de agua que sale del estado; S6 y S12 mostraron algunos resultados altos y sirvieron para dar continuidad al curso del río. La Tabla 8 muestra la concentración encontrada en los 8 puntos seleccionados.

Tabla 8. Concentración Total del Metal en los 8 puntos seleccionados.

Sitio	Sustrato ^[a]	Pb [mg kg ⁻¹]		Cr [mg kg ⁻¹]		Zn [mg kg ⁻¹]	
		Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias
S1	Su	527.2	164.8	12.4	4.6	2277.8	1022.2
	Se	1892.8	4273.3	29.1	24.6	8458.7	21799.2
S2	Su	441.6	207.4	7.3	2.5	850.9	748.4
	Se	876.1	958.0	23.4	14.2	3567.9	4043.4
S4	Su	244.9	106.9	3.6	1.2	292.2	167.8
	Se	381.5	39.3	7.4	26.1	371.2	74.5
S6	Su	23.0	18.7	7.0	6.7	80.5	92.8
	Se	16.3	45.1	7.2	8.0	130.7	139.6
S12	Su	21.4	16.9	2.5	5.9	41.6	84.7
	Se	26.9	45.8	9.1	63.0	123.8	519.4
S15	Su	37.4	15.7	53.1	9.4	238.1	93.3
	Se	50.5	37.7	87.3	83.8	489.4	360.1
S22	Su	70.2	65.4	28.1	19.6	347.8	249.8
	Se	64.6	221.6	23.2	29.5	310.2	856.3
S24	Su	40.5	22.1	2.8	1.5	63.6	103.9
	Se	37.1	42.2	4.2	7.1	90.1	112.8

^[a] Su: Suelo, Se: Sedimento

Como se puede observar los puntos S1 y S2, ambos pertenecientes al Río Piedras Negras, son los que presentan la mayor concentración tanto de Pb como de Zn, esto a pesar de que la mina extrae dichos metales como parte de su actividad (SGM, 2016), por lo que podemos concluir que existe una cantidad considerable de residuos provenientes de la actividad minera aún de metales que se supone recupera para su venta posterior. Para el punto S4 (Presa Santa Elena) es necesario destacar que durante la temporada de estiaje la presa se encontraba casi vacía y durante la temporada de lluvia ya contenía más cantidad de agua; la concentración de los metales en el suelo disminuyo en todos los

casos al pasar de temporada de estiaje a temporada de lluvia debido a la escorrentía del agua de lluvia a través del suelo; en el caso del sedimento, se aprecia que para Pb y Zn disminuye, sin embargo, para el Cr aumento, posiblemente esto es debido a la poca solubilidad del Cr en el agua y a que el Cr no es un metal que la mina este recuperando para poderlo comercializar. Caso diferente se observa en el punto S24 (Presa El Niágara) la cual siempre tuvo agua y por lo tanto no hubo variación en su volumen por lo que no se aprecia una disminución muy notoria en la concentración de los metales como en el caso de la Presa Santa Elena, al contrario, en algunos casos la concentración aumento, por ejemplo, la concentración de Zn y en algunos casos la variación en la concentración fue tan poca que no se puede afirmar que la temporada influye.

Según los valores reportados por McLennan (2001), la concentración promedio de Pb en la corteza terrestre es de 17 mg kg^{-1} , la Figura 6 compara dicho valor con los obtenidos en el suelo para los 8 sitios seleccionados.

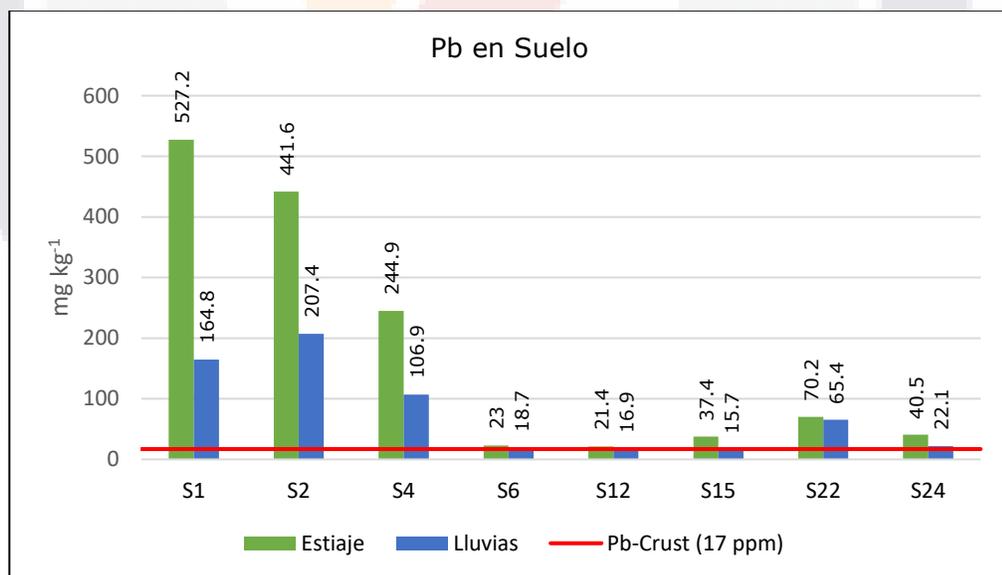


Figura 6. Concentración de Pb en suelo, respecto al valor promedio de la corteza terrestre.

Se puede apreciar que prácticamente todos los suelos presentan una concentración por encima de 17 mg kg^{-1} , solo dos valores estuvieron por debajo (S12 y S15) ambos en la temporada de lluvias; el valor promedio fue de 126.5 mg kg^{-1} y la concentración oscilo entre $15.7 - 527.2 \text{ mg kg}^{-1}$. De manera global, se aprecia que la concentración de Pb disminuyo en la temporada de lluvia para el sustrato suelo, debido muy probablemente a la escorrentía del agua de lluvia.

Si comparamos los valores obtenidos del suelo contra la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004), la cual tiene un margen más amplio en cuanto a la concentración permitida, solo el punto S1 y S2 superan los 400 mg kg^{-1} para suelo destinado a uso agrícola y residencial. Por el contrario, si comparamos los resultados contra la Guía Canadiense para Suelo (CCME, 2006), que maneja márgenes más pequeños, se encontró que para el Suelo, los puntos S1 y S4 superan el valor permitido para zonas agrícolas hasta por siete y tres veces más, en temporada de estiaje, efecto que disminuye en temporada de lluvias, pero que aún supera el valor de los 70.0 mg kg^{-1} ; el punto S2, ubicado dentro del poblado, también supera por tres su valor en la temporada de estiaje; el resto de los sitios están por debajo del criterio de comparación.

En cuanto al sedimento, el comportamiento es más variado, el rango oscilo de $16.3 - 4273.3 \text{ mg kg}^{-1}$, con un promedio de 563.1 mg kg^{-1} y solo el punto S6 en la temporada de estiaje, estuvo levemente por debajo de 17 mg kg^{-1} (Figura 7).

El punto S1 aumento su concentración de Pb durante la temporada de lluvias, mismo comportamiento reporto Mitchell et al. (2016) en la misma área, probablemente debido al arrastre de residuos provenientes de la mina los cuales se acumulan en el sedimento; el sitio S22, mostro un comportamiento similar, aumentando más del triple con respecto a su concentración en temporada de estiaje, valor que muy posiblemente se deba de desechos generados dentro de la Ciudad de Aguascalientes.

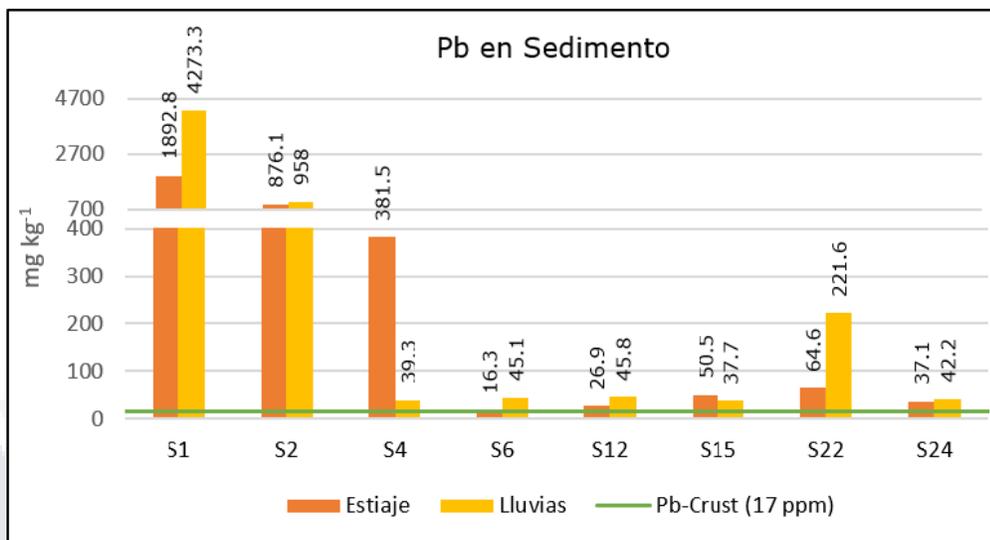


Figura 7. Concentración de Pb en sedimento, respecto al valor promedio de la corteza terrestre.

Las concentraciones de sedimento se compararon contra los Niveles de Efecto Umbral (TEL = Threshold Effect Level) y los Niveles de Efecto Probable (PEL = Probable Effect Level) reportados en la Guía Canadiense para Sedimento en Agua Dulce (CCME, 2002) y se observó que solo S6 y S12 no superaron el valor Umbral (TEL); sin embargo, S1 y S2 superaron (en 46 y 10 veces, respectivamente) el valor Probable (PEL), de acuerdo con Kabata-Pendias & Mukherjee (2007) ríos contaminados, especialmente por industrias y minas, muestran contenidos de 700 a 2600 mg kg⁻¹; S4 en temporada de estiaje y S22 en temporada de lluvia también se encuentra encima del valor PEL, implicando un riesgo para el desarrollo de la vida acuática.

Estadísticamente hablando, no hubo diferencia significativa entre los valores de Pb entre temporadas, tomando como criterio un $\alpha=0.5$ (Figura 8).

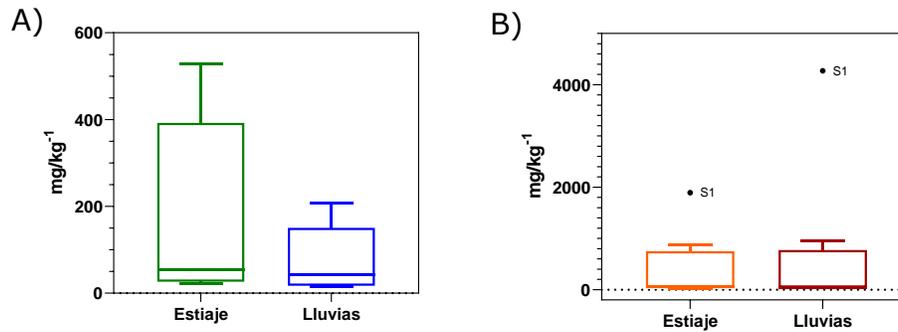


Figura 8. Análisis comparativo de Pb por temporada. A) Suelo ($p=0.235$). B) Sedimento ($p=0.621$)

Para el caso del Cr, ningún sitio muestreado en suelo supero el valor promedio de Cr en la corteza terrestre, el cual es de 83.0 mg kg^{-1} (McLennan, 2001), el rango oscilo entre $1.2 - 53.1 \text{ mg kg}^{-1}$, con un promedio de 10.5 mg kg^{-1} (Figura 9).

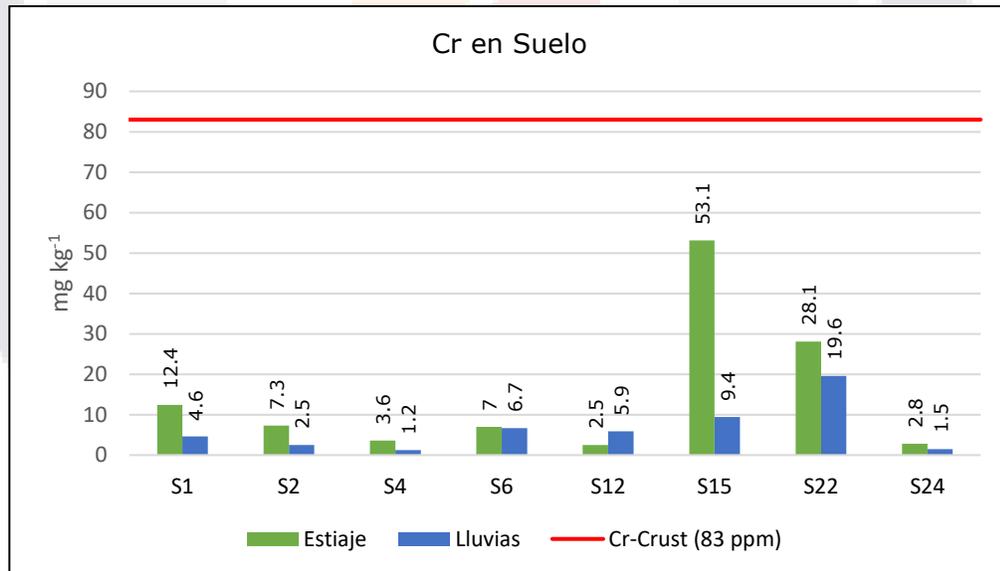


Figura 9. Concentración de Cr en suelo, respecto al valor promedio de la corteza terrestre.

Ningún sitio, supero los límites permisibles permitidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004). Lo mismo se aprecia si se comparan los resultados con respecto a los valores Guía Canadienses para suelo (CCME,

2006). Al igual que el Pb, el comportamiento general para el sustrato suelo fue que disminuyo la concentración de Cr al pasar de la temporada de estiaje a la temporada de lluvias.

Para las muestras de sedimento, solo el punto S15, perteneciente al Parque Industrial del Valle de Aguascalientes (PIVA) supero ligeramente dicho valor en ambas temporadas, el rango estuvo entre 4.2 – 87.3 mg kg⁻¹ y el promedio fue de 28.0 mg kg⁻¹ (Figura 10).

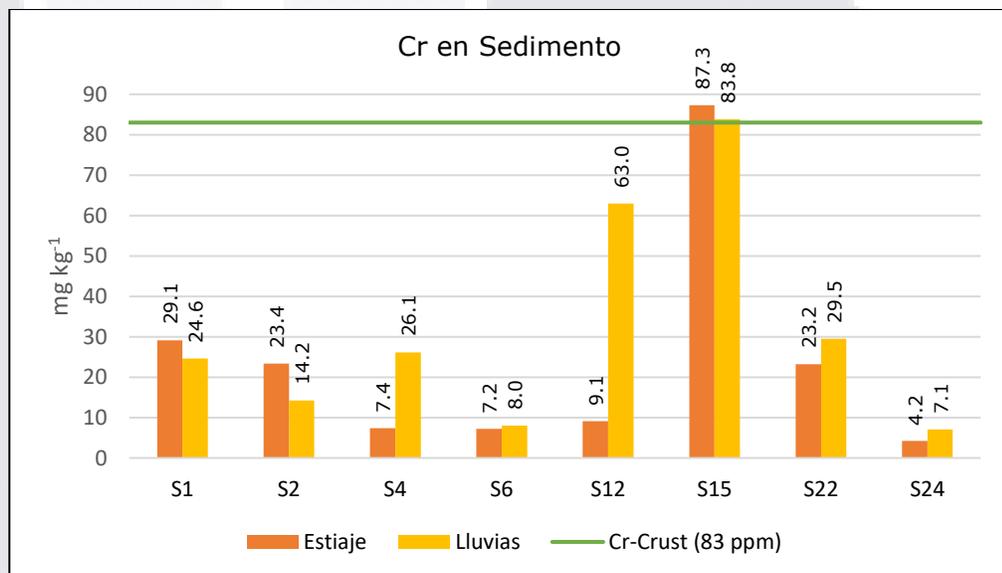


Figura 10. Concentración de Cr en sedimento, respecto al valor promedio de la corteza terrestre.

Con respecto a la Guía Canadiense para Sedimento en Agua Dulce (CCME, 2002) se observó que S12 en temporada de lluvia supero por el doble el valor Umbral (TEL), indudablemente existe una fuente de contaminación cercana al sitio que se encuentra descargando residuos en esa zona; S15 (PIVA), en ambas temporadas, también supero dicho valor, inclusive los resultados se encuentran más próximos al valor Probable (PEL) que es de 90 mg kg⁻¹, valores que representan un riesgo para la vida acuática.

Estadísticamente hablando, tampoco hubo diferencia significativa entre los valores de Cr entre temporadas, tomando como criterio un $\alpha=0.5$ (Figura 11).

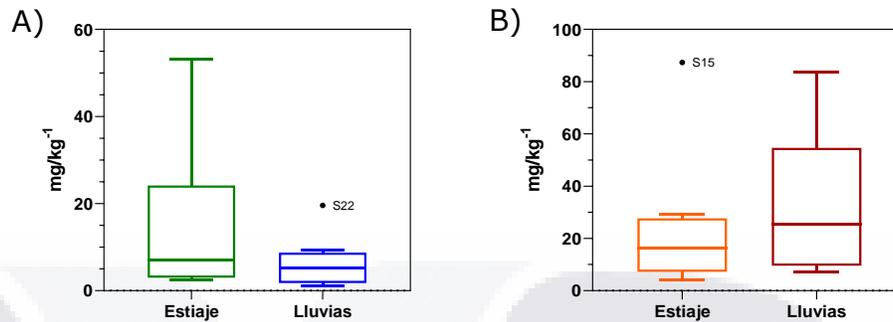


Figura 11. Análisis comparativo de Cr por temporada.
A) Suelo ($p=0.248$). B) Sedimento ($p=0.559$)

Finalmente, la concentración de Zn en el suelo, en la mayoría de los casos, estuvo por encima del valor promedio de 71 mg kg^{-1} reportado para la corteza terrestre (McLennan, 2001), solo dos sitios estuvieron por debajo de dicho valor (S12 y S24 ambos en temporada de estiaje), el rango osciló entre $41.6 - 2277.8 \text{ mg kg}^{-1}$ con un valor promedio de 422.2 mg kg^{-1} (Figura 12).

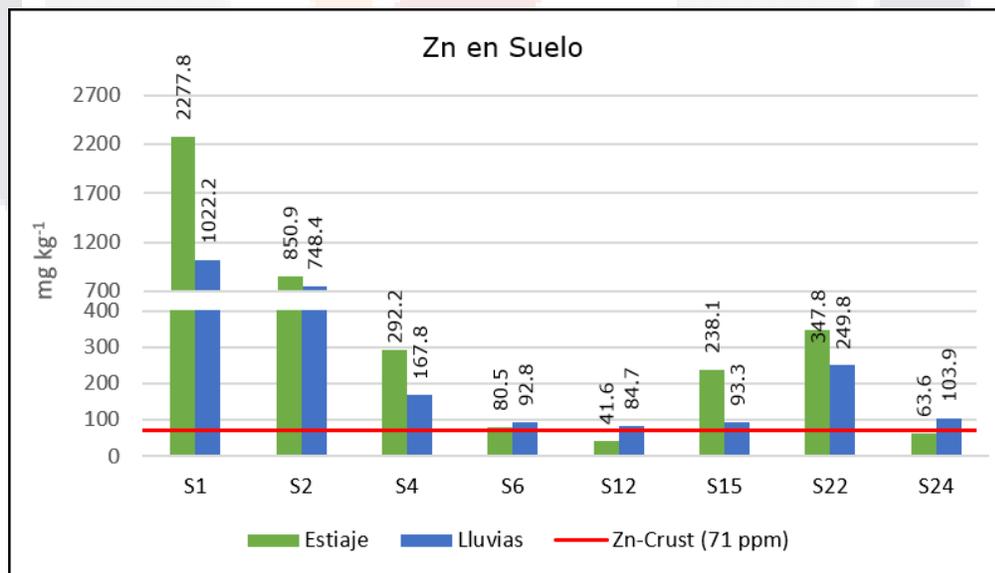


Figura 12. Concentración de Zn en suelo, respecto al valor promedio de la corteza terrestre.

La NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004) no maneja valores de referencia para este metal. De acuerdo a la Guía Canadiense para Suelo (CCME, 2006), los sitios S1, S2 y S22, en temporada de estiaje, superan el valor permitido en ambas temporadas; y S4 supera el valor de los 200 mg kg^{-1} en temporada de estiaje, disminuyendo la concentración en la temporada de lluvias. El comportamiento general para Zn en el sustrato suelo es el mismo que para Pb y Cr, disminuye la concentración en la temporada de lluvias. De acuerdo a Kabata-Pendias & Mukherjee (2007), suelos con influencia antropogénica, el Zn se encuentra en elevadas concentraciones, efecto que se hace evidente en S1 y S2.

Para el sedimento, todas las lecturas superaron los 71 mg kg^{-1} , el promedio fue de $2590.4 \text{ mg kg}^{-1}$ y el rango oscilo entre $74.5 - 21799.2 \text{ mg kg}^{-1}$ (Figura 13).

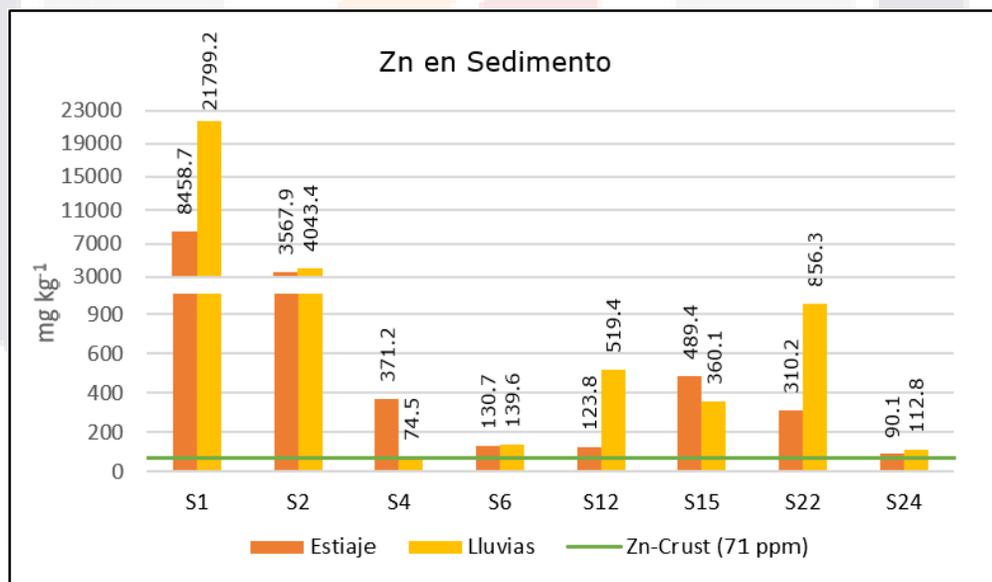


Figura 13. Concentración de Zn en sedimento, respecto al valor promedio de la corteza terrestre.

De acuerdo a la Guía Canadiense (CMME, 2002), el sedimento del sitio S4 (Presa Santa Elena) en temporada de lluvia se mantuvo por debajo del valor TEL, S24 (Presa El Niágara) también estuvo por debajo del valor TEL en ambas

temporadas, lo que demuestra que este cuerpo de agua disminuye significativamente la concentración del metal, permitiendo que el valor final este por debajo de niveles tóxicos, esto resulta importante ya que la Presa El Niágara es el último sitio de almacenamiento de agua antes de salir del Estado de Aguascalientes. Por otro lado, S1 y S2, en ambas temporadas, superaron el valor Probable (PEL) de 315 mg kg^{-1} por más de 10 veces su valor, convirtiendo dichos puntos en un riesgo para la vida acuática. De acuerdo con Kabata-Pendias & Mukherjee (2007), el Zn se acumula fácilmente en el sedimento y ríos contaminados con dicho metal han llegado a presentar valores de 2000 a 14000 mg kg^{-1} . S4 en estiaje, S12 en temporada de lluvias, S15 en ambas temporadas y S22 en lluvias, también superaron el valor PEL del Zn en Agua Dulce. S1 mostro el mismo comportamiento reportado por Mitchell et al. (2016), aumentando su concentración en la temporada de lluvias, probablemente debido al arrastre de residuos provenientes de la mina, acumulando el metal en el sedimento. S22, muestra un incremento en la concentración de Zn en la temporada de lluvias, superior al doble con respecto a la temporada de estiaje, lo que indica que muy probablemente existe alguna fuente de contaminación en la ciudad lo que explicaría dicho aumento (Figura 13).

Estadísticamente, no hubo diferencia significativa entre los valores de Zn entre temporadas, tomando como criterio un $\alpha=0.5$ (Figura 14).

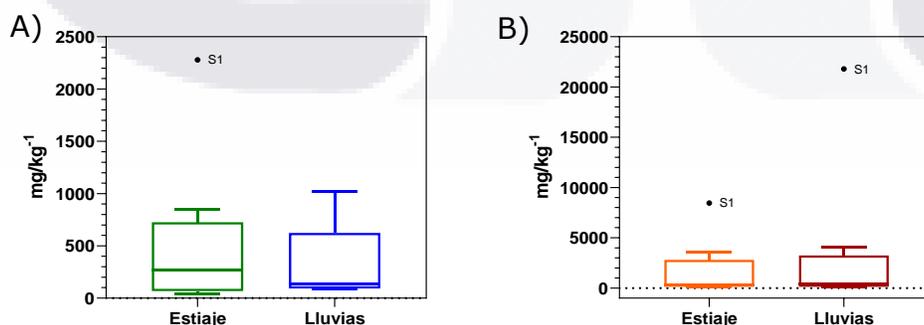


Figura 14. Análisis comparativo de Zn por temporada.
 A) Suelo ($p=0.502$). B) Sedimento ($p=0.545$)

6.2.2. Especiación Química

La especiación, una palabra tomada de las ciencias biológicas, se ha convertido en un concepto en química analítica que expresa la idea de que las formas químicas específicas de un elemento deben considerarse individualmente (Cornelis et al., 2003). La concentración total de un metal no refleja con precisión el riesgo potencial que puede causar al medio ambiente (Okoro, Fatoki, Adekola, Ximba & Snyman, 2012).

Los métodos de extracción secuencial, son frecuentemente usados para evaluar operacionalmente a los elementos traza, caracterizando su labilidad de acuerdo al comportamiento que estos presentan en solución sobre las fases de unión en suelos y sedimentos (Huang & Kretzschmar, 2010). Uno de estos métodos, desarrollado por Tessier y colaboradores (1979), considera cinco fases: 1) Intercambiable, 2) Unida a Carbonatos, 3) Unida a Óxidos de Fe/Mn, 4) Unida a Materia Orgánica y 5) Residual; y ha sido aplicado tanto a muestras de suelo como a muestras de sedimento (Ahmed Abd El Razek, 2014; Favas, Sarkar & Rakshit, 2015; Martínez, Tejeda, Estañol, Zúñoga & Zarazúa, 2016; Saad, Beltagy, Fahmy & Mahmoud, 2004; Tessier et al., 1979; Tessier, Campbell & Bisson, 1980).

La especiación de los metales se realizó por triplicado a los ocho sitios previamente seleccionados. Los valores de las concentraciones en cada fracción se pueden consultar en el Anexo B.

6.2.2.1. Plomo

La extracción secuencial mostró que, para el caso del suelo, el Pb se encuentra principalmente en la fase unida a Óxidos de Fe/Mn (28.0 % en promedio), seguida de la fase residual, materia orgánica, intercambiable y carbonatada; Ogurindiran & Osibanjo (2009) encontró que la fase unida a óxido de Fe/Mn también fue la que mostro el mayor porcentaje; Kabata-Pendias &

Mukherjee (2007) mencionan que el Pb genera gran asociación con dicha fase (Figura 15).

Como se logra apreciar en la Figura 15, para S1 y S2, el porcentaje de la fracción Intercambiable y Unida a Carbonatos, aumenta de la temporada de estiaje a la temporada de lluvias hasta el doble de su valor, los demás sitios, mantiene generalmente su valor.

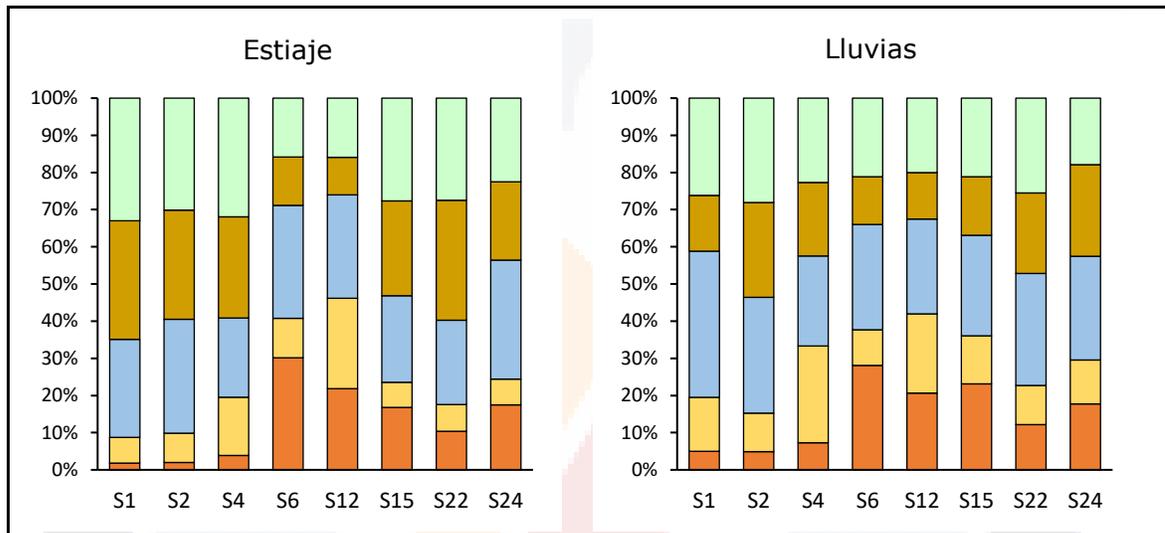


Figura 15. Especiación Química de Plomo en Suelo por Temporada.



En el caso de los sedimentos, también la fase unida a óxidos de Fe/Mn fue la que mostro el mayor porcentaje (25.4 % en promedio). Martínez (2016) encontró que la fase unida a óxidos de Fe/Mn también era la fase con mayor porcentaje en los sedimentos.

Como se logra apreciar en la Figura 16, el comportamiento de las fracciones, vario en mayor medida entre temporadas, en comparación con las muestras de suelo. Aquí se logra apreciar en S1 que la fase Intercambiable y la fase Unida a Carbonatos aumentaron en más del doble en la temporada de lluvias, con respecto a la temporada de estiaje; S2 mantuvo sus valores en las mismas

fracciones y la fracción orgánica y residual aumentaron ligeramente su porcentaje durante la temporada de lluvias.

Estadísticamente hablando no hubo diferencia significativa entre temporadas en los diferentes sustratos.

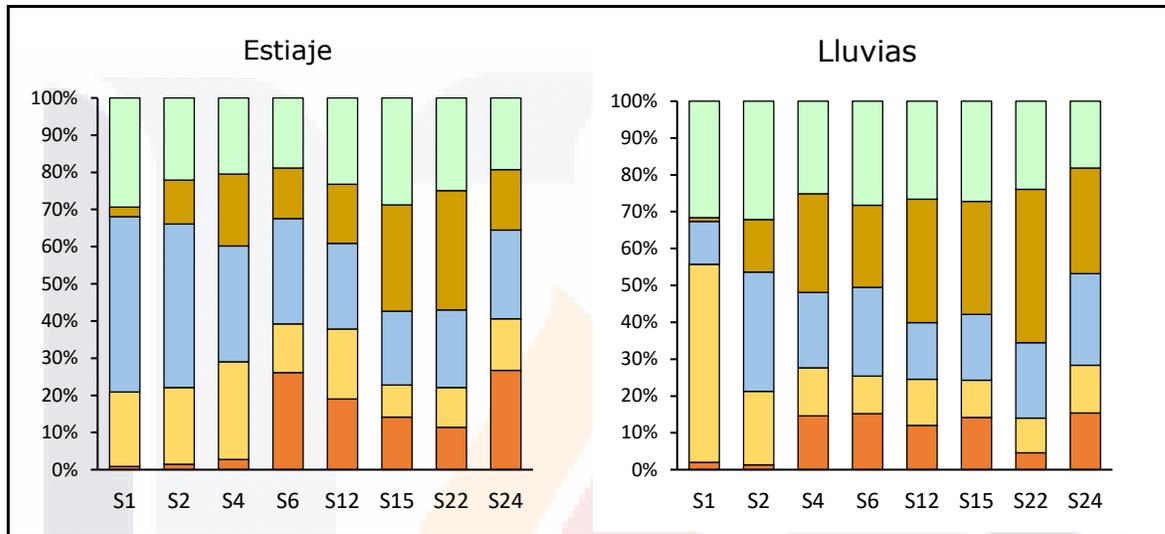
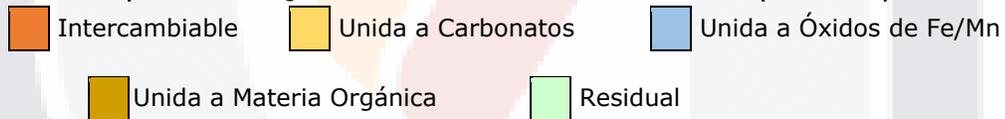


Figura 16. Especificación Química de Plomo en Sedimento por Temporada.



6.2.2.2. Cromo

En el caso del Cr, la fase predominante en el suelo fue la fase Residual, Kabata-Pendias & Mukherjee (2007) mencionan que más del 80 % del cromo presente en el suelo, se encuentra en la fracción residual; lo cual concuerda para la mayoría de los sitios; solo S15 (PIVA) en temporada de estiaje, y S22 en ambas temporadas, la fracción predominante fue la unida a materia orgánica. El comportamiento de S22 posiblemente se deba a descargas orgánicas provenientes de la Ciudad.

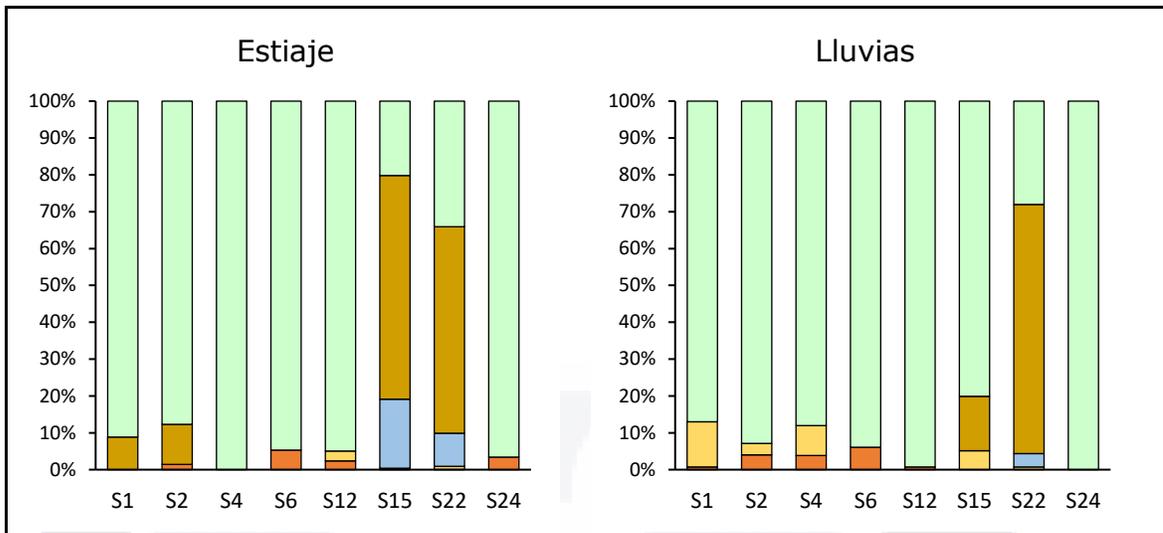


Figura 17. Especiación Química de Cromo en Suelo por Temporada.



En el caso del sedimento, la fracción unida a materia orgánica tuvo más presencia que para el caso del suelo, en algunos casos fue superior a la fracción residual (Figura 18), esto resulta importante, ya que se puede hacer uso de composta para remediar un sitio contaminado con cromo.

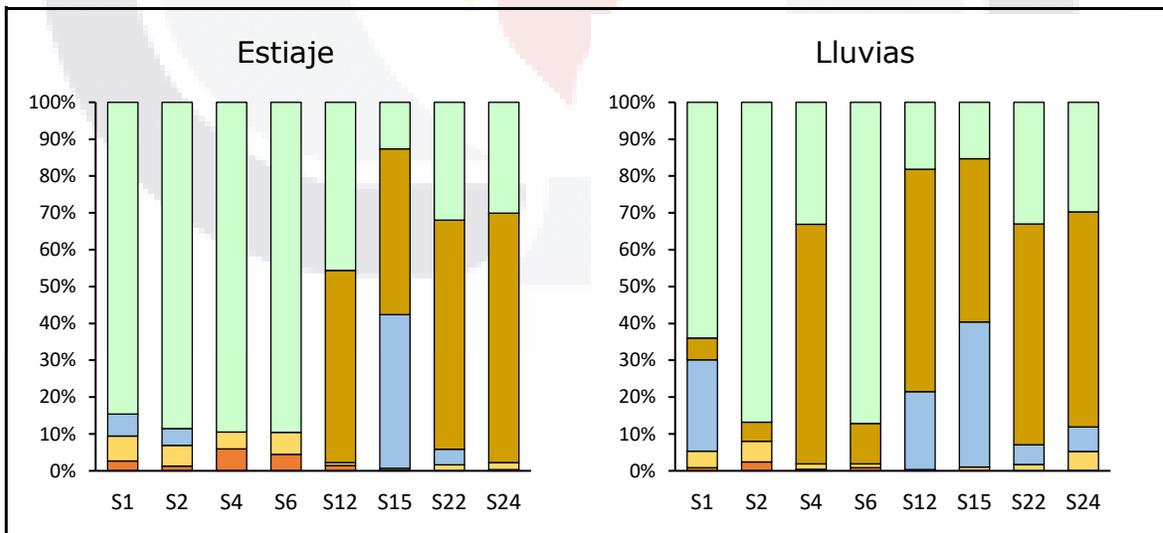
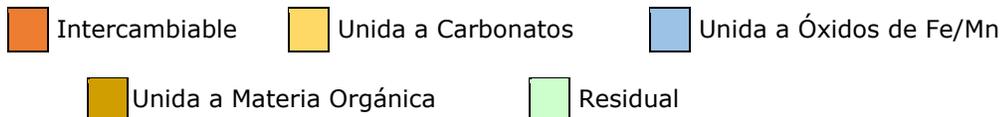


Figura 18. Especiación Química de Cromo en Sedimento por Temporada.



Estadísticamente hablando no hubo diferencia significativa entre temporadas en los diferentes sustratos.

6.2.2.3. Zinc

En el caso del suelo, en temporada de lluvias, la fracción residual resulto ser la fase más abundante, con un promedio de 62.1 %, y aunque en la temporada de estiaje, en algunos casos predomino la fracción unida a óxidos de Fe/Mn, en promedio la fracción residual fue de 53.7 % contra 22.7 % de la fracción unida a óxidos de Fe/Mn (Figura 19), comportamiento similar observó Mitchell et al. (2016) en ambas temporadas.

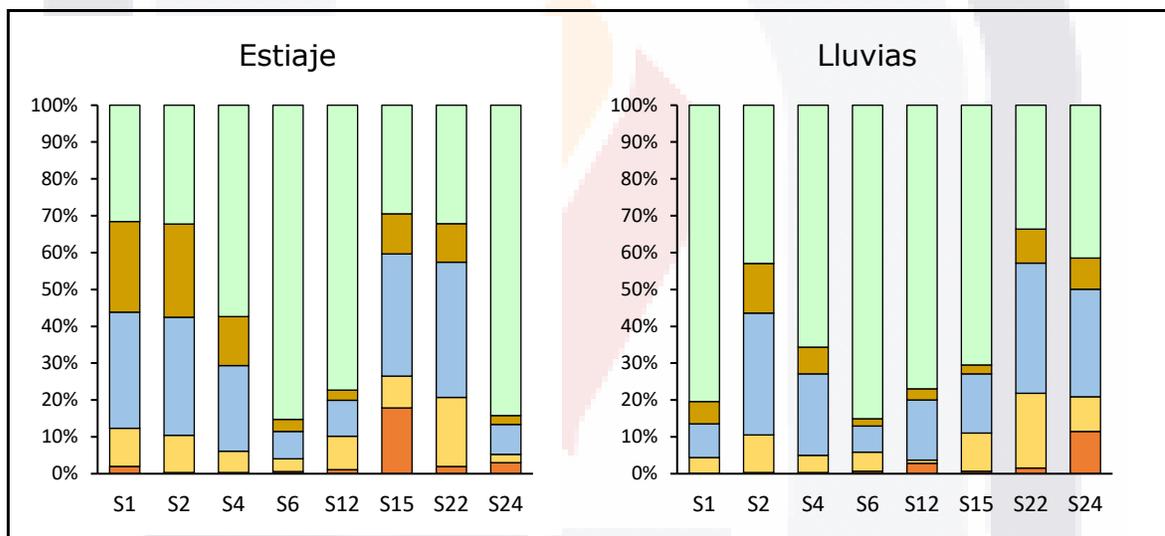
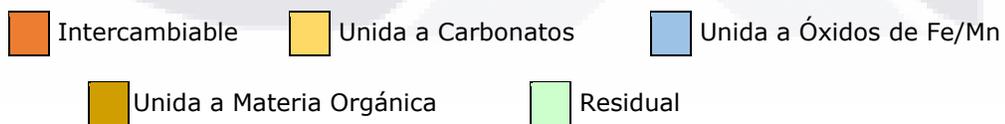


Figura 19. Especiación Química de Zinc en Suelo por Temporada.



En el sedimento (Figura 20), el comportamiento fue más variado, sobre todo en la temporada de lluvias, donde hubo sitios que predominó la fracción unida a materia orgánica (S1 y S2), Mitchell et al. (2016) observó el mismo comportamiento en la misma temporada, sobre la misma zona estudiada; y sitios en donde predominó la fracción unida a carbonatos (S12 y S15), de ahí en

fuera, las fracciones residual y unida a óxidos de Fe/Mn fueron las que mostraron un porcentaje mayor.

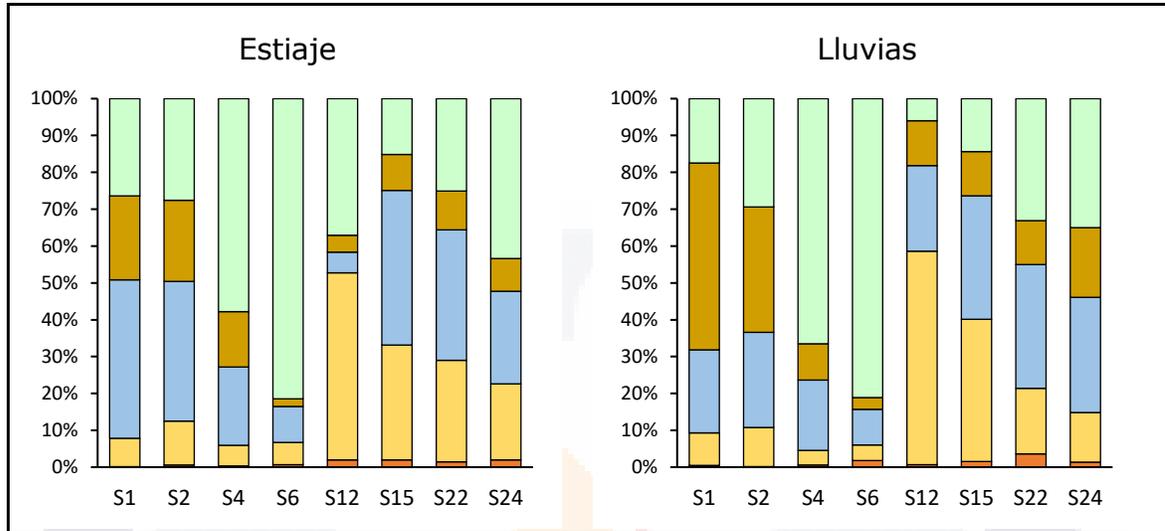
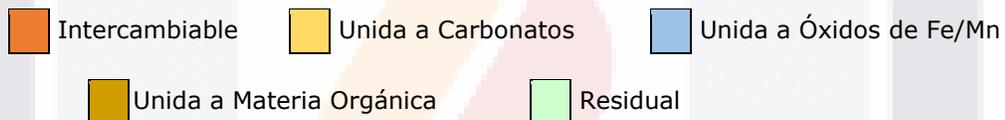


Figura 20. Especificación Química de Zinc en Sedimento por Temporada.



Estadísticamente hablando no hubo diferencia significativa entre temporadas en los diferentes sustratos.

6.2.3. Lixiviación del Metal

El potencial de lixiviación para Pb se muestra en la Figura 21, se puede apreciar que ningún sitio sobrepasó 10 %, sin embargo hay que tener en cuenta la concentración del metal total, ya que, por ejemplo el sitio S15 de suelo en la temporada de estiaje, perteneciente al PIVA, con un valor de 5.8 %, equivale a 0.29 mg kg^{-1} ; y por el contrario el sitio S1 de sedimento en la temporada de lluvias, con un valor de 0.5 % equivale a 20.24 mg kg^{-1} ; la Figura 22 muestra los mg kg^{-1} que cada sitio lixivia y se puede observar que la gran mayoría no excede los 5 mg kg^{-1} .

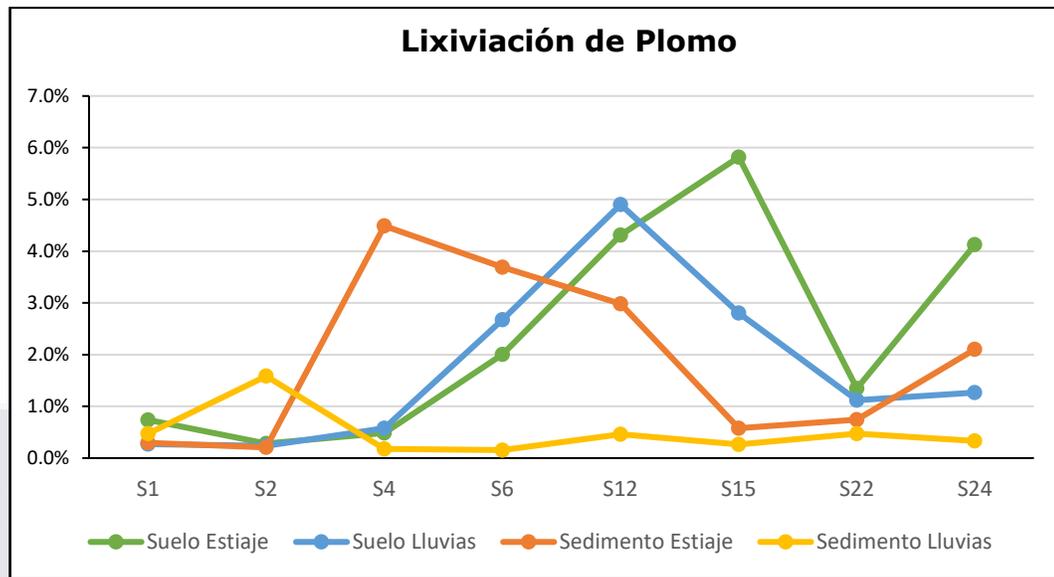


Figura 21. Porcentaje de Lixiviación de Plomo por Sustrato y Temporada.

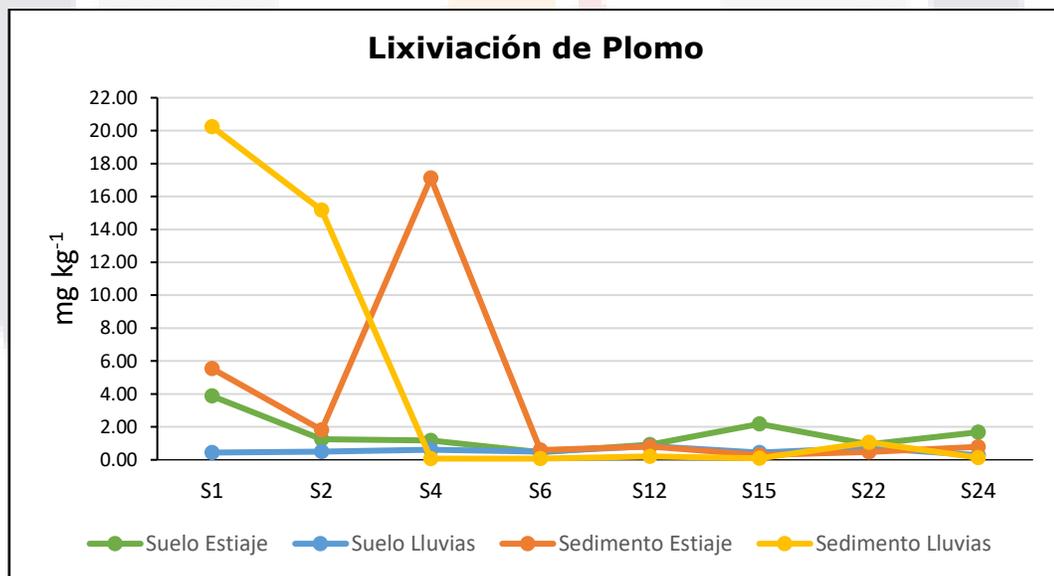


Figura 22. Concentración Lixiviada de Plomo por Sustrato y Temporada.

El Cromo, bajo la prueba aplicada, no lixivio ninguno de los ocho sitios analizados, ni para suelo ni para sedimento. Esto, hasta cierto punto es entendible, ya que la gran mayoría del Cr se encuentra en las fracciones menos móviles (unida a materia orgánica y residual) en donde más del 93 % del cromo

se encuentra en dichas fracciones para el caso del suelo y más del 84 % en el caso del sedimento (ver las figuras 17 y 18).

Para el Zn, la gran mayoría también está por debajo del 10% (Figura 23), solo dos muestras sobrepasan el 12% (Sedimento S12 y Suelo S15, ambas en temporada de estiaje), sin embargo, cuando se convierte esos porcentajes en mg kg^{-1} , equivalen a 16 y 36 mg kg^{-1} , respectivamente. La lectura que sobresale es el Suelo S1 en temporada de estiaje, con un valor de 118.1 mg kg^{-1} , cuyo valor disminuye drásticamente a 0.9 mg kg^{-1} durante la temporada de lluvia, haciendo evidente el efecto de la lluvia sobre la distribución del metal en el medio ambiente.

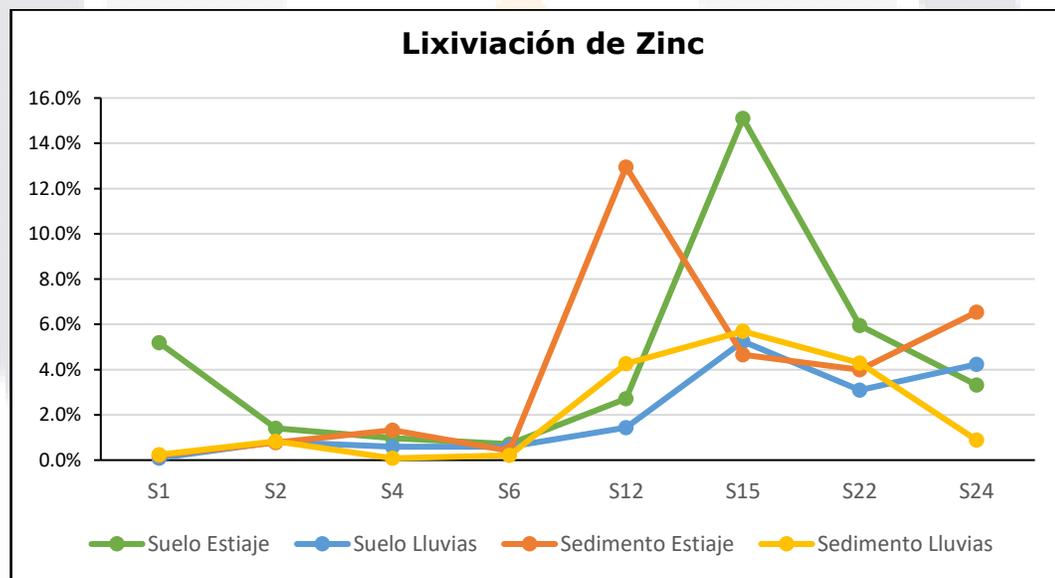


Figura 23. Porcentaje de Lixiviación de Zinc por Sustrato y Temporada.

En promedio el potencial de lixiviación para Zn fue de 13.75 mg kg^{-1} para suelo y 17.18 mg kg^{-1} para sedimento. Cinco sitios lixivian más de 20 mg kg^{-1} , tres sitios lixivian más de 30 mg kg^{-1} ; el sedimento de S1 lixivian 52 mg kg^{-1} en la temporada de lluvias y el mismo sitio lixivian 118.1 mg kg^{-1} en temporada de estiaje para el suelo.

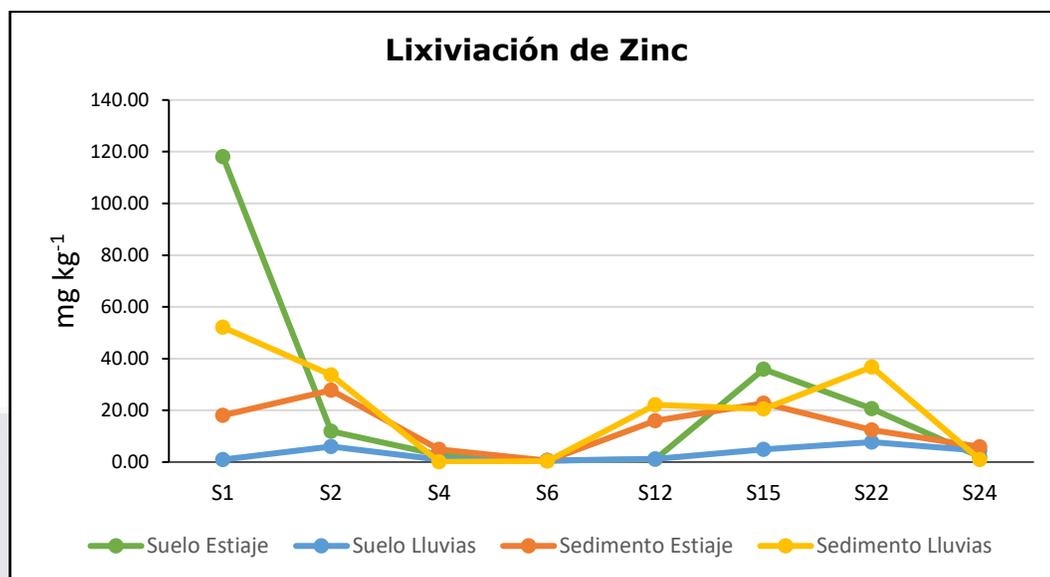


Figura 24. Concentración Lixiviada de Zinc por Sustrato y Temporada.

Los valores con los cuales se obtuvieron las figuras 21, 22, 23 y 24, se pueden consultar en el Anexo C.

6.2.4. Control de Calidad

Como parte del Control de la Calidad en las lecturas realizadas por Absorción Atómica, se utilizaron tres Materiales de Referencia para corroborar que la metodología aplicada era adecuada.

Las Tabla 9,10 y 11 muestran los resultados obtenidos para cada metal analizado.

Tabla 9. Control de Calidad de los Materiales de Referencia NIST para Plomo (Promedio \pm Desviación Estándar; n = 3)

Material de Referencia	Valor Obtenido (mg kg ⁻¹)	Valor Certificado (mg kg ⁻¹)	Recobro (%)
Montana Soil 2710 (Highly Elevated Trace Element Concentration)	5799.8 \pm 213.3	5532 \pm 80	104.8
San Joaquin Soil 2709 (Baseline Trace Element Concentration)	19.2 \pm 2.2	18.9 \pm 0.5	101.5
Buffalo River Sediment 8704	156.5 \pm 3.97	150 \pm 17	104.3

Tabla 10. Control de Calidad de los Materiales de Referencia NIST para Cromo (Promedio \pm Desviación Estándar; n = 3)

Material de Referencia	Valor Obtenido (mg kg⁻¹)	Valor Certificado (mg kg⁻¹)	Recobro (%)
Montana Soil 2710 ¹ (Highly Elevated Trace Element Concentration)	21 \pm 3.8	39 ^[a]	54.6 (Informativo)
San Joaquin Soil 2709 (Baseline Trace Element Concentration)	118.1 \pm 7.3	130 \pm 4	90.8
Buffalo River Sediment 8704	112.6 \pm 4.8	121.9 \pm 3.8	92.4

^[a]Valor No Certificado, solo con fines informativos.

Tabla 11. Control de Calidad de los Materiales de Referencia NIST para Zinc (Promedio \pm Desviación Estándar; n = 3)

Material de Referencia	Valor Obtenido (mg kg⁻¹)	Valor Certificado (mg kg⁻¹)	Recobro (%)
Montana Soil 2710 (Highly Elevated Trace Element Concentration)	6694.2 \pm 271.7	6952 \pm 91	96.3
San Joaquin Soil 2709 (Baseline Trace Element Concentration)	107.3 \pm 4.1	106 \pm 3	101.2
Buffalo River Sediment 8704	401.5 \pm 6.3	408 \pm 15	98.4

Como se puede apreciar en las tablas anteriores, los porcentajes de recobro se encuentran dentro de los parámetros establecidos por los materiales de referencia, con excepción del cromo para el Suelo de Montana, en donde el mismo certificado menciona que no Certifica el Valor para dicho metal, por lo que es "Meramente Informativo", por lo que se puede concluir que el procedimiento de extracción para cuantificar el metal total es adecuado.

6.3. Propiedades Fisicoquímicas en Suelo y Sedimento

Una vez obtenido el extracto líquido, se procedió a medir las diferentes propiedades fisicoquímicas descritas en la metodología.

6.3.1. pH

Considerado uno de los parámetros más importantes, tanto en suelo como en sedimento, es de suma importancia ya que regula numerosos procesos. Es un indicativo del grado de acidez y alcalinidad, muchas reacciones dependen de su valor y la disponibilidad de nutrientes hacia las plantas está fuertemente relacionada con su valor (Radojević & Bashkin, 2006).

La siguiente figura, muestra gráficamente, un comparativo de los valores obtenidos para el pH de los suelos y sedimentos en ambas temporadas.

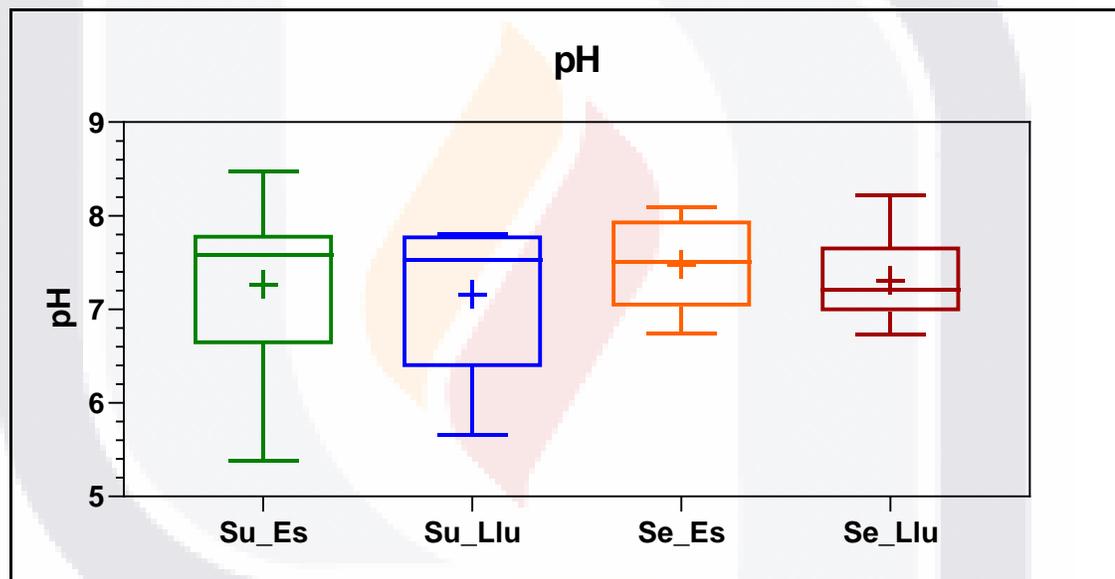


Figura 25. Análisis comparativo del pH por Sustrato y Temporada.

(+) Promedio; Su_Es = Suelo Estiaje; Su_Llu = Suelo Lluvias
Se_Es = Sedimento Estiaje; Se_Llu = Sedimento Lluvias

De acuerdo a la Norma Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, el pH para el sustrato suelo oscilo entre 5.38 a 8.47 con un promedio de 7.27 y de 5.66 a 7.81 con un promedio de 7.16 para la temporada de estiaje y lluvias respectivamente; estos valores implican que los suelos son clasificados de "Moderadamente ácidos" a "Moderadamente alcalinos" y el promedio los clasifica en "Neutro". Para el caso del sedimento los valores oscilaron de 6.74 a 8.09 con un promedio de 7.48 para la temporada de estiaje y de 6.73 a 8.22 con un

promedio de 7.31 para la temporada de lluvias; el rango fue más estrecho y la clasificación los posiciono entre "Neutros" a "Moderadamente alcalinos". Los valores no mostraron diferencia significativa entre temporadas; suelo ($p=0.817$) y sedimento ($p=0.516$). Los valores numéricos se pueden consultar en el Anexo D.

La biodisponibilidad de diferentes nutrientes depende fuertemente del pH, un incremento en el pH puede resultar en la disminución de micronutrientes, tales como Mn, Cu, Zn y B (Blume, et al., 2015; Radojević & Bashkin, 2006).

Otra de las consecuencias importantes de los cambios del pH en el suelo, es la liberación de iones metálicos debido a la acidificación en las fases edáficas, tanto minerales como orgánicas, provocando en algunos casos la movilización de metales tóxicos (Domènech & Peral, 2012):

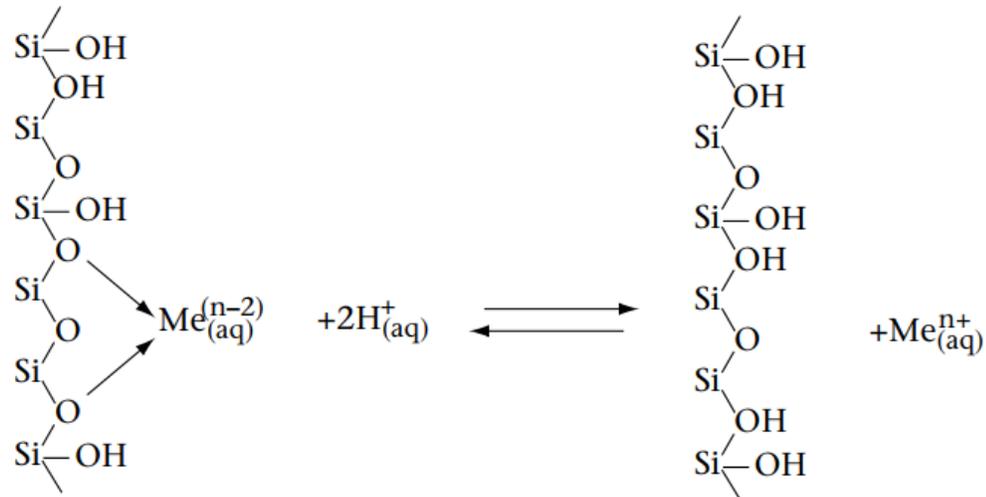


Figura 26. Proceso que da lugar a la transferencia del catión metálico desde la fase sólida a la disolución del suelo.

6.3.2. Conductividad Eléctrica

La medida de la Conductividad Eléctrica (CE), es directamente proporcional a la concentración de cargas iónicas en la disolución y, por consiguiente, es una

buena medida para caracterizar el grado de salinización en el suelo (Domènech & Peral, 2012).

De acuerdo con la Norma Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, todas las muestras de suelo están por debajo de los $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$, por lo que su salinidad es insignificante, el promedio fue de 462.1 y $391.3 \mu\text{S cm}^{-1}$ para temporada de sequía y lluvias respectivamente. El sedimento mostro valores mas elevados, sin embargo, el promedio también se mantuvo por debajo de los $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$; es de destacar la muestra S15 (PIVA) la cual supero los $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$ en ambas temporadas, probablemente por descargas industriales hacia el río clasificándose como levemente salina; S1 en temporada de lluvias, supero los $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$ clasificándose como moderadamente salina, su valor tal vez se deba a la escorrentía de los desechos provenientes de la mina. La Figura 27 muestran el comportamiento de la propiedad, el análisis estadístico no mostro diferencias significativas entre temporadas; suelo ($p=0.550$) y sedimento ($p=0.587$). Los datos se pueden consultar en el Anexo D.

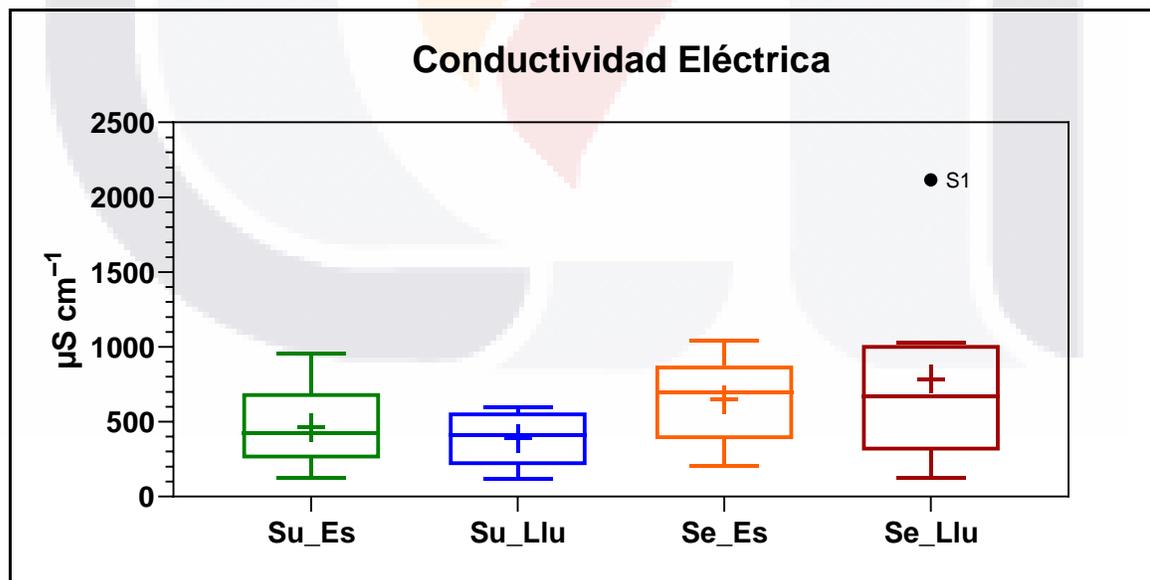


Figura 27. Análisis comparativo de la CE por Sustrato y Temporada.

(+) Promedio; Su_Es = Suelo Estiaje; Su_Llu = Suelo Lluvias
Se_Es = Sedimento Estiaje; Se_Llu = Sedimento Lluvias

6.3.3. Potencial Redox

Al igual que el pH, el potencial redox, tiene influencia en las reacciones que ocurren en el suelo y sedimento, las reacciones químicas que involucran transferencia de electrones también influyen en los procesos de los sistemas naturales. El estado redox de un sistema ambiental determina su composición; en particular, en lo referente a la forma molecular en que están presentes aquellas sustancias capaces de transformarse por intercambio de electrones. Además, en muchos de los procesos de oxidación y reducción hay producción o consumo de iones H^+ , con lo que también el estado redox del sistema ambiental afecta a su grado de acidez o basicidad (Domènech & Peral, 2012).

El potencial redox determina la movilidad geoquímica de contaminantes y nutrientes en varios compartimentos del ambiente y consecuentemente estos influyen en el ecosistema (Domènech & Peral, 2012).

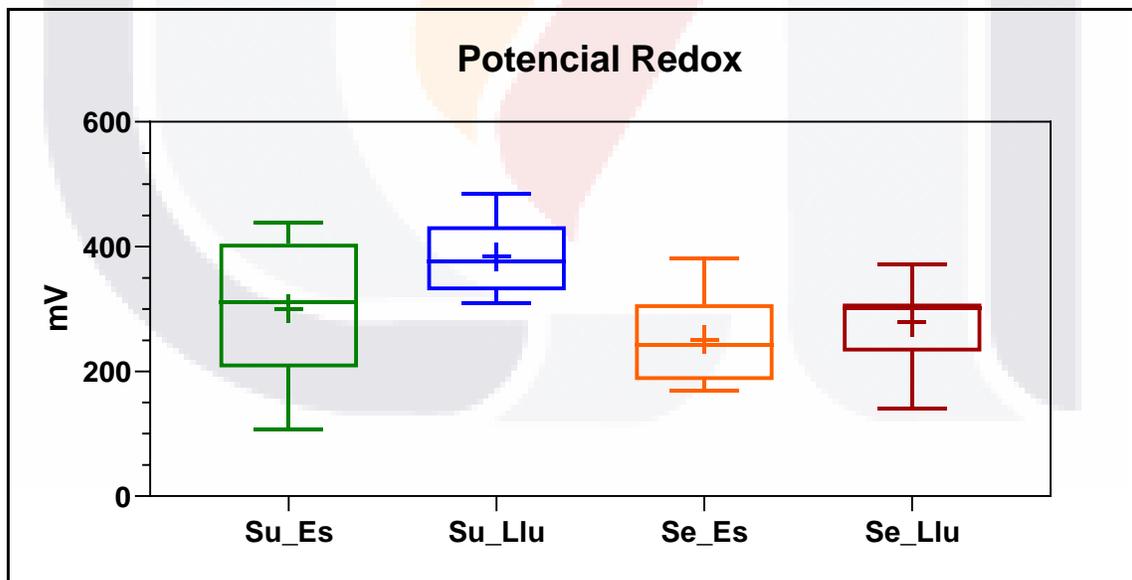


Figura 28. Análisis comparativo del Eh por Sustrato y Temporada.
 (+) Promedio; Su_Es = Suelo Estiaje; Su_Llu = Suelo Lluvias
 Se_Es = Sedimento Estiaje; Se_Llu = Sedimento Lluvias

El potencial redox en las muestras oscilo entre 106.5 a 484.5 mV, sugiriendo la prevalencia de condiciones oxidantes (zona aerobia), el valor promedio del suelo durante la temporada de estiaje fue menor respecto a la temporada de lluvias, también los suelos mostraron ser más oxidantes que los sedimentos. La Figura 28 muestra el comportamiento de los diferentes sustratos por temporada, los valores pueden consultarse en el Anexo D.

6.3.4. Materia Orgánica

La materia orgánica presente en los suelos y sedimentos, proviene de organismos vivos, plantas y animales en descomposición o parcialmente descompuestos y es frecuentemente usada como un índice de fertilidad, sus valores pueden variar considerablemente desde 1 % a 90 % (Fernández et al., 2006; Radojević & Bashkin, 2006).

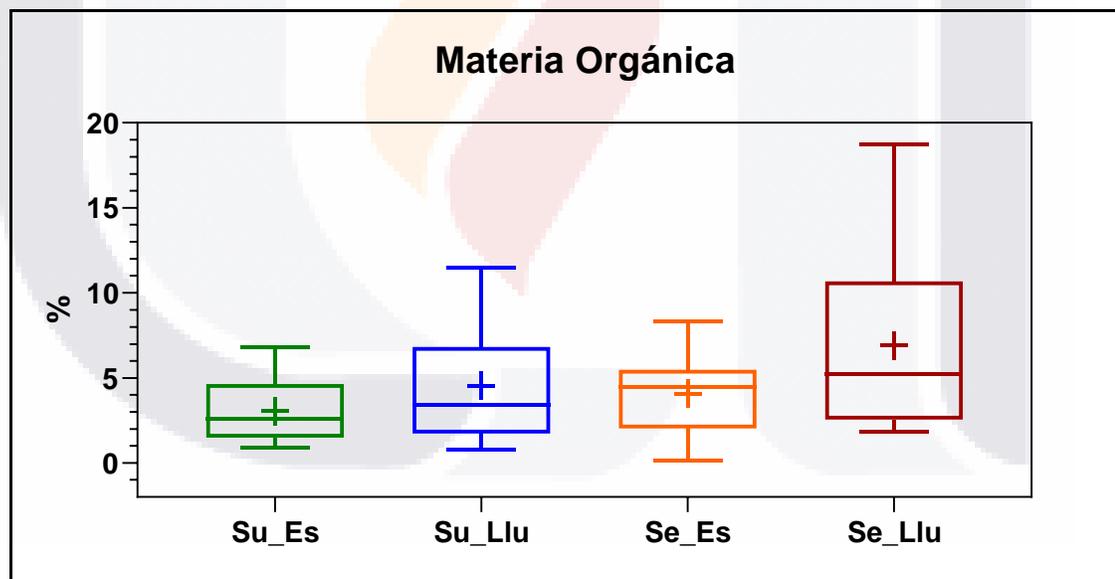


Figura 29. Análisis comparativo de la MO por Sustrato y Temporada.
 (+) Promedio; Su_Es = Suelo Estiaje; Su_Llu = Suelo Lluvias
 Se_Es = Sedimento Estiaje; Se_Llu = Sedimento Lluvias

De acuerdo con la Norma Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, el contenido de materia orgánica en suelo oscilo entre 0.78 % y 11.48 %, por lo que su

contenido se ubica entre "Bajo" a "Muy Alto"; el sedimento mostro un rango más amplio, de 0.13 % a 18.72%, clasificándose el contenido de materia orgánica entre "Muy Bajo" a "Muy Alto". Los promedios fueron 3.79 % y 5.48 % para suelo y sedimento respectivamente, la Figura 29 muestra el comportamiento de los sitios. Estadísticamente no existió diferencia significativa entre temporadas para los sustratos; suelo ($p=0.323$) y sedimento ($p=0.231$). Los valores numéricos pueden consultarse en el Anexo D.

6.3.5. Capacidad de Intercambio Catiónico

Todas las moléculas, en mayor o menor medida, tiene minúsculas cargas eléctricas, positivas y/o negativas. Es por ello que el suelo y sedimento actúan como imanes. La CIC, es la capacidad del suelo para retener e intercambiar diferentes elementos minerales (Fernández et al., 2006).

La CIC en suelo rondo entre 16.69 a 389.78 $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ con un promedio de 155.78 $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$, el sedimento amplio el rango ligeramente, de 11.09 a 492.96 $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ con un promedio de 131.73 $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$; indicando una amplia heterogeneidad de los sitios, de hecho la CIC fue la única prueba fisicoquímica en donde si existió diferencia significativa entre temporadas, tanto para suelo ($p=0.036$) como para sedimento ($p=0.032$); resultado que posiblemente se debe al efecto del agua de lluvia sobre la solubilidad de los compuestos químicos presentes en el suelo y sedimento (Figura 30).

De acuerdo con Blume et al. (2015), la CIC depende en gran medida del contenido de arcilla y del contenido de materia orgánica, esta última contribuyendo entre 60 y 300 Cmol kg^{-1} sobre la CIC dependiendo del grado de compuestos húmicos presentes; si observamos la Tabla D1 en el Anexo D, podemos ver que el contenido de materia orgánica no es el responsable del valor obtenido de la CIC, por ejemplo, el suelo S1 en la temporada de lluvia, tiene 11.48 % de materia orgánica, sin embargo, la CIC es de tan solo 16.69 $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$; S1 para sedimento en lluvia, contiene 4.90 % de materia orgánica

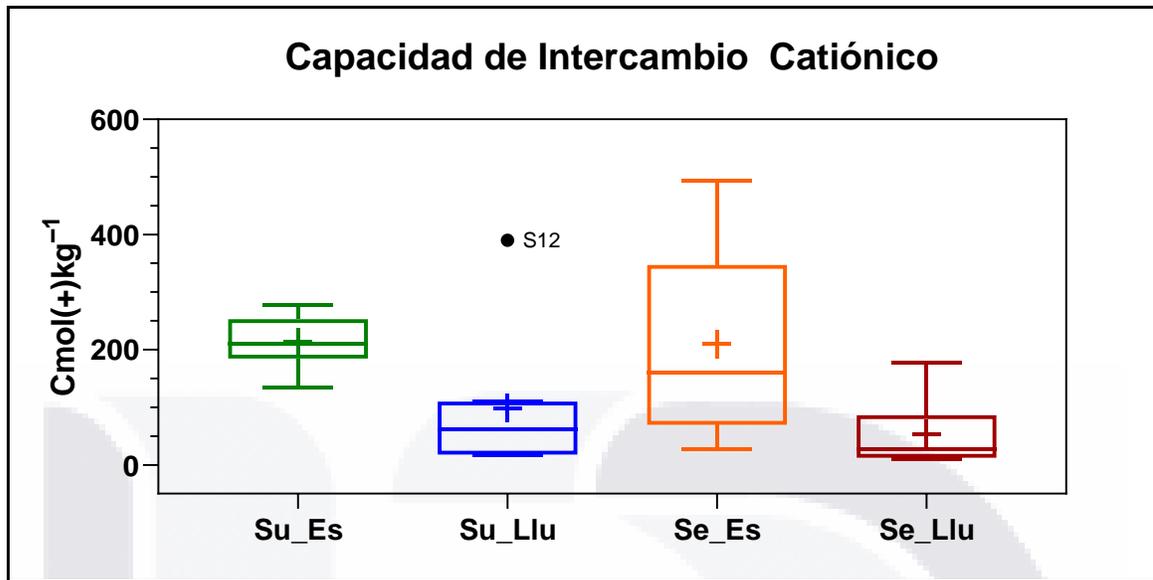


Figura 30. Análisis comparativo de la CIC por Sustrato y Temporada.
 (+) Promedio; Su_Es = Suelo Estiaje; Su_Llu = Suelo Lluvias
 Se_Es = Sedimento Estiaje; Se_Llu = Sedimento Lluvias

y S12 contiene 11.91 % de materia orgánica, sin embargo, ambos puntos tiene prácticamente el mismo valor de CIC ($27 \text{ Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$); un análisis similar se puede observar en los demás puntos. Por lo que se puede concluir que el responsable de los valores de CIC es la arcilla.

6.3.6. Carbonatos

Los carbonatos se determinaron usando un método titulométrico, el cual permite determinar tanto carbonatos como bicarbonatos. Todas las muestras salieron negativo a la determinación de Carbonatos, no así para Bicarbonatos, sin embargo, se está reportando la suma de ambas especies químicas. Radojević & Bashkin (2006) mencionan que suelos con un pH entre 7.0 y 8.5 se encuentran libres de carbonatos, mientras que un pH > 8.5 pueden presentarse las dos especies químicas; la gran mayoría de las muestras presentaron un valor de pH superior a 7 y ninguna sobrepaso el pH de 8.5, corroborándose los resultados.

El rango de carbonatos para suelo estuvo entre 48.9–158.5 y 67.1–162.5 mg/100 g de CO_3^{2-} , para suelo y sedimento respectivamente; tampoco hubo diferencia significativa entre temporadas. El análisis comparativo se puede apreciar en la Figura 31.

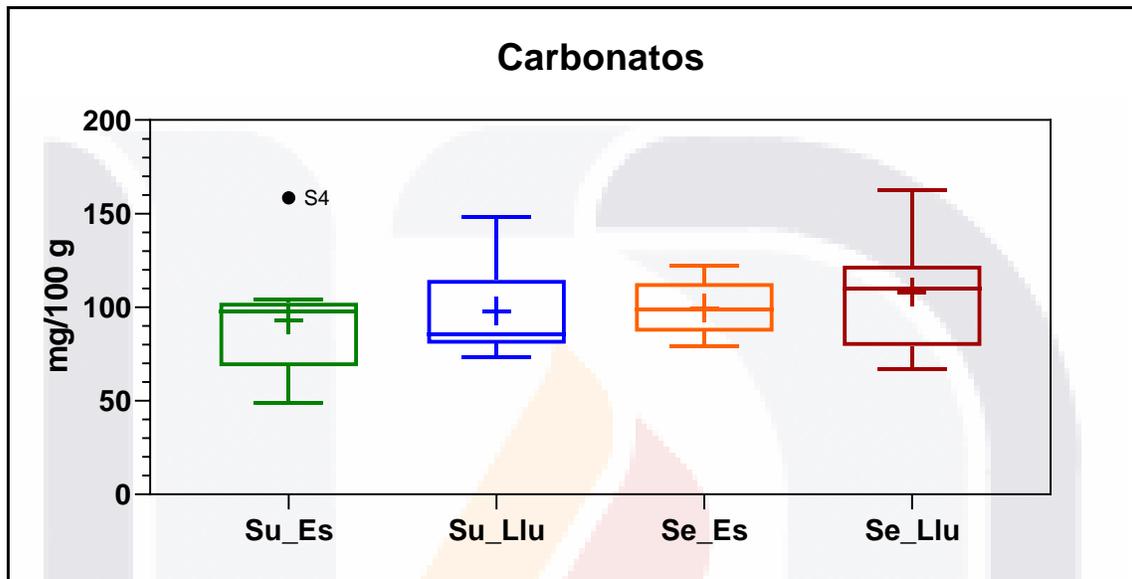


Figura 31. Análisis comparativo de CO_3^{2-} por Sustrato y Temporada.
 (+) Promedio; Su_Es = Suelo Estiaje; Su_Llu = Suelo Lluvias
 Se_Es = Sedimento Estiaje; Se_Llu = Sedimento Lluvias

6.4. Indicadores Ambientales

6.4.1. Factor de Movilidad

El factor de movilidad describe el movimiento potencial del metal fuera del medio contaminante (Ogundiran & Osibanjo, 2009); la fracción Intercambiable y la Unida a Carbonatos se ha empleado para evaluar la movilidad de un contaminante (Zhao, Feng, Wang, Liu & Shen, 2013).

Siguiendo el criterio de Cappuyns (2018), la movilidad de un metal se calcula sumando las fracciones intercambiable y unida a carbonatos, donde: un

porcentaje en suelo < 1%: muy poco móvil, 1–10%: poco móvil, 11–30%: medianamente móvil, 31–50%: altamente móvil y > 50% extremadamente móvil; el Pb en suelo, mostro 2 sitios catalogados como poco móviles, 8 son medianamente móviles y 6 son altamente móviles (Figura 32).

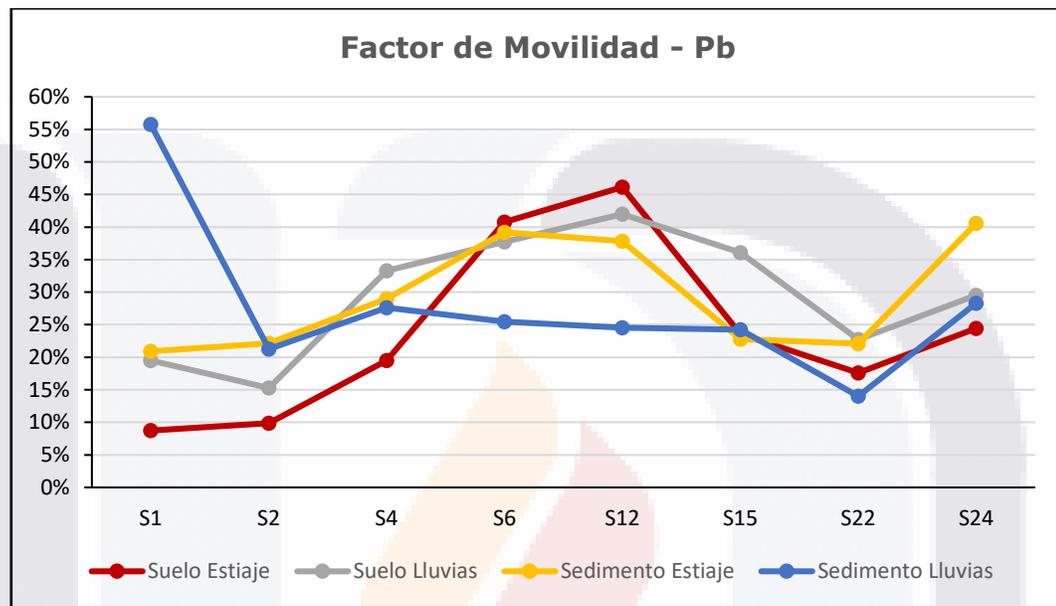


Figura 32. Factor de Movilidad para Pb por Sustrato y Temporada.

El factor de movilidad vario de 8.74–46.13% con un promedio de 26.67%. S1 y S2 presentan los FM más bajos, en ambas temporadas; S12 presento los FM más altos para suelo, tanto en temporada de estiaje como de lluvias (46.13 y 41.98%, respectivamente) considerándose que el Pb en dicho sitio es altamente móvil.

En el caso del sedimento, Perin et al. (1985), propuso una escala que permite evaluar el riesgo de un contaminante en medio acuático y aplica a la suma de las fracciones intercambiable y unida a carbonatos, donde: un porcentaje en sedimento <1%: No hay riesgo, 1–10%: poco riesgo, 11–30%: medio riesgo, 31–50% alto riesgo y >50% muy alto riesgo. El Pb mostro 12 sitios con mediano riesgo, 3 con alto riesgo y 1 (S1 en temporada de lluvias) con muy alto riesgo (Figura 32).

El factor de movilidad de S1 en sedimento para la temporada de lluvias es consistente con el alto porcentaje observado en la fracción unida a carbonatos. Los valores oscilaron entre 14.01–55.75% con un promedio de 28.48%, ligeramente mayor al promedio obtenido en suelo.

Siguiendo la misma línea propuesta por Cappuyens (2018), en el caso del Cr presente en suelo, 7 sitios tienen muy poca movilidad, 7 presentan poca movilidad y solo 2 son medianamente móviles. Los valores oscilaron de 0.0–13.0% con un promedio de 3.8% (Figura 33). Casos interesantes resultan S1 y S4, en donde el FM en la temporada de estiaje fue 0.0% pero en la temporada de lluvias mostraron los FM más altos para el suelo (13.0 y 11.9% respectivamente), los valores son consistentes con el incremento del porcentaje de la fracción unida a carbonatos que mostraron ambos sitios; también se vuelve a poner de manifiesto la importancia del agua de lluvia en la movilidad del metal.

Para el sedimento, 3 sitios no presentan riesgo para la vida acuática, 11 sitios representan poco riesgo y 2 representan un mediano riesgo. A diferencia del suelo, ahora resulto que los valores más altos los presentaron muestras de la temporada de estiaje (S4 y S6), el rango vario de 0.3–10.54% con un promedio de 4.34% (Figura 33).

El Zn en el suelo mostro 7 puntos con poca movilidad y 9 con movilidad media, su rango estuvo entre 3.7–26.5% con un promedio de 11.2%. El FM más alto lo presentaron S15 (PIVA) en temporada de estiaje con 26.5%, consistente con la fracción intercambiable; S22, ambas temporadas, con 20.7% en estiaje y 21.8% en luvias, consistente con la fracción carbonatada y S24 (Presa El Niágara) en la temporada de lluvias con 20.9% y de la cual debe su valor a la fracción intercambiable (Figura 34).

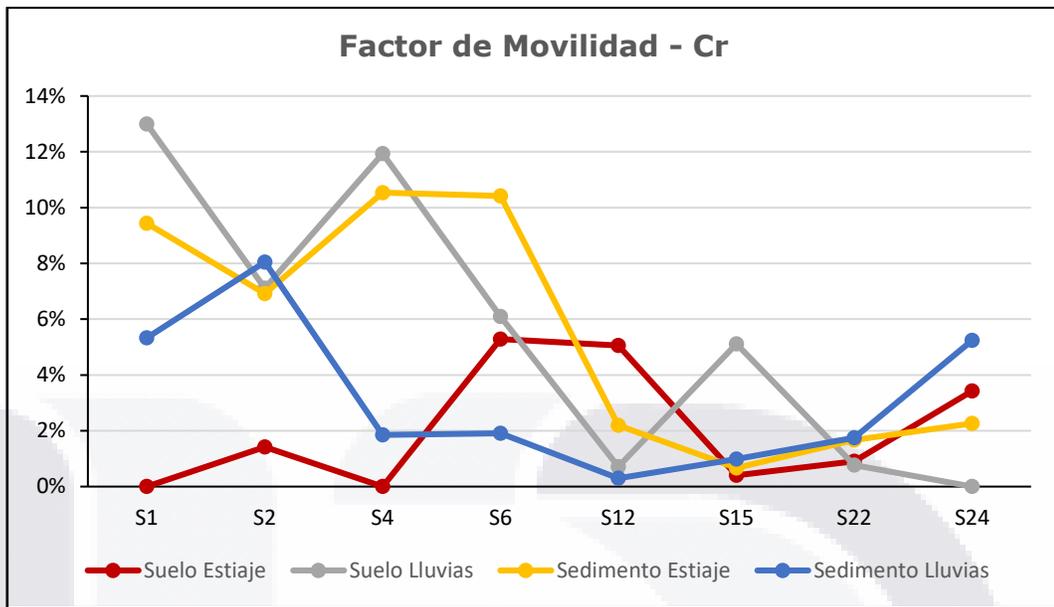


Figura 33. Factor de Movilidad para Cr por Sustrato y Temporada.

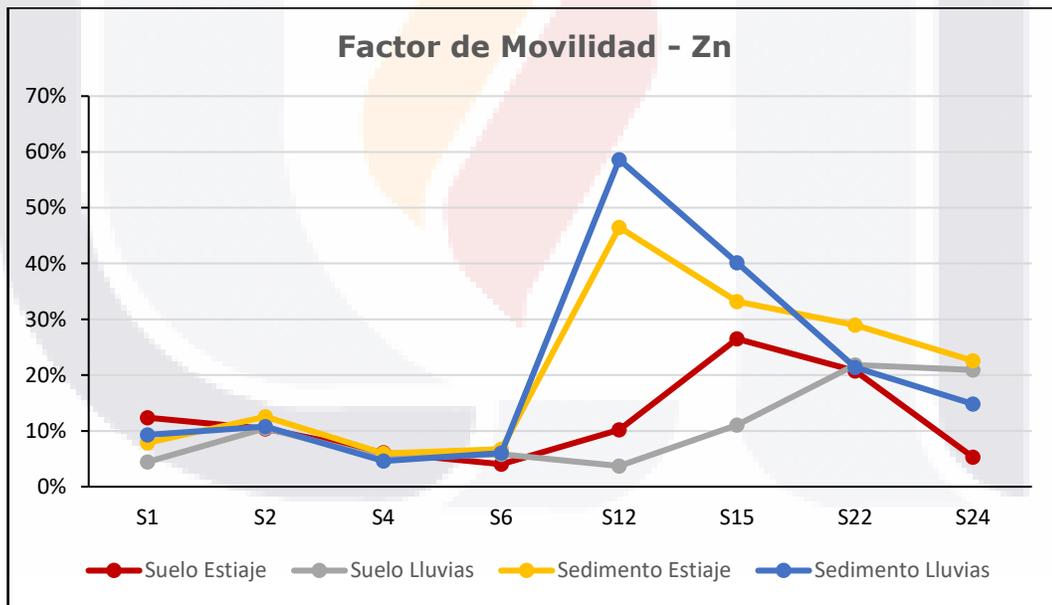


Figura 34. Factor de Movilidad para Zn por Sustrato y Temporada.

El Zn en sedimento registro 6 sitios con poco riesgo, 6 con mediano riesgo, 3 con alto riesgo y 1 con muy alto riesgo. Los valores estuvieron entre 4.6% y 58.6% con un promedio de 20.6%. Los 4 valores más altos los presentaron S12 y S15, tanto en temporada de estiaje como en temporada de lluvias, en ambos

casos la movilidad aumento durante la temporada de lluvias y la fracción involucrada para obtener estos resultados fue la unida a carbonatos (Figura 34).

En base a los promedios, la movilidad de los metales, por sustrato y temporada fue, para todos los casos: $Pb > Zn > Cr$.

6.4.2. Índice de Geo Acumulación

De manera adicional al Factor de Movilidad, se determinó el Índice de Geo Acumulación (Igeo), que permite evaluar la contaminación ambiental mediante la comparación entre las concentraciones actuales y las preindustriales (Li, Ma, Van der Kuijp, Yuan & Huang, 2014). Los valores de fondo utilizados para el cálculo del Igeo se pueden consultar en el Anexo E.

La Figura 35 muestra el Igeo calculado para Pb, se observa que existe una amplia variación entre los sitios, con al menos una muestra en cada clase, desde "No contaminado" (Clase 0) a "Extremadamente Contaminado" (Clase 6).

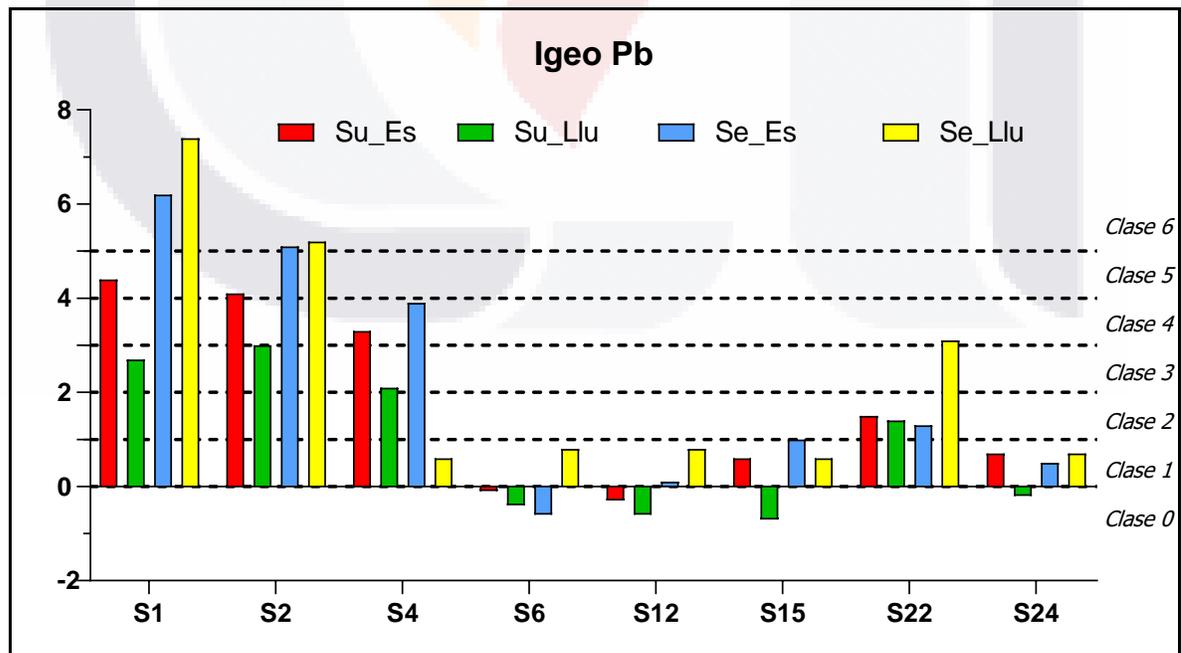


Figura 35. Índice de Geo Acumulación para Pb por Sustrato y Temporada
Su_Es = Suelo Estiaje; Su_Llu = Suelo Lluvias; Se_Es = Sedimento Estiaje; Se_Llu = Sedimento Lluvias

Sin embargo, se logra apreciar una disminución conforme incrementa la distancia con respecto a la mina, con un subsecuente aumento en S22 (Ciudad de Aguascalientes) el cual fue clasificado como "Moderadamente Contaminado" (Clase 2) a "Fuertemente Contaminado" (Clase 4). El suelo en S1 y S2, los sitios más cercanos a la mina, mostraron valores de "Moderadamente a Fuertemente Contaminado" (Clase 3) a "Fuertemente a Extremadamente Contaminado" (Clase 5); por el contrario, el Sedimento en S1 y S2 se catalogó como: "Extremadamente Contaminado" (Clase 6) en todos los casos haciendo evidente la influencia de la actividad minera sobre el medio ambiente. La clase 6 refleja un enriquecimiento de casi 100 veces en comparación con el nivel de fondo (Favas et al., 2015). En todos los sitios, el sedimento en la temporada de lluvias fue superior a cero.

La Figura 36 muestra el Igeo calculado para Cr, se observa que, según el índice, ningún sitio está contaminado, todos mostraron un valor calculado menor a cero. Sin embargo, de acuerdo con la Figura 9 y 10, se puede observar que existen 4 puntos, que sobresalen sobre el resto; el sedimento S12 en temporada de lluvias, el suelo S15 en estiaje, y el sedimento S15 en ambas temporadas; estos sitios se encuentran muy cerca de la Clase 1 "No Contaminado a Moderadamente Contaminado", lo que demuestra que los límites autorizados por la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004) se encuentran muy por encima de lo que organizaciones e investigadores, a nivel global, consideran un valor aceptable para considerar un sitio como no contaminado.

En el caso del Zn, la Figura 37 muestra los valores Igeo calculados, su comportamiento es similar al Pb; S1 y S2 resultaron los sitios más afectados, sus valores oscilan entre "Moderadamente Contaminado" (Clase 3) a "Extremadamente Contaminado" (Clase 6); S4 (Presa Santa Elena), alcanzó la categoría de "Moderadamente Contaminado" (Clase 2) en la temporada de estiaje tanto para suelo como para sedimento, valores que disminuye durante la temporada de lluvias; S22 volvió a repetir el comportamiento del Pb, de

“Moderadamente Contaminado” (Clase 2) a “Fuertemente Contaminado” (Clase 4); S15 mostro mayor grado de contaminación con respecto al mostrado por el plomo, posiblemente debido a algún desecho proveniente del PIVA.

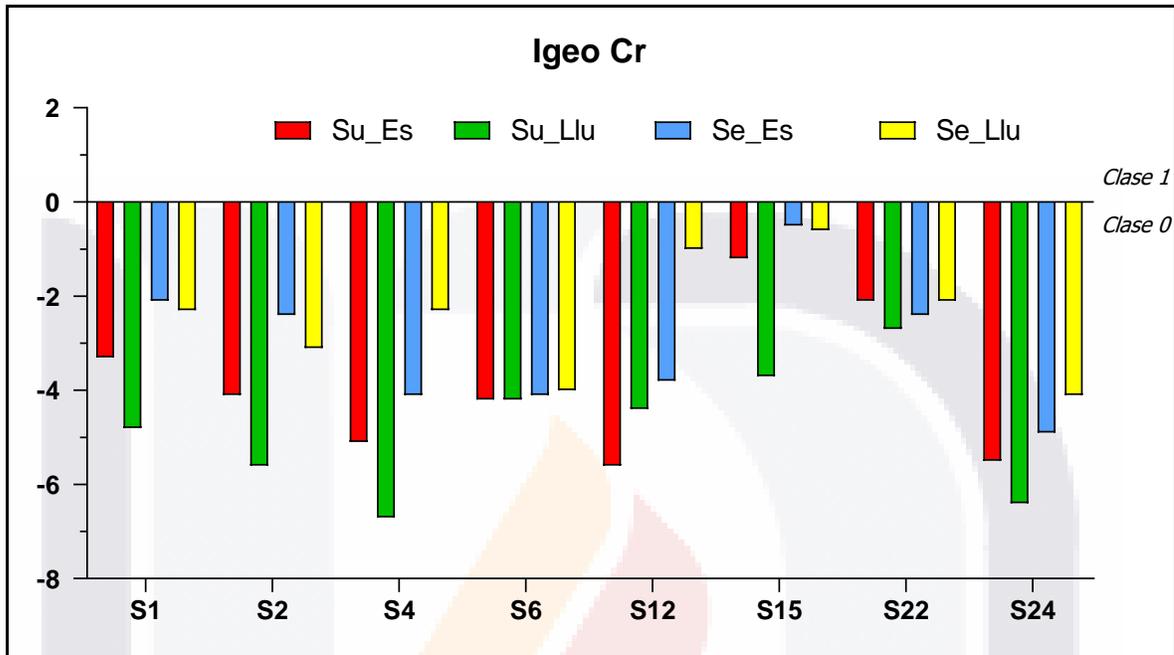


Figura 36. Índice de Geo Acumulación para Cr por Sustrato y Temporada
 Su_Es = Suelo Estiaje; Su_Llu = Suelo Lluvias; Se_Es = Sedimento Estiaje; Se_Llu = Sedimento Lluvias

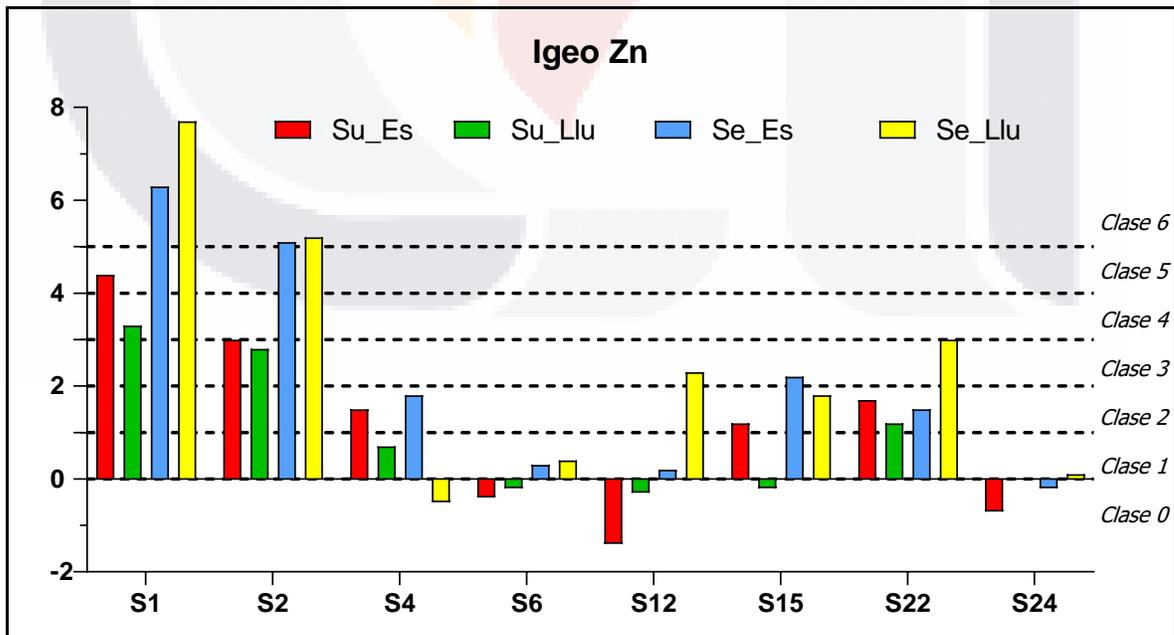


Figura 37. Índice de Geo Acumulación para Zn por Sustrato y Temporada
 Su_Es = Suelo Estiaje; Su_Llu = Suelo Lluvias; Se_Es = Sedimento Estiaje; Se_Llu = Sedimento Lluvias

6.4.3. Factor de Enriquecimiento

El Factor de Enriquecimiento (FC), es una herramienta útil para diferenciar el origen debido a una fuente de contaminación antropogénica y natural (Zahra, Hashmi, Malik & Ahmed, 2014); asume que, bajo condiciones naturales, existe una relación lineal entre un elemento de referencia y cualquier otro elemento (Chabukdhara & Nema, 2012). El Aluminio (Al) se usó como elemento de referencia, por ser el más usado (Bourennane et al., 2010; Liénard, Brostaux & Colinet, 2014), los valores de fondo de los metales y las concentraciones de Al utilizados para el cálculo se pueden consultar en el Anexo E.

La Figura 38 muestra los valores obtenidos para Pb; al igual que el Igeo, S1 y S2 fueron categorizados como "Extremadamente Enriquecidos" (Clase 5), tanto para el suelo como para el sedimento en ambas temporadas. Con excepción del sedimento en la temporada de lluvias para S4, el resto de las muestras para ese punto, se encuentran en "Extremadamente Enriquecidos" (Clase 5), este valor se debe muy posiblemente al incremento en el volumen de agua en la Presa durante dicha temporada. S6 en suelo y sedimento, así como S12 y S15 en suelo durante la temporada de lluvias están "Moderadamente Enriquecidos" (Clase 2). El resto de las muestras entraron en la clasificación de "Significativamente Enriquecido" (Clase 3) o superior. Resulta importante resaltar que valores superiores a 1.5 sugieren un origen antropogénico del contaminante (Varol, 2011; Mahlangeni, Moodley & Jonnalagadda, 2016); origen que se pone de manifiesto en S1, S2, S4 y S22 más que cualquier otro sitio; aunque cabe resaltar que todas las muestras superaron el valor de 2.0 (Clase 2).

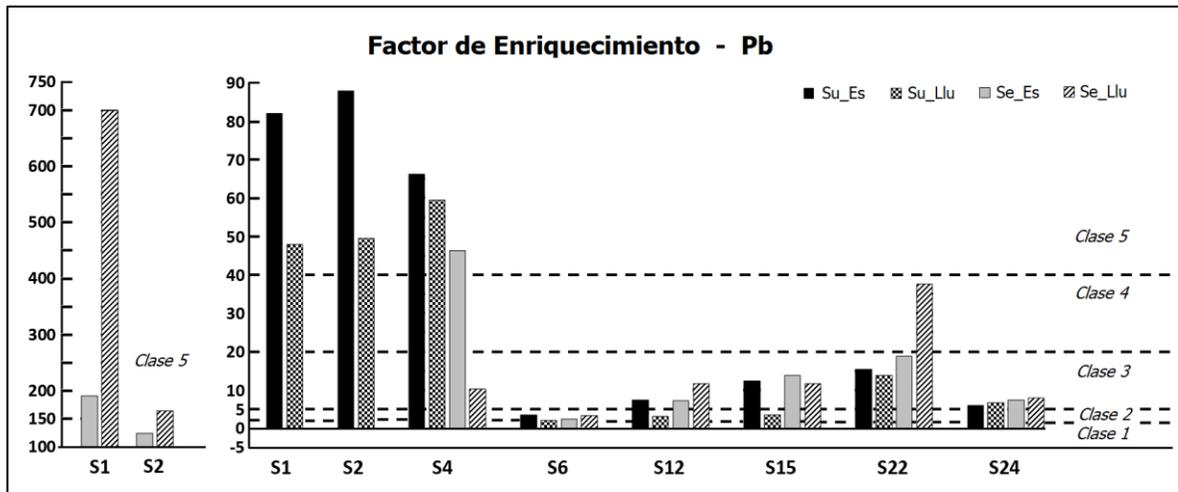


Figura 38. Factor de Enriquecimiento para Pb por Sustrato y Temporada
 Su_Es = Suelo Estiaje; Su_Llu = Suelo Lluvias; Se_Es = Sedimento Estiaje; Se_Llu = Sedimento Lluvias

El análisis para el Cr se muestra en la Figura 39, la gran mayoría de las lecturas caen en la Clase 1 de "No Enriquecido", el sedimento de S12 en temporada de lluvia y el suelo S15 en temporada de estiaje están "Moderadamente Enriquecidos" (Clase 2); y el sedimento S15 en ambas temporadas alcanzaron el grado "Significativamente Enriquecido" (Clase 3). S4 y S12 muestran un comportamiento muy similar para el sedimento en la temporada de lluvias, el valor aumento en siete y seis veces más su valor respecto a la temporada de estiaje; el primero muy posiblemente se deba a un arrastre de cromo de los puntos anteriores, actuando el sedimento como reservorio y el segundo, sugiere una fuente de contaminación cercana al punto como se mencionó anteriormente en el análisis del metal total. Resulta interesante el comportamiento mostrado por S15 (PIVA), donde se observa muy claro como la lluvia disminuye el impacto antropogénico del suelo, pero para el caso del sedimento, se aprecia que actúa como un reservorio enriqueciéndose con el metal. S22 (Ciudad de Aguascalientes), mostro valores superiores a S1 y S2 (sitios más próximos a la mina), lo que sugiere que existe actividad antropogénica que genera la contaminación por este metal.

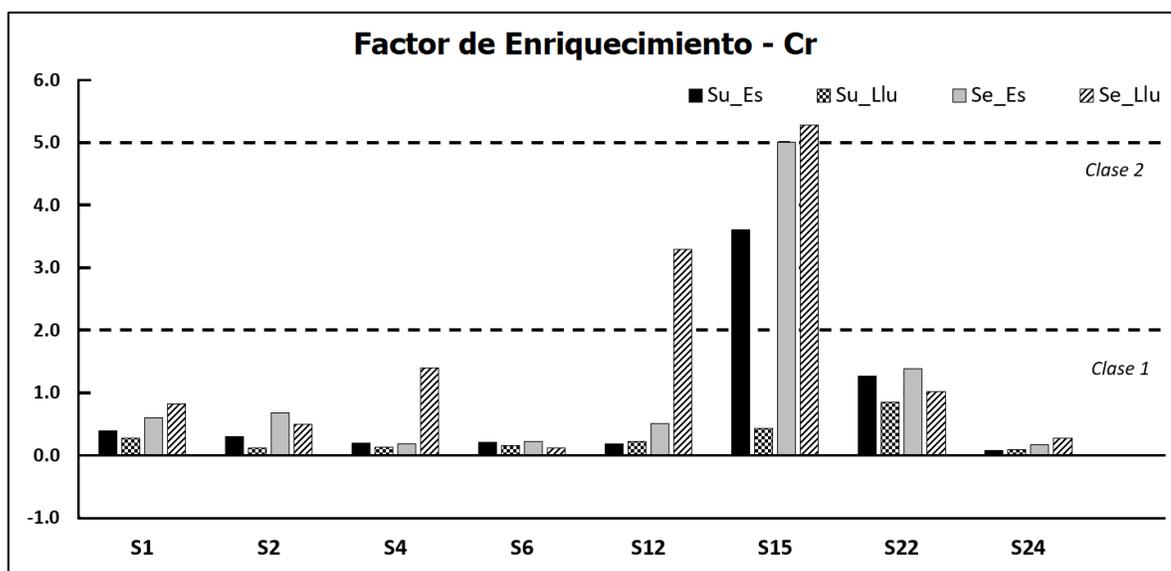


Figura 39. Factor de Enriquecimiento para Cr por Sustrato y Temporada
 Su_Es = Suelo Estiaje; Su_Llu = Suelo Lluvias; Se_Es = Sedimento Estiaje; Se_Llu = Sedimento Lluvias

El Zn también mostro que la contaminación en los sitios es debida a las actividades del hombre, todas las muestras fueron superiores a 2.0 (Clase 2) catalogándose de “Moderadamente Enriquecidas” a “Extremadamente Enriquecidas”. La influencia de la actividad humana se pone de manifiesto en S1 y S2, el suelo y sedimento en ambas temporadas están “Extremadamente Enriquecidos” (Clase 5), por lo que, sin lugar a dudas, el origen de la contaminación es antropogénico, los resultados superiores a 40, así lo demuestran. Por su cercanía con la zona minera, los valores obtenidos de S4, probablemente se deban a un arrastre de residuos de la mina. El sedimento de la temporada de lluvia de S12 se encuentra “Significativamente Enriquecido” (Clase 3), su comportamiento es similar que el Cr, lo que sugiere que también existe una fuente antropogénica que está liberando este metal. El comportamiento de S15 también es similar al observado en el análisis del Cr, con la diferencia de que el Zn esta una Clase por encima con respecto al Cr; S22, a diferencia de lo observado en el análisis del Cr, se encuentra, prácticamente en el mismo nivel que S15, ambos sitios sugieren origen antropogénico.

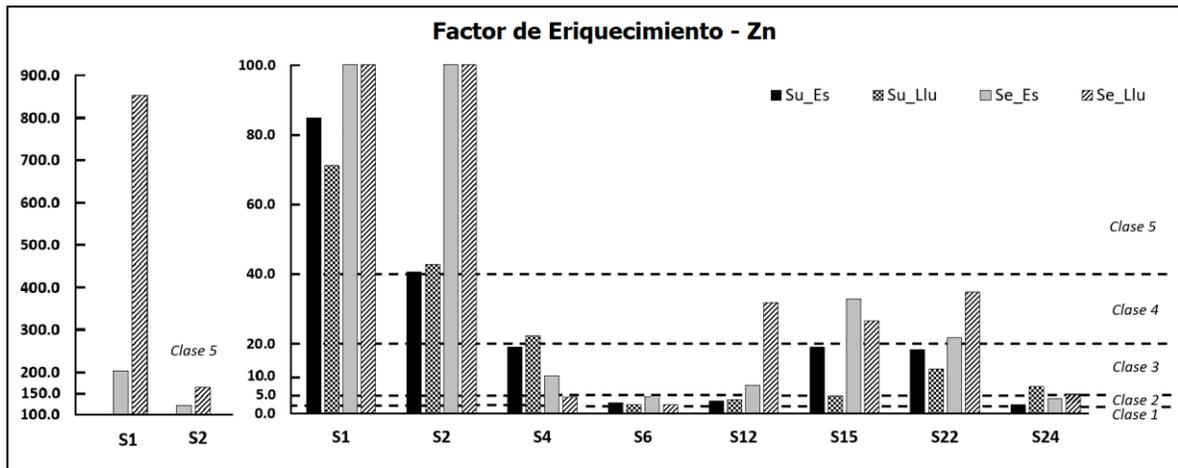


Figura 40. Factor de Enriquecimiento para Zn por Sustrato y Temporada
 Su_Es = Suelo Estiaje; Su_Llu = Suelo Lluvias; Se_Es = Sedimento Estiaje; Se_Llu = Sedimento Lluvias

De acuerdo con el análisis, los sitios con mayor influencia antropogénica son: S1, S2, S4, S15 y S22, no necesariamente en ese orden.

6.5. Pruebas de Toxicidad Aguda

6.5.1. Prueba de Toxicidad Aguda

6.5.1.1. Concentración Letal 50 (CL₅₀)

Primeramente, se realizó la prueba discriminatoria, la muestra se analizó con el elutriado al 100% (sin dilución), esta prueba resulta útil para discriminar entre muestras tóxicas de inocuas y posteriormente se procedió al conteo de los organismos muertos, considerando negativa aquella en donde existiera 1 espécimen muerto (NMX-AA-087-SCFI-2010, 2010). La Figura 41 muestra los resultados del análisis discriminatorio para *Alona guttata*.

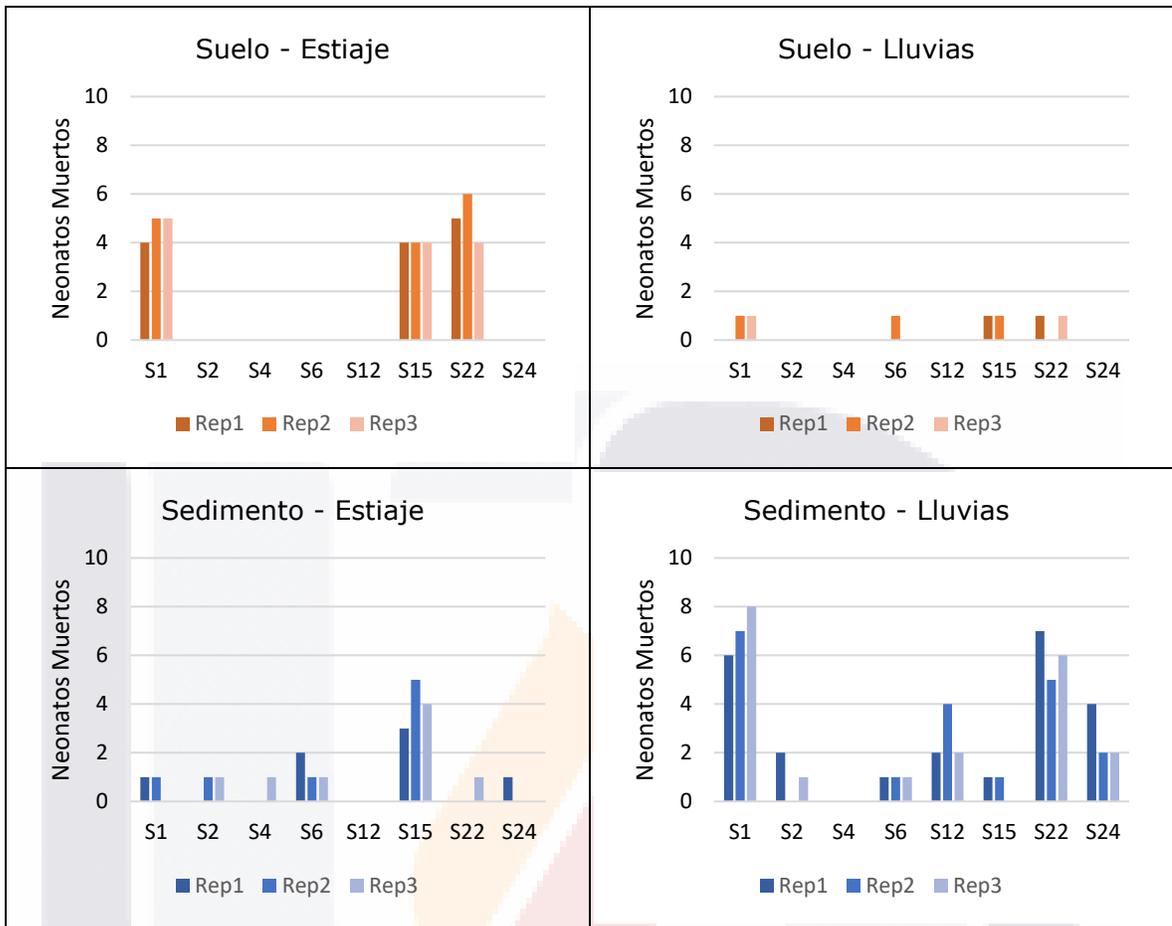


Figura 41. Análisis discriminatorio de los sitios para *Alona guttata*.

De acuerdo a la figura anterior; los suelos S1, S15 y S22 en la temporada de Estiaje; y el sedimento, S15 en la temporada de estiaje, junto con S12, S22 y S24 en la temporada de lluvias, resultaron tóxicos para el cladócero *Alona guttata*; los demás sitios no mostraron toxicidad por lo que se descartaron para para posteriores análisis.

A los puntos, que resultaron tóxicos en la prueba discriminatoria, se procedió a repetir la prueba con diluciones del elutriado para poder calcular la CL_{50} mediante el método PROBIT, la Tabla 12 muestra el valor de la CL_{50} expresada en porcentaje. Los resultados utilizados para la prueba discriminatoria y las diluciones se pueden consultar en el Anexo F.

Tabla 12. CL₅₀ para *Alona guttata*.

Sitio	Sustrato	Temporada	CL ₅₀
S1	Suelo	Estiaje	114.3 %
S15	Suelo	Estiaje	145.2 %
S22	Suelo	Estiaje	97.7 %
S15	Sedimento	Estiaje	17.1 %
S1	Sedimento	Lluvias	2.7 %
S12	Sedimento	Lluvias	53.2 %
S22	Sedimento	Lluvias	34.2 %
S24	Sedimento	Lluvias	17.8 %

Como se puede apreciar en la Tabla 12, el sedimento resulto más tóxico con respecto al suelo; los valores del suelo incluso llegaron a ser superiores al 100%, lo que implica que para lograr la muerte del 50 % de la población de *Alona guttata*, se necesitaría que el elutriado se concentre; por el contrario, en el sedimento, el valor más pequeño y preocupante se obtiene en S1 con 2.7%, lo que nos dice que con 2.7% del elutriado muere el 50% de la población del cladóceros. S15 en sedimento para la temporada de estiaje y S24 (Presa El Niágara) en sedimento en temporada de lluvias, muestran que menos de una quinta parte del elutriado es suficiente para matar al 50% del cladóceros.

Al igual que con la *Alona guttata*, la prueba también se realizó para el rotífero *Lecane quadridentata*, la Figura 42 muestra los resultados de la prueba discriminatória.

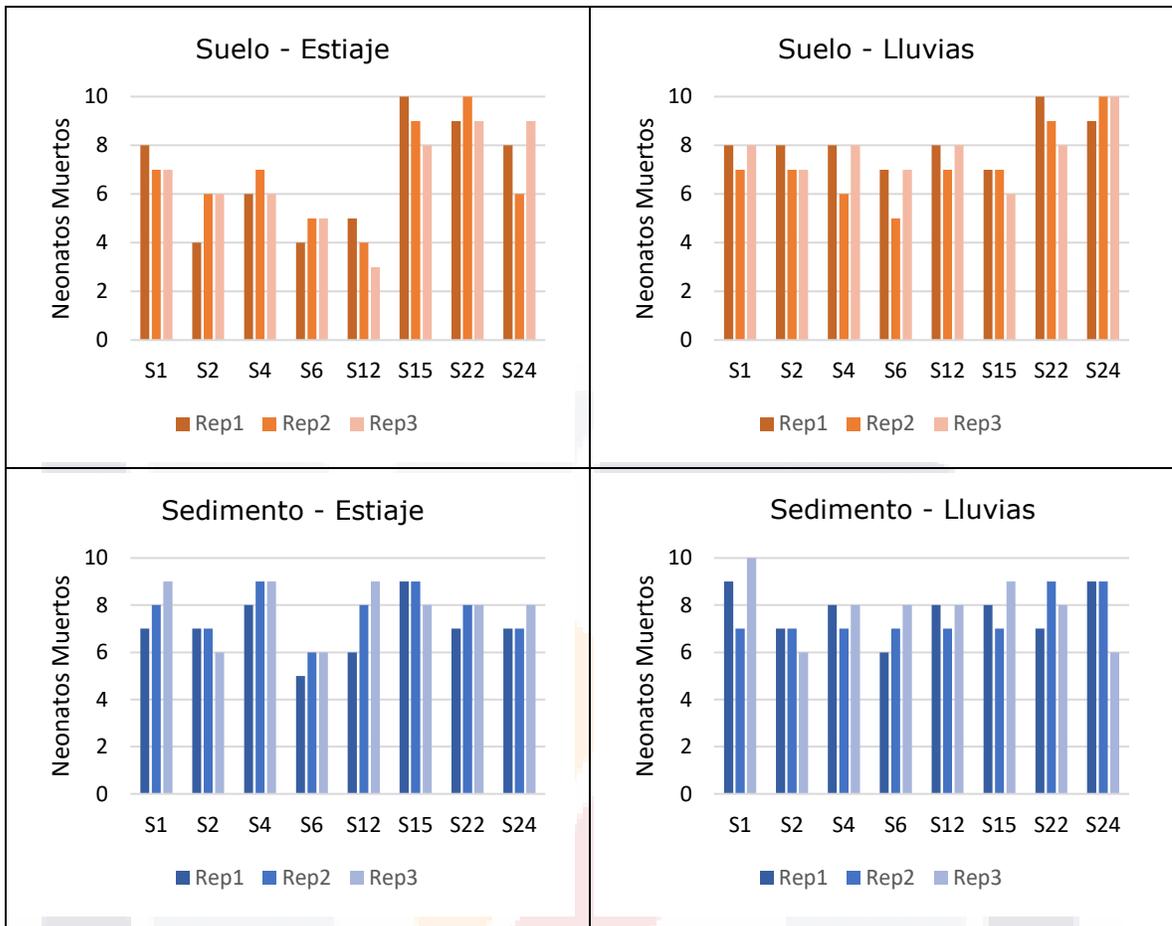


Figura 42. Análisis discriminador de los sitios para *Lecane quadridentata*.

Como se puede observar, todas las muestras mostraron toxicidad para *Lecane quadridentata*, procediendo a la realización de la prueba a concentraciones menores, para posteriormente calcular, mediante el método PROBIT la CL_{50} .

La Tabla 13 muestra los valores de la CL_{50} expresados en porcentaje. Los resultados utilizados durante la prueba discriminatoria y las diluciones se pueden consultar en el Anexo F.

Tabla 13. CL₅₀ para *Lecane quadridentata*.

Sitio	Suelo		Sedimento	
	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvia
S1	10.5%	15.4%	6.8%	5.1%
S2	7.3%	5.3%	8.0%	52.7%
S4	10.2%	5.8%	11.9%	29.9%
S6	12.5%	12.7%	20.1%	26.8%
S12	22.4%	19.6%	24.5%	5.8%
S15	20.2%	8.1%	18.7%	15.5%
S22	9.6%	11.7%	6.1%	16.4%
S24	17.8%	14.8%	17.0%	11.2%

Como se puede apreciar en la Tabla 13, el porcentaje de toxicidad para el suelo oscilo entre 5.3% y 22.4% y para el sedimento entre 5.1% y 24.5%. El valor más pequeño y por ende el que representa mayor toxicidad para el rotífero es el sedimento en temporada de lluvias, sitio que coincide con la prueba de toxicidad para *Alona guttata*. S12, tanto para suelo como para sedimento, en la temporada de estiaje fue el sitio con menor toxicidad observada; sin embargo, el valor es inferior a 25% lo que significa que con una cuarta parte del elutriado muere el 50 % de la población del rotífero.

6.5.1.2. Unidades de Toxicidad Aguda (UTa)

Con el propósito de comprender más fácilmente las concentraciones de toxicidad, estas se suelen convertir en unidades toxicológicas (UT), de esta manera se supera una posible confusión en la interpretación de la respuesta del organismo al químico y se puede comparar con un límite permisible; de acuerdo con la USEPA, las UTa no deben de exceder 0.3 unidades para asegurar la protección de los ecosistemas acuáticos (USEPA, 1991; USEPA, 2000). La Tabla 14 muestra las UTa calculadas para *Alona guttata* en los sitios que resultaron tóxicos en la prueba discriminatoria.

Tabla 14. UTa para *Alona guttata*.

Sitio	Sustrato	Temporada	UTa
S1	Suelo	Estiaje	0.9
S15	Suelo	Estiaje	0.7
S22	Suelo	Estiaje	1.0
S15	Sedimento	Estiaje	5.9
S1	Sedimento	Lluvias	36.9
S12	Sedimento	Lluvias	1.9
S22	Sedimento	Lluvias	2.9
S24	Sedimento	Lluvias	5.6

Como se puede apreciar, los ocho sitios superaron 0.3 UTa; los suelos fueron quienes mostraron los valores más bajos, por el contrario, los sedimentos resultaron los más altos para el cladóceros. El sedimento S1 en temporada de lluvias, fue quien mostro el valor más alto (36.9 UTa), seis veces más con respecto al valor más próximo.

Para *Lecane quadridentata*, los resultados se pueden apreciar en la Tabla 15.

Tabla 15. UTa para *Lecane quadridentata*.

Sitio	Suelo		Sedimento	
	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvia
S1	9.5	6.5	14.6	19.6
S2	13.7	18.9	12.5	1.9
S4	9.8	17.3	8.4	3.3
S6	8.0	7.8	5.0	3.7
S12	4.5	5.1	4.1	17.3
S15	4.9	12.3	5.3	6.5
S22	10.4	8.6	16.3	6.1
S24	5.9	6.7	5.9	8.9

Todas las muestras mostraron toxicidad, los valores de unidades toxicológicas superan las 1.9 UTa (S2 en temporada de lluvias), 6 veces por

encima del valor recomendado por la USEPA, hasta un máximo de 19.6 UTa (S1 en temporada de lluvias); el promedio de UTa en suelo fue de 8.3 y 10.4 para estiaje y lluvias respectivamente, y en sedimento fue de 9.0 y 8.4 para estiaje y lluvias respectivamente.

A diferencia de lo observado con *Alona guttata*, el sedimento de S4 en temporada de lluvia fue quien mostro el valor más bajo, dicho valor es probable que se deba al aumento en el volumen de la presa y por ende a la dilución de los tóxicos en el sedimento.

Por otro lado, el valor mas alto lo presento el sedimento S1 en la temporada de lluvias (19.6 UTa), sitio que concuerda con el valor más alto mostrado por *Alona guttata* (36.9 UTa), ambos en temporada de lluvias, lo que implica que el agua de lluvia, muy probablemente arrastre residuos de la mina.

La Figura 43, muestra un comparativo entre la CL₅₀ y las UTa de las ocho muestras en común que resultaron tóxicas en ambos invertebrados.

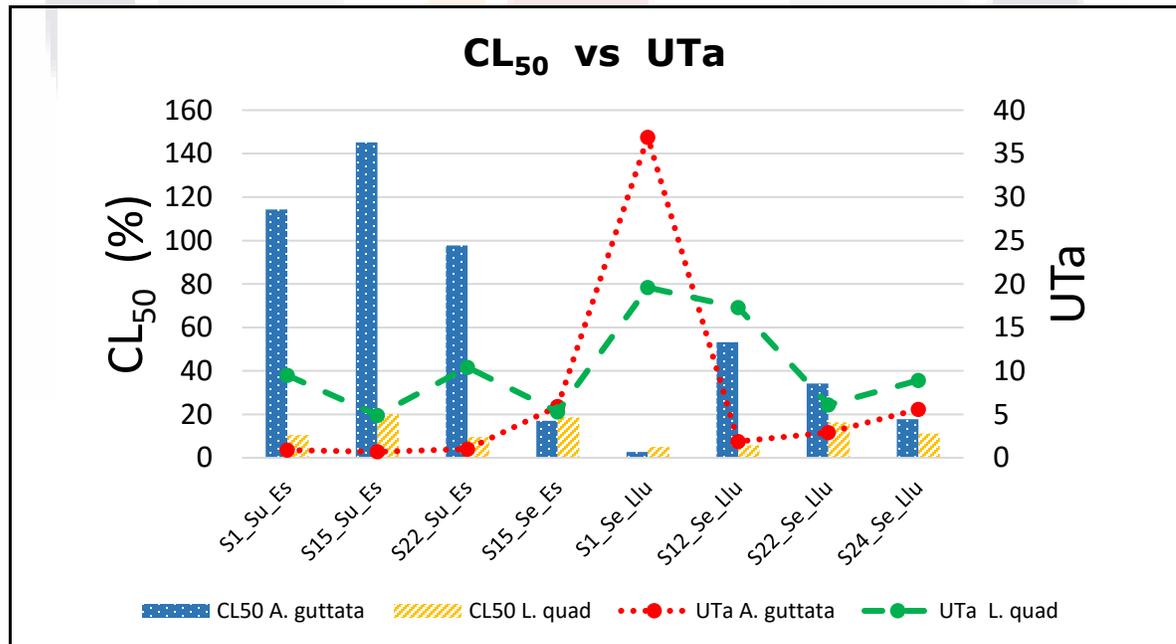


Figura 43. Comparativo entre CL₅₀ y UTa de las ocho muestras en común que resultaron tóxicas tanto para *A. guttata* como *L. quadridentata*.
Su: Suelo; Se: Sedimento; Es: Estiaje; Llu; Lluvias

Como se puede observar, el valor de las UTa de *Lecane quadridentata*, superan las UTa de *Alona guttata*, con excepción de S15 en sedimento en la temporada de estiaje, cuya diferencia es mínima, y muy claramente en S1 en sedimento en la temporada de lluvias, donde su valor es casi el doble del valor de las UTa de *Lecane quadridentata*; mostrando que el sedimento de S1 en temporada de lluvias es particularmente diferente en composición química frente a *Alona guttata*.

6.6. Análisis Estadístico Complementario

Las siguientes tablas muestran un análisis estadístico preliminar de correlación de Pearson para las mismas ocho muestras entre la concentración total del metal, FM, Igeo y FE versus CL₅₀ y UTa para ambos invertebrados.

Tabla 16. Correlación de Pearson para Pb

	M Total [mg kg ⁻¹]	FM	Igeo	FE	A. guttata		L. quadridentata	
					CL ₅₀	UTa	CL ₅₀	UTa
M Total	1							
FM	0.844**	1						
Igeo	0.884**	0.504	1					
FE	0.999**	0.849**	0.879**	1				
CL₅₀ A. g	-0.411	-0.540	-0.270	-0.412	1			
UTa A. g	0.973**	0.920**	0.785*	0.974**	-0.569	1		
CL₅₀ L. q	-0.515	-0.434	-0.470	-0.511	0.286	-0.466	1	
UTa L. q	0.683	0.655	0.536	0.682	-0.347	0.650	-0.926**	1

**Correlación Significativa a un Nivel de 0.01

*Correlación Significativa a un Nivel de 0.05

Tabla 17. Correlación de Pearson para Cr

	M Total [mg kg ⁻¹]	FM	Igeo	FE	A. guttata		L. quadridentata	
					CL ₅₀	UTa	CL ₅₀	UTa
M Total	1							
FM	-0.505	1						
Igeo	0.937**	-0.550	1					
FE	0.979**	-0.521	0.898**	1				
CL₅₀ A. g	-0.047	-0.666	0.071	0.080	1			
UTa A. g	-0.164	0.716*	-0.086	-0.235	-0.569	1		
CL₅₀ L. q	0.405	-0.368	0.336	0.494	0.286	-0.466	1	
UTa L. q	-0.171	0.383	-0.071	-0.266	-0.347	0.650	-0.926**	1

**Correlación Significativa a un Nivel de 0.01

*Correlación Significativa a un Nivel de 0.05

Tabla 18. Correlación de Pearson para Zn

	M Total [mg kg ⁻¹]	FM	Igeo	FE	A. guttata		L. quadridentata	
					CL ₅₀	UTa	CL ₅₀	UTa
M Total	1							
FM	-0.417	1						
Igeo	0.883**	-0.348	1					
FE	0.9998**	-0.403	0.881**	1				
CL₅₀ A. g	-0.418	0.022	-0.272	-0.421	1			
UTa A. g	0.976**	-0.390	0.795*	0.978**	-0.569	1		
CL₅₀ L. q	-0.517	-0.017	-0.480	-0.512	0.286	-0.466	1	
UTa L. q	0.691	0.131	0.617	0.692	-0.347	0.650	-0.926**	1

**Correlación Significativa a un Nivel de 0.01

*Correlación Significativa a un Nivel de 0.05

De acuerdo con las tablas anteriores y como parte de un primer análisis estadístico preliminar, se puede observar que: 1) el metal total muestra una relación más estrecha con el FE versus Igeo y FM, lo cual indica que el FE resulta más apropiado para describir el grado de contaminación de un sitio, lo cual se puede justificar por el uso de un elemento normalizador en la determinación del factor; 2) solamente las UTa de *Alona guttata* mostrarán relación con la concentración total del metal y alguno de los índices y/o factores, por lo que la mortalidad del rotífero *Lecane quadridentata*, muy posiblemente se deba a otro tóxico presente en el elutriado y no precisamente a los metales estudiados; y 3) el Cr, no muestra relación entre las UTa de ninguno de los invertebrados y la concentración total del metal, Igeo y FE, por lo que se puede suponer que el Cr no participa activamente en la toxicidad de la muestra, lo anterior se puede entender al revisar los resultados del potencial de lixiviación y el porcentaje de movilidad del metal (fracción intercambiable y carbonatada), confirmando que las especies móviles son las más biodisponibles y de fácil asimilación.

7. CONCLUSIÓN

*Hay algo fascinante acerca de la ciencia.
Uno obtiene una masa impresionante de conjeturas
a partir de un grupo insignificante de hechos.
— Mark Twain —*

En base a los resultados obtenidos en los ocho sitios seleccionados de la presente investigación se puede concluir lo siguiente:

El suelo y sedimento, de los sitios S1 y S2, tanto para temporada de lluvia como temporada de estiaje resultaron ser los puntos más contaminados para Pb y Zn; siendo ambos puntos los más cercanos a la mina. Las concentraciones máximas detectadas para Pb fueron de 527.2 y 4273.3 mg kg⁻¹ en suelo y sedimento, respectivamente; y para Zn alcanzaron un valor de 2277.8 mg kg⁻¹ para suelo y 21799.2 mg kg⁻¹ para sedimento. En el caso del Cr, el sedimento del sitio S15 (PIVA) fue el punto que mostro la concentración más elevada, 87.3 y 83.8 mg kg⁻¹ para estiaje y lluvias, respectivamente.

De acuerdo con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, solo los suelos S1 y S2, sobrepasan los límites permisibles reportados para Pb, ningún suelo sobrepaso el límite permisible para el Cr; el Zn no está contemplado en dicha Norma. Sin embargo, si se comparan los resultados contra los manejados por el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME), el cual, si contempla al Zn, existen sitios que si sobrepasan el límite permisible y en el caso del Pb la cantidad de sitios que sobrepasan el límite permisible aumenta. El Cr, continua sin sobrepasar los valores reportados como permisibles.

El 37.5% de las muestras de sedimento supero el Nivel de Efecto Probable (PEL) reportado para el Pb por el CCME y solo el 12.5% de las muestras estuvo por debajo del Nivel de Efecto Umbral (TEL); para el caso del Cr, ningún sitio supero el valor PEL y solo el 18.75% de las muestras estuvo por arriba del TEL;

finalmente, en el caso del Zn, el 18.75% de las muestras esta por debajo del valor TEL y el 56.25% de las muestras supera el valor PEL; valores que representan riesgo para mantener la vida acuática.

El Cuerpo de Agua de la Presa El Niágara, contribuye significativamente a disminuir la concentración total de los metales en ambos sustratos y temporadas.

La extracción secuencial mostro que el Pb se encuentra principalmente asociado a la fracción de Óxidos de Fe//Mn, mientras que el Cr y Zn se encuentran asociados principalmente a la fracción Residual.

El análisis estadístico mostro que no existe diferencia significativa entre los valores encontrados de los metales entre temporadas de muestreo, hállese de concentración total o especiación, considerando un $\alpha=0.5$.

La prueba de lixiviación mostro que el orden de lixiviación de los metales es $Zn > Pb > Cr$, siendo nula la lixiviación del Cr, tanto para suelo como para sedimento.

El factor de movilidad (FM) resulto ser superior, para los tres metales, en sedimento comparado con suelo; el FM promedio en suelo, expresado en porcentaje, fue de 26.67%, 3.83 % y 11.18% para Pb, Cr y Zn respectivamente; mientras que el FM promedio en sedimento fue de 28.48% para Pb, 4.34% para Cr y 20.62% para Zn, obteniéndose que la movilidad de los metales, por sustrato y temporada fue $Pb > Zn > Cr$.

El Índice de Geo Acumulación (Igeo) mostro que existe contaminación por Pb en S1, S2, S4 y S22; comportamiento similar mostro el Zn, donde S1, S2, S4, S15 y S22 también resultaron contaminados; mientras que el Igeo de Cr mostro que no existe contaminación por el metal en ninguna de las muestras.

El Factor de Enriquecimiento (FE) para el Pb indico que todos los sitios tienen un origen antropogénico de la contaminación del metal; S1, S2, S4 y S22 resultaron ser los sitios más afectados. El FE del Zn, también reveló que todos los sitios tienen un origen antropogénico; S1, S2, S4, S15 y S22, muestran los valores más altos. El FE del Cr, mostro que 4 muestras están contaminadas y su origen es antropogénico, S12 y S15 fueron los sitios que enriquecimiento antropogénico. Lo anterior indica que el FE resulta conveniente, como Indicador Ambiental, para evaluar el grado de riesgo y contaminación por el metal.

Las pruebas de Toxicidad Aguda revelaron que *Lecane quadridentata* es más sensible que *Alona guttata*, en donde todos los sitios resultaron tóxicos para el primer organismo y solo 8 muestras resultaron tóxicas para el segundo invertebrado. En todos los casos las Unidades de Toxicidad Aguda (UTa) superaron el valor máximo permitido (0.3 UTa) por la USEPA como límite para asegurar la protección de los ecosistemas acuáticos.

Por último, el análisis estadístico complementario, señaló que la concentración de metal total, muestra una correlación más significativa con el factor de enriquecimiento ($r > 0.97$); el Cr no tiene relación con las UTa de ningún invertebrado y que las UTa de *Alona guttata*, mostraron correlación significativa con la concentración total de Pb ($r = 0.973$) y Zn ($r = 0.976$) y algunos indicadores ambientales, principalmente el factor de enriquecimiento ($r > 0.97$); lo que indica que dicho invertebrado y factor de enriquecimiento, resultan idóneos para ser usados como monitores ambientales.

8. RECOMENDACIONES

Entre las dificultades se esconde la oportunidad.

— Albert Einstein —

Este trabajo establece las bases para continuar en un futuro explorando el uso de otros índices o factores ambientales, en particular aquellos que utilizan un elemento normalizador dentro de sus cálculos.

Sería conveniente darle seguimiento a los puntos muestreados y presentados en este trabajo de tesis, ampliando el número de metales o metaloides analizados, en donde se incluya al Mercurio, Arsénico y Cadmio entre otros.

Debido a que el metal puede ser transportado por el viento, se puede seguir trabajando en la misma línea y ampliar el estudio a suelos que no necesariamente tengan cercanía con ríos o cuerpos de agua, llevando a cabo un estudio "radial" partiendo de la Mina como centro del muestreo radial.

De igual manera, el análisis de los metales en el sedimento puede enriquecerse realizando determinaciones de los metales por profundidad.

9. GLOSARIO

*Reinventar la rueda es un desperdicio
de tiempo y talento.
— Anónimo —*

Detrito: Producto resultante de la disgregación en partículas de una materia sólida. Partículas que resultan de la descomposición de una roca u otro cuerpo.

Elutriado: Disolución acuosa obtenida por la adición de agua a una sustancia sólida (sedimento y/o suelo), la cual se agita por un tiempo determinado. Posteriormente la mezcla obtenida se centrifuga, se filtra o se decanta el sobrenadante para obtener la fase líquida.

Lixiviado: Es el líquido producido por la percolación del agua a través de cualquier material permeable, desechos sólidos o columna de suelo y que contiene sólidos disueltos o en suspensión, componentes que se adicionan por arrastre o reacción.

Neonatos: Son los microorganismos (*Alona guttata* y *Lecane quadridentata*) de edad menor a 24 h que son utilizados en las pruebas de toxicidad.

10. BIBLIOGRAFÍA

*En cuestiones de Ciencia, la autoridad de miles no vale
lo que el humilde razonamiento de un solo individuo.
— Galileo Galilei —*

1. Abel, P. D. (2002). *Water Pollution Biology*. (2nd edition). USA. CRC Press.
2. Ahmed Abd El Razek, A. (2014). The mobility and speciation of lead and cadmium in Bahr El Baqar region, Egypt. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 685–691.
3. Allen, H.E., Huang, C.P., Bailey, G.W. & Bowers A.R. (1995). *Metal Speciation and Contamination of Soil*. USA. CRC Press.
4. Altundag, H., Imamoglu, M., Doganci, S., Baysal, E., Albayrak, S. & Tuzen, M. (2013). Determination of Heavy Metals and their Speciation in Street Dusts by Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometry after a Community Bureau of Reference Sequential Extraction Procedure. *Journal of AOAC International*, 96 (4), 864–869.
5. Armon, R.H. & Hännien, O. (2015). *Environmental Indicators*. Springer Netherlands.
6. APHA-AWWA-WPCF (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (21st edn). American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, Washington, DC. (p. 1469).
7. ASTM. (2000). E 1391–94 Standard guide for collection, storage, characterization, and manipulation of sediments for toxicological testing. In: 2000 ASTM Standards on Environmental Sampling, Vol. 11.05 (pp. 768–788) Conshohocken, PA.
8. Baqueiro, E. (2008). *Introducción al Derecho Ambiental*. (1a. edición). México. Oxford University Press.
9. Blume, H. P., Brümmer, G. W., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K. & Wilke, B. M. (2015). *Scheffer/Schachtschabel Soil Science*. Springer Berlin Heidelberg.

10. Bourennane, H., Douay, F., Sterckeman, T., Villanneau, E., Ciesielski, H., King, D. & Baize, D. (2010). Mapping of anthropogenic trace elements inputs in agricultural topsoil from Northern France using enrichment factors. *Geoderma*, 157,165–174.
11. Bruton, L. L., Chabner, B. A. & Knollmann, B. C. (2012). *Goodman & Gilman: Las Bases Farmacológicas de la Terapéutica*. México. McGraw-Hill Interamericana.
12. Cabildo, M.P., Cornago, M.P., Escolástico, C., Esteban, S., López C. & Sanz, D. (2013). *Bases Químicas del Medio Ambiente*. España. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
13. Chabukdhara, M., & Nema, A. K. (2012). Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: A chemometric and geochemical approach. *Chemosphere*, 87(8), 945–953.
14. Cappuyns, V. (2018). Barium (Ba) leaching from soils and certified reference materials. *Applied Geochemistry*, 88, 68–84.
15. Carter, M.R. & Gregorich, E.G. (2008) *Soil Sampling and Methods of Analysis*, (2nd edition). USA. Taylor & Francis.
16. Castillo, G. (2004). *Ensayos Toxicológicos y Métodos de Evaluación de Calidad de Aguas*. México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
17. CCAPAMA. (2010). *Río San Pedro. Deterioro Ambiental y la Necesidad de su Rehabilitación en el Municipio de Aguascalientes*. Comisión Ciudadana de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Aguascalientes. México.
18. CCME. (2002). *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*. Canadian Council of Ministers of the Environment. Canada. Recuperado de <http://www.ccme.ca>. Consultado el 19 de Agosto de 2016.
19. CCME. (2006). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environment and Human Health*. Canadian Council of Ministers of the Environment. Canada. Recuperado de <http://www.ccme.ca>. Consultado el 19 de Agosto de 2016.
20. CEN/TS 14997 (2006) Characterization of waste-leaching behavior tests- influence of pH on leaching with continuous pH-control. CEN, Brussels, Belgium.

21. Cornelis, R., Crews, H., Caruso, J. & Heumann, K. (2003). *Handbook of Elemental Speciation: Techniques and Methodology*. England. John Wiley & Sons.
22. Cottenie, A., Camerlynck, R., Verloo, M. & Dhaese, A. (1980). Fractionation and determination of trace elements in plants, soils and sediments. *Pure and Applied Chemistry*, 52 (1), 45-53.
23. Davidson, C. M., Wilson, L. E. & Ure, A. M. (1999). Effect of sample preparation on the operational speciation of cadmium and lead in a freshwater sediment. *Fresenius J. Anal Chem*, 363, 134-136.
24. Domènech, X. & Peral, J. (2012). *Química Ambiental de Sistemas Terrestres*. España. Editorial Reverté.
25. Favas, P.J.C., Sarkar, S.K. & Rakshit, D. (2015). Geochemical fractionation of trace elements in stream sediments contaminated by mining activity. *Clean Soil Air Water*, 43, 446-455.
26. Fernández, L.C., Rojas, N.G., Roldán, T.G., Ramírez, M.E., Zegarra, H.G., Hernández, R.U., Reyes, J., Flores, D. & Arce, J.M. (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. Instituto Mexicano del Petróleo, D.F. México.
27. Funk, W., Dammann, V. & Donnevert, G. (1995). *Quality Assurance in Analytical Chemistry*. (1st edition). Alemania. Editorial VCH.
28. Guzmán-Colis, G. (2011). *Estudio sobre los niveles de contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos relacionados con el cauce del río San Pedro*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
29. Harrison, R.M. (1999). *Understanding Our Environment. An Introduction to Environmental Chemistry and Pollution*. (3rd edition). The Royal Society of Chemistry.
30. Hill, M.K. (2010). *Understanding Environmental Pollution*. (3rd edition). Cambridge University Press.
31. Hodgson, E. (2004). *A Textbook of Modern Toxicology*. (3rd edition). USA. John Wiley & Sons.

32. Huang, J.H. & Kretzschmar, R. (2010) Sequential extraction method for speciation of arsenate and arsenite in mineral soils. *Anal Chem*, 82, 5534–5540.
33. INECC. (2012). *Métales Pesados*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático México. Recuperado de <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>. Consultado el 12 de Junio de 2016.
34. INEGI. (2015). *Anuario Estadístico y Geográfico de Aguascalientes 2015*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
35. ISO–11466. (1995). Soil quality – Extraction of trace elements soluble in aqua regia. International Organization for Standardization, Berlin, Germany.
36. Iwegbue, C. M. A. (2013). Chemical Fractionation and Mobility of Heavy Metals in Soils in the Vecinity of Asphalt Plants in Delta State, Nigeria. *Environmental Forensics*, 14, 248-259.
37. Jaramillo Juárez, F., Rincón Sánchez, A. R. & Posadas del Río, F. A. (2006). *Toxicología Básica*. Aguascalientes, MX. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
38. Jaramillo Juárez, F., Rincón Sánchez, A. R. & Rico Martínez, R. (2009). *Toxicología Ambiental*. Aguascalientes, MX. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
39. Javan, S., Hassani, A. H., Ahangar, A. G. & Soltani, J. (2015). Fractionation of heavy metals in bottom sediments in Chahnimeh 1, Zabol, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(6), 1–11.
40. Kabata-Pendias, A. & Mukherjee, A.B. (2007). *Trace Elements from Soil to Human*. Springer Berlin Heidelberg.
41. Khalil, A., Hanich, L., Bannari, A., Zouhri, L., Pourret, O. & Hakkou, R. (2013) Assessment of soil contamination around an abandoned mine in a semi-arid environment using geochemistry and geostatistics: Pre-work of geochemical process modeling with numerical models. *J Geochem Explor*, 125, 117–129.

42. Kurilov, P. I., Kruglyakova, R. P., Savitskaya, N. I. & Fedotov, P. S. (2009). Fractionation and Speciation Analysis of Heavy Metals in the Azov Sea Bottom Sediments. *Journal of Analytical Chemistry*, 64(7), 738–745.
43. Landner, L. (1987). *Speciation of Metals in Water, Sediment and Soil System*. Germany. Springer-Verlag.
44. Li, Z., Ma, Z., Van der Kuijp, T.J., Yuan, Z. & Huang, L. (2014). A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Sci Total Environ*. 468–469, 843–853.
45. Liénard A, Brostaux Y, Colinet G (2014) Soil contamination near a former Zn-Pb ore-treatment plant: Evaluation of deterministic factors and spatial structures at the landscape scale. *J Geochem Explor* 147:107–116.
46. Mahlangeni, N.T., Moodley, R. & Jonnalagadda, S.B. (2016). Heavy metal distribution in *Laportea peduncularis* and growth soil from the eastern parts of KwaZulu-Natal, South Africa. *Environ Monit Assess*, 188, 1–14.
47. Manahan, S.E. (2010). *Environmental Chemistry*. (9th edition). USA. CRC Press.
48. Martín, A. & Santamaría, J.M. (2000). *Diccionario Terminológico de Contaminación Ambiental*. (1^a edición). España. Ediciones Universidad de Navarra.
49. Martínez, T., Tejeda, S., Estañol, B., Zúñiga, M.Á. & Zarazúa, G. (2016). Chemical and sequential analysis of some metals in sediments from the North Coast of the Gulf of Mexico. *J Radioanal Nucl Ch*, 309, 343–350.
50. McLennan, S.M. (2001) Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochem Geophys Geosy*, 2(4).
51. Mitchell, K.N., Ramos Gómez, M.S., Guerrero Barrera, A.L., Yamamoto Flores, L., Flores de la Torre, J.A. & Avelar González, F.J. (2016). Evaluation of Environmental Risk of Metal Contaminated Soils and Sediments Near Mining Sites in Aguascalientes, Mexico. *B Environ Contam Tox*, 97, 216–224.

52. Mora, M. (2007). *Determinación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en suelo y sedimentos del cauce del Río San Pedro*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
53. Müller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108–118.
54. Nagib, S. & Inoue, K. (2000) Recovery of lead and zinc from fly ash generated from municipal incineration plants by means of acid and/or alkaline leaching. *Hydrometallurgy*, 56, 269–292.
55. Naji, A., Ismail, A. & Ismail, A. R. (2010). Chemical speciation and contamination assessment of Zn and Cd by sequential extraction in surface sediment of Klang River, Malaysia. *Microchemical Journal*, 95, 285-292.
56. Nelson, A. & Donkin, P. (1985). Processes of bioaccumulation: the importance of chemical speciation. *Marine Pollution Bulletin*, 16 (4), 164-169.
57. Newman, M. C. & Clements, W. H. (2008). *Ecotoxicology: A Comprehensive Treatment*. USA. CRC Press.
58. NMX-AA-087-SCFI-2010. (2010). Análisis de Agua – Evaluación de toxicidad aguda con *Daphnia magna* Straus (Crustacea-Cladocera) – Método de Prueba. México.
59. NMX-AA-132-SCFI-2006. (2006). *Muestreo de suelos para la identificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra*. México.
60. Ogundiran, M.B. & Osibanjo, O. (2009). Mobility and speciation of heavy metals in soils impacted by hazardous waste. *Chem Spec Bioavailab*, 21, 59–69.
61. Okoro, H.K., Fatoki, O.S., Adekola, F.A., Ximba, B.J. & Snyman, R.G. (2012) A Review of Sequential Extraction Procedures for Heavy Metals Speciation in Soil and Sediments. *Scientifs Reports*, 1(181), 1-9.
62. Perin, G., Craboledda, L., Lucchese, M., Cirillo, R., Dotta, L., Zanette, M. L., & Orio, A. A. (1985). Heavy metal speciation in the sediments Northern Adriatic Sea—a new approach for environmental toxicity determination. *Heavy Metals in the Environment*, 2, 454–456.

63. Pourret, O., Lange, B., Bonhoure, J., Colinet, G., Decrée, S., Mahy, G. & Faucon, M.P. (2016). Assessment of soil metal distribution and environmental impact of mining in Katanga (Democratic Republic of Congo). *Appl Geochem*, 64, 43–55.
64. Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C. & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo y sedimento provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*, 5 (1, 2), 149-155.
65. Quevauviller, P. (1998) Operationally defined extraction procedures for soil and sediment analysis I. Standardization. *TrAC*, 17, 289–298.
66. Radojević, M. & Bashkin, V. N. (2006). *Practical Environmental Analysis*. (2nd edition). UK. The Royal Society Chemistry.
67. Ramos, M. S. (2012). *Tratamiento de jales y sedimentos contaminados con metales pesados mediante la aplicación de biosólidos*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
68. Repetto, M. & Repetto, G. (2009) *Toxicología Fundamental*. (4a edición). Diaz de Santos.
69. Rendina, A., Cabo, L., Arreghini, S., Bargiela, M. & Fabrizio de Iorio, A. (2001). Geochemical distribution and mobility factors of Zn and Cu in sediments of the Reconquista River, Argentina. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 17 (4), 187-192.
70. Rizzotto, M. (2007). *Diccionario de Química General e Inorgánica*. (1^a edición). Argentina. Corpus Editorial y Distribuidora.
71. Romero, A. M., Vandecasteele, C. & Cooreman, H. (2000). Metales (Cr, Pb y Zn) en Sedimentos y Quironómidos del Río Rocha. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, 8, 37-47.
72. Rosas, R. H. (2001). *Estudio de la contaminación de metales pesados en la cuenca de Llobregat*. Tesis Doctoral. UPC. Departamento de Ingeniería Minera y Recursos Naturales.
73. Saad, M.A.H., Beltagy, A. I., Fahmy, M.A. & Mahmoud, W.M. (2004). Lead speciation in the sediments of the heavily polluted Western Harbor of Alexandria. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 4(4–5), 375–384.

74. Salomons, W. & Förstner, U. (1984). *Metals in the Hydrocycle*. Berlin. Springer-Verlag.
75. Santos, G. E., Ramírez, E. M., Hernández, S., Azuara P. M. & Rico, R. (2007). Determination of toxicity levels in the San Pedro River Watershed, Aguascalientes, México. *J. Environmental Science and Health Part A*, 42, 1403–1410.
76. Selim, H.M. & Iskandar, I.K. (1999). *Fate and Transport of Heavy Metals in the Vadose Zone*. USA. CRC Press.
77. SEMARNAT. (2002). *NOM-021-SEMARNAT-2000. Que Establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos, Estudio, Muestreo y Análisis*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial, México.
78. SEMARNAT. (2004). *NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial, México.
79. SGM. (2016). *Panorama Minero del Estado de Aguascalientes*. Servicio Geológico Mexicano, México.
80. Shimizu, T., Hiroaka, Y., Kikuchi, M. & Uehara, N. (2005). A novel kinetic method for the especiation of cadmium in river water by micro solvent extraction with dothizone. *Analytical Sciences*, 21, 1-2.
81. Tessier, A., Campbell, P. G. & Bisson, M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51(7), 844-851.
82. Tessier, A., Campbell, P. G. & Bisson, M. (1980). Trace metal speciation in the Yamaska and St. Francois Rivers (Quebec). *Can. J. Earth Sci.* 17, 90-105.
83. USEPA. (1986). *Cation - Exchange Capacity of Soil (Sodium Acetate) (Method 9081)*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington. <https://www.epa.gov/hw-sw846>. Accessed 23 August 2017

84. USEPA. (1991). *Technical Support Document for Water Quality-Based Toxicity Control*. EPA/505/2-90-001. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.
85. USEPA. (2000). *Methods for Measuring the Toxicity and Bioaccumulation of Sediment-associated Contaminants with Freshwater Invertebrates*. (2nd edition). EPA/600/R-99/064. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.
86. USEPA. (2001). *Methods for Collection, Storage and Manipulation of Sediments for Chemical and Toxicological Analyses: Technical Manual*. EPA 823-B-01-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.
87. USEPA-USACE. (1998). *Evaluation of dredged material proposed for discharge in waters of the U.S.— Testing Manual: Inland Testing Manual*. EPA-823-B-98-004. United States Environmental Protection Agency, United States Army Corps of Engineers. Washington, DC.
88. Varol, M. (2011). Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. *Journal of Hazardous Materials*, 195, 355–364.
89. Vaufleury, A. G. & Pihan, F. (2002). Methods for toxicity assessment of contaminated soil by oral or dermal uptake in land snails: Metal bioavailability and bioaccumulation. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(4), 820–827.
90. Wang, L. K., Chen, J. P., Hung, Y. & Shammas, N. K. (2009). *Heavy Metals in the Environment*. USA. CRC Press.
91. West, T. S. & Nürnberg, H. W. (1988). *The Determination of Trace Metals in Natural Waters*. Great Britain. International Union of Pure and Applied Chemistry.
92. Zahra, A., Hashmi, M. Z., Malik, R. N., & Ahmed, Z. (2014). Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah-Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan. *Science of the Total Environment*, 470–471, 925–933.

93. Zhao, S., Feng, C., Wang, D., Liu, Y., & Shen, Z. (2013). Salinity increases the mobility of Cd, Cu, Mn, and Pb in the sediments of Yangtze Estuary: Relative role of sediments' properties and metal speciation. *Chemosphere*, 91(7), 977–984.
94. Zekarias, M. T. & Rao, G. N. (2012). Speciation studies of some toxic metal complexes of glycylglycine in propylene glycol-water mixtures. *S. Afr. J. Chem*, 65, 258-264.
95. Zimmerman, A. J. & Weindorf, D. C. (2010). Heavy metals and trace analysis in soil by sequential extraction: a review of procedures. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2010, 1-7.

11. ANEXOS

No deben preocuparnos las arrugas del rostro sino las del cerebro. Estas no las refleja el espejo, pero las perciben nuestros amigos, discípulos y lectores.

— Santiago Ramón - Cajal —



ANEXO A. Metal Total

Tabla A1. Concentración Total del Metal en los 24 puntos muestreados, por temporada.

Sitio	Sustrato ^[a]	Pb [mg kg ⁻¹]		Cr [mg kg ⁻¹]		Zn [mg kg ⁻¹]	
		Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias
S1*	Su	527.2	164.8	12.4	4.6	2277.8	1022.2
	Se	1892.8	4273.3	29.1	24.6	8458.7	21799.2
S2*	Su	441.6	207.4	7.3	2.5	850.9	748.4
	Se	876.1	958.0	23.4	14.2	3567.9	4043.4
S3	Su	591.3	122.9	7.7	6.2	1063.5	464.2
	Se	246.7	705.4	11.0	15.6	741.0	2900.2
S4*	Su	244.9	106.9	3.6	1.2	292.2	167.8
	Se	381.5	39.3	7.4	26.1	371.2	74.5
S5	Su	21.8	20.7	14.9	15.3	248.3	107.1
	Se	18.4	17.4	14.3	10.9	729.3	114.4
S6*	Su	23.0	18.7	7.0	6.7	80.5	92.8
	Se	16.3	45.1	7.2	8.0	130.7	139.6
S7	Su	15.9	25.3	1.8	12.1	85.8	103.9
	Se	27.3	20.8	11.8	8.3	106.4	91.7
S8	Su	20.1	18.3	4.4	6.4	71.4	81.1
	Se	14.5	12.8	4.2	3.6	65.9	58.1
S9	Su	19.6	28.4	4.8	8.3	81.9	99.3
	Se	8.8	1.2	22.3	15.2	131.0	112.9
S10	Su	15.8	18.0	6.8	9.6	66.1	78.2
	Se	21.8	9.0	8.7	13.6	127.5	242.5
S11	Su	21.4	15.5	5.6	8.3	66.8	83.6
	Se	15.4	11.0	9.3	12.5	117.2	203.9
S12*	Su	21.4	16.9	2.5	5.9	41.6	84.7
	Se	26.9	45.8	9.1	63.0	123.8	519.4
S13	Su	18.8	2.6	7.1	4.6	132.0	78.3
	Se	24.4	16.3	19.9	10.7	239.8	115.4
S14	Su	13.6	14.7	6.9	4.9	82.7	51.9
	Se	19.4	19.7	14.1	15.8	356.5	134.3
S15*	Su	37.4	15.7	53.1	9.4	238.1	93.3
	Se	50.5	37.7	87.3	83.8	489.4	360.1
S16	Su	20.0	13.3	42.3	4.6	308.9	89.5
	Se	14.1	32.2	175.5	241.5	212.4	638.4
S17	Su	19.4	25.9	33.6	14.6	159.1	172.5
	Se	17.4	39.1	57.8	183.3	291.0	1589.7
S18	Su	16.8	16.6	6.4	7.7	79.2	136.8
	Se	13.4	18.1	7.6	8.9	123.4	127.2
S19	Su	18.6	23.5	35.3	5.8	139.8	118.5
	Se	14.1	16.4	26.8	10.2	193.2	119.6
S20	Su	16.6	9.9	6.4	6.2	77.5	115.7
	Se	18.8	63.2	12.3	12.0	149.0	223.4
S21	Su	13.5	11.4	6.4	5.0	69.9	91.7
	Se	32.0	26.6	9.2	21.9	210.3	232.3
S22*	Su	70.2	65.4	28.1	19.6	347.8	249.8
	Se	64.6	221.6	23.2	29.5	310.2	856.3
S23	Su	53.8	50.9	35.6	38.7	332.7	402.7
	Se	47.2	56.4	31.2	25.2	285.2	346.5
S24*	Su	40.5	22.1	2.8	1.5	63.6	103.9
	Se	37.1	42.2	4.2	7.1	90.1	112.8

*Sitio seleccionado para análisis y pruebas subsecuentes.

[a] Su: Suelo, Se: Sedimento

Escala de Colores (Creación Propia) tomando como referencia los límites canadienses (CCME, 2002; CCME, 2006).

Pb _{suelo}	> 600 mg kg ⁻¹ (Industrial)	> 260 mg kg ⁻¹ (Comercial)	> 140 mg kg ⁻¹ (Residencial)
	> 70 mg kg ⁻¹ (Agrícola)		
Cr _{suelo}	> 87 mg kg ⁻¹ (Industrial y Comercial)	> 64 mg kg ⁻¹ (Residencial y Agrícola)	
Zn _{suelo}	> 360 mg kg ⁻¹ (Industrial y Comercial)	> 200 mg kg ⁻¹ (Residencial y Agrícola)	
Pb _{sedimento}	> 91.3 mg kg ⁻¹ (PEL)	> 35.0 mg kg ⁻¹ (TEL)	
Cr _{sedimento}	> 90.0 mg kg ⁻¹ (PEL)	> 37.3 mg kg ⁻¹ (TEL)	
Zn _{sedimento}	> 315.0 mg kg ⁻¹ (PEL)	> 123.0 mg kg ⁻¹ (TEL)	

ANEXO B. Especiación Química

Las siguientes tablas muestran las concentraciones de los metales obtenidas para cada fracción, de acuerdo a la metodología modificada de Tessier aplicada a los ocho puntos seleccionados.

Tabla B1. Concentraciones de Pb en las Fracciones en Suelo en Temporada de Estiaje

Sitio	Fracción [mg kg ⁻¹]				
	F1	F2	F3	F4	F5
S1	9.85	37.85	143.88	174.15	180.05
S2	9.91	39.25	152.16	146.03	149.64
S4	9.65	39.42	53.62	68.58	80.26
S6	10.13	3.56	10.21	4.37	5.31
S12	9.62	10.70	12.29	4.44	7.01
S15	10.48	4.20	14.52	15.91	17.24
S22	10.05	6.98	21.88	31.21	26.60
S24	11.01	4.37	20.09	13.25	14.16

Fracciones: F1 = Intercambiable; F2 = Unida a Carbonatos; F3 = Unida a Óxidos de Fe/Mn; F4 = Unida a Materia Orgánica; F5 = Residual. (n=3)

Tabla B2. Concentraciones de Pb en las Fracciones en Suelo en Temporada de Lluvias

Sitio	Fracción [mg kg ⁻¹]				
	F1	F2	F3	F4	F5
S1	10.25	30.01	81.06	30.99	53.96
S2	10.40	21.78	65.59	53.82	59.07
S4	10.35	37.10	34.61	28.10	32.39
S6	10.41	3.55	10.47	4.77	7.82
S12	10.56	10.89	13.01	6.40	10.23
S15	10.41	5.83	12.16	7.10	9.52
S22	9.86	8.48	24.32	17.47	20.59
S24	9.68	6.39	15.21	13.41	9.76

Fracciones: F1 = Intercambiable; F2 = Unida a Carbonatos; F3 = Unida a Óxidos de Fe/Mn; F4 = Unida a Materia Orgánica; F5 = Residual. (n=3)

Tabla B3. Concentraciones de Pb en las Fracciones en Sedimento en Temporada de Estiaje

Sitio	Fracción [mg kg ⁻¹]				
	F1	F2	F3	F4	F5
S1	11.66	257.25	607.30	32.79	377.69
S2	10.56	151.92	323.34	86.52	162.41
S4	10.50	99.27	118.21	73.12	77.49
S6	12.15	6.12	13.21	6.34	8.78
S12	12.55	12.38	15.21	10.49	15.29
S15	11.99	7.37	16.87	24.31	24.41
S22	11.83	11.11	21.75	33.33	25.91
S24	12.28	6.36	10.99	7.48	8.85

Fracciones: F1 = Intercambiable; F2 = Unida a Carbonatos; F3 = Unidad a Óxidos de Fe/Mn; F4 = Unida a Materia Orgánica; F5 = Residual. (n=3)

Tabla B4. Concentraciones de Pb en las Fracciones en Sedimento en Temporada de Lluvias

Sitio	Fracción [mg kg ⁻¹]				
	F1	F2	F3	F4	F5
S1	48.54	1286.74	278.01	25.13	756.79
S2	13.86	207.81	338.20	148.82	335.17
S4	11.76	10.48	16.46	21.54	20.23
S6	12.27	8.30	19.47	17.97	22.85
S12	12.34	12.81	15.80	34.33	27.29
S15	12.81	9.05	16.13	27.67	24.53
S22	13.00	26.33	57.51	116.63	67.26
S24	11.60	9.71	18.75	21.52	13.67

Fracciones: F1 = Intercambiable; F2 = Unida a Carbonatos; F3 = Unidad a Óxidos de Fe/Mn; F4 = Unida a Materia Orgánica; F5 = Residual. (n=3)

Tabla B5. Concentraciones de Cr en las Fracciones en Suelo en Temporada de Estiaje

Sitio	Fracción [mg kg ⁻¹]				
	F1	F2	F3	F4	F5
S1	0.00	0.00	0.00	0.58	6.02
S2	0.04	0.00	0.00	0.28	2.31
S4	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
S6	0.07	0.00	0.00	0.00	1.25
S12	0.03	0.03	0.00	0.00	1.19
S15	0.03	0.20	10.53	34.13	11.37
S22	0.01	0.22	2.33	14.55	8.86
S24	0.07	0.00	0.00	0.00	2.11

Fracciones: F1 = Intercambiable; F2 = Unida a Carbonatos; F3 = Unidad a Óxidos de Fe/Mn; F4 = Unida a Materia Orgánica; F5 = Residual. (n=3)

Tabla B6. Concentraciones de Cr en las Fracciones en Suelo en Temporada de Lluvias

Sitio	Fracción [mg kg ⁻¹]				
	F1	F2	F3	F4	F5
S1	0.03	0.54	0.00	0.00	3.86
S2	0.07	0.06	0.00	0.00	1.63
S4	0.07	0.15	0.00	0.00	1.59
S6	0.08	0.00	0.00	0.00	1.23
S12	0.02	0.00	0.00	0.00	2.11
S15	0.00	0.19	0.00	0.55	2.97
S22	0.00	0.14	0.65	12.26	5.08
S24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59

Fracciones: F1 = Intercambiable; F2 = Unida a Carbonatos; F3 = Unidad a Óxidos de Fe/Mn; F4 = Unida a Materia Orgánica; F5 = Residual. (n=3)

Tabla B7. Concentraciones de Cr en las Fracciones en Sedimento en Temporada de Estiaje

Sitio	Fracción [mg kg ⁻¹]				
	F1	F2	F3	F4	F5
S1	0.18	0.48	0.42	0.00	5.96
S2	0.08	0.37	0.29	0.00	5.73
S4	0.14	0.10	0.00	0.00	2.06
S6	0.11	0.15	0.00	0.00	2.32
S12	0.13	0.07	0.00	4.60	4.01
S15	0.07	0.63	43.45	46.96	13.15
S22	0.00	0.34	0.85	12.46	6.40
S24	0.01	0.08	0.00	2.75	1.22

Fracciones: F1 = Intercambiable; F2 = Unida a Carbonatos; F3 = Unidad a Óxidos de Fe/Mn; F4 = Unida a Materia Orgánica; F5 = Residual. (n=3)

Tabla B8. Concentraciones de Cr en las Fracciones en Sedimento en Temporada de Lluvias

Sitio	Fracción [mg kg ⁻¹]				
	F1	F2	F3	F4	F5
S1	0.21	1.08	6.02	1.44	15.53
S2	0.22	0.51	0.00	0.46	7.88
S4	0.09	0.34	0.00	15.19	7.73
S6	0.06	0.07	0.00	0.77	6.11
S12	0.13	0.07	14.60	41.67	12.55
S15	0.07	0.81	35.31	39.71	13.76
S22	0.00	0.45	1.37	15.51	8.54
S24	0.00	0.35	0.45	3.92	2.00

Fracciones: F1 = Intercambiable; F2 = Unida a Carbonatos; F3 = Unidad a Óxidos de Fe/Mn; F4 = Unida a Materia Orgánica; F5 = Residual. (n=3)

Tabla B9. Concentraciones de Zn en las Fracciones en Suelo en Temporada de Estiaje

Sitio	Fracción [mg kg ⁻¹]				
	F1	F2	F3	F4	F5
S1	48.38	250.24	761.92	593.96	763.32
S2	2.63	87.76	279.07	219.82	280.50
S4	0.75	15.07	59.91	34.32	148.27
S6	0.26	1.64	3.50	1.54	40.26
S12	0.41	3.49	3.72	1.08	29.58
S15	34.20	16.49	63.39	20.91	56.33
S22	7.29	67.92	132.95	37.69	116.66
S24	2.08	1.62	5.62	1.73	58.86

Fracciones: F1 = Intercambiable; F2 = Unida a Carbonatos; F3 = Unidad a Óxidos de Fe/Mn; F4 = Unida a Materia Orgánica; F5 = Residual. (n=3)

Tabla B10. Concentraciones de Zn en las Fracciones en Suelo en Temporada de Lluvias

Sitio	Fracción [mg kg ⁻¹]				
	F1	F2	F3	F4	F5
S1	0.62	29.73	62.79	41.35	551.88
S2	1.83	64.65	210.05	85.33	272.73
S4	0.59	8.00	37.99	12.47	112.77
S6	0.33	2.58	3.52	0.99	42.38
S12	1.63	0.50	9.35	1.70	44.10
S15	0.47	7.04	10.92	1.63	47.89
S22	3.65	46.91	81.80	21.36	77.93
S24	8.37	6.84	21.24	6.11	30.19

Fracciones: F1 = Intercambiable; F2 = Unida a Carbonatos; F3 = Unidad a Óxidos de Fe/Mn; F4 = Unida a Materia Orgánica; F5 = Residual. (n=3)

Tabla B11. Concentraciones de Zn en las Fracciones en Sedimento en Temporada de Estiaje

Sitio	Fracción [mg kg ⁻¹]				
	F1	F2	F3	F4	F5
S1	6.82	392.38	2187.06	1158.70	1342.35
S2	14.58	307.07	971.51	565.08	707.43
S4	1.06	17.68	66.39	47.15	181.33
S6	0.42	3.56	5.73	1.23	48.01
S12	3.29	85.38	9.35	7.66	62.34
S15	8.27	133.68	179.53	41.50	64.88
S22	4.20	78.70	101.33	30.00	71.80
S24	1.49	15.30	18.71	6.61	32.26

Fracciones: F1 = Intercambiable; F2 = Unida a Carbonatos; F3 = Unidad a Óxidos de Fe/Mn; F4 = Unida a Materia Orgánica; F5 = Residual. (n=3)

Tabla B12. Concentraciones de Zn en las Fracciones en Sedimento en Temporada de Lluvias

Sitio	Fracción [mg kg ⁻¹]				
	F1	F2	F3	F4	F5
S1	102.61	1882.89	4823.66	10843.60	3732.53
S2	6.87	408.67	992.85	1308.79	1130.25
S4	0.41	2.57	12.31	6.38	43.04
S6	1.69	3.99	9.07	3.02	76.27
S12	8.00	646.84	259.48	136.07	66.43
S15	6.47	163.76	142.27	50.94	60.92
S22	26.74	131.48	248.58	87.57	244.98
S24	1.60	15.23	35.64	21.43	39.84

Fracciones: F1 = Intercambiable; F2 = Unida a Carbonatos; F3 = Unidad a Óxidos de Fe/Mn; F4 = Unida a Materia Orgánica; F5 = Residual. (n=3)

ANEXO C. Potenciales de Lixiviación

Las siguientes tablas muestran las concentraciones obtenidas en la prueba de Lixiviación.

Tabla C1. Concentraciones de Pb obtenidas para la Prueba de Lixiviación.

Sitio	Suelo [mg kg^{-1}]		Sedimento [mg kg^{-1}]	
	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias
S1	3.87	0.44	5.55	20.24
S2	1.24	0.49	1.80	15.18
S4	1.18	0.62	17.12	0.07
S6	0.46	0.50	0.60	0.07
S12	0.92	0.83	0.80	0.21
S15	2.18	0.44	0.29	0.10
S22	0.95	0.73	0.48	1.05
S24	1.67	0.28	0.78	0.14

Tabla C2. Concentraciones de Zn obtenidas para la Prueba de Lixiviación.

Sitio	Suelo [mg kg^{-1}]		Sedimento [mg kg^{-1}]	
	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias
S1	118.09	0.91	18.12	52.14
S2	11.93	5.97	27.77	33.69
S4	2.85	1.00	4.90	0.06
S6	0.57	0.55	0.54	0.30
S12	1.13	1.21	16.03	22.14
S15	35.95	4.89	22.75	20.50
S22	20.70	7.71	12.37	36.71
S24	2.11	4.40	5.89	1.00

Nota: Recordar que el Cromo no Lixivio, por ese motivo no hay tabla.

ANEXO D. Propiedades Fisicoquímicas de Suelo y Sedimento

Tabla D1. Propiedades Fisicoquímicas de los Suelos y Sedimentos

Site	pH	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Eh (mV)	MO (%)	CIC (C mol (+) kg^{-1})	CO_3^{2-} [a] (mg / 100 g)
a. Suelo Estiaje						
S1	7.63	430.3	320.8	1.29	189.14	97.8
S2	7.81	501.3	316.4	2.59	133.62	103.9
S4	7.76	754.7	306.5	2.59	205.92	158.5
S6	8.47	248.9	305.4	0.89	183.63	97.6
S12	7.54	271.2	106.5	2.07	244.94	67.0
S15	5.38	412.7	173.3	3.12	255.72	48.9
S22	7.05	954.3	432.6	6.78	216.32	73.2
S24	6.48	123.2	437.9	5.14	278.22	97.6
b. Suelo Lluvias						
S1	7.80	589.7	338.2	11.48	16.69	85.6
S2	7.81	363.7	335.2	2.87	16.71	109.8
S4	7.76	440.7	328.3	7.18	22.30	148.5
S6	7.54	161.0	309.2	1.36	44.56	85.6
S12	6.17	122.6	484.5	0.78	389.78	79.0
S15	7.52	379.7	435.8	2.85	105.71	116.1
S22	7.02	598.0	414.4	5.72	77.94	85.2
S24	5.66	475.0	423.8	3.94	111.23	73.1
Valor p ^[b] (Bilateral)	0.817	0.550	0.091	0.323	0.036	0.747
c. Sedimento Estiaje						
S1	7.96	598.3	316.7	1.94	27.90	79.4
S2	7.84	792.7	237.4	3.89	116.34	122.1
S4	7.91	361.0	281.3	2.32	360.45	103.8
S6	8.09	206.6	188.4	0.13	111.35	97.6
S12	7.17	455.3	380.9	5.01	492.96	116.0
S15	7.00	1045.3	185.4	8.35	206.24	99.6
S22	7.11	887.7	248.1	5.54	306.33	91.6
S24	6.74	842.3	168.8	5.26	55.69	85.4
d. Sedimento Lluvias						
S1	7.36	2115.0	301.0	4.90	27.74	122.0
S2	7.77	416.3	303.1	1.81	11.09	97.6
S4	8.22	271.6	282.7	2.94	94.24	162.5
S6	7.19	125.0	371.5	2.43	16.73	122.1
S12	7.24	977.0	310.6	11.91	27.90	97.6
S15	6.97	1025.7	140.9	5.55	11.10	73.2
S22	6.73	589.7	303.1	6.94	63.15	67.1
S24	7.00	754.7	215.1	18.72	178.40	122.2
Valor p ^[b] (Bilateral)	0.516	0.587	0.453	0.231	0.032	0.487

n=3; DER < 2.2 % (pH), DER < 4.9 % (CE), DER < 8.2 % (Eh), DER < 14.9 % (MO),
DER < 22.1 % (CIC), DER < 19.8 % (CO_3^{2-}).

[a] Bicarbonatos fue la especie detectada.

[b] Diferencia estadísticamente significativa entre temporada de estiaje y lluvias.

ANEXO E. Valores de Fondo y Concentraciones de Aluminio**Tabla E1.** Valores de Fondo (McLennan, 2001)

Elemento	Unidades	Crust
Al	%	8.04
Cr	mg kg ⁻¹	83
Pb	mg kg ⁻¹	17
Zn	mg kg ⁻¹	71

Tabla E2. Concentración Total de Al (%)

Sitio	Suelo		Sedimento	
	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvia
S1	3.0	1.6	4.7	2.9
S2	2.4	2.0	3.3	2.8
S4	1.7	0.9	3.9	1.8
S6	3.2	4.3	3.1	6.5
S12	1.3	2.5	1.7	1.9
S15	1.4	2.1	1.7	1.5
S22	2.1	2.2	1.6	2.8
S24	3.2	1.5	2.4	2.5

ANEXO F. Cuento de Organismos Muertos de la Prueba de Toxicidad Aguda

Tabla F1. Cuento de Organismos Muertos de *Alona guttata* en la Prueba de Toxicidad Aguda Discriminatoria en Suelo y Sedimento.

Muestra	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 1	Replica 2	Replica 3
Suelo Estiaje			Suelo Lluvias			
S1	4	5	5	S1	0	1
S2	0	0	0	S2	0	0
S4	0	0	0	S4	0	0
S6	0	0	0	S6	0	1
S12	0	0	0	S12	0	0
S15	4	4	4	S15	1	1
S22	5	6	4	S22	1	0
S24	0	0	0	S24	0	0
Sedimento Estiaje			Sedimento Lluvias			
S1	1	1	0	S1	6	7
S2	0	1	1	S2	2	0
S4	0	0	1	S4	0	0
S6	2	1	1	S6	1	1
S12	0	0	0	S12	2	4
S15	3	5	4	S15	1	1
S22	0	0	1	S22	7	5
S24	1	0	0	S24	4	2

Tabla F2. Cuento de Organismos Muertos de *Lecane quadridentata* en la Prueba de Toxicidad Aguda Discriminatoria en Suelo y Sedimento.

Muestra	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 1	Replica 2	Replica 3
Suelo Estiaje			Suelo Lluvias			
S1	8	7	7	S1	8	7
S2	4	6	6	S2	8	7
S4	6	7	6	S4	8	6
S6	4	5	5	S6	7	5
S12	5	4	3	S12	8	7
S15	10	9	8	S15	7	7
S22	9	10	9	S22	10	9
S24	8	6	9	S24	9	10
Sedimento Estiaje			Sedimento Lluvias			
S1	7	8	9	S1	9	7
S2	7	7	6	S2	7	7
S4	8	9	9	S4	8	7
S6	5	6	6	S6	6	7
S12	6	8	9	S12	8	7
S15	9	9	8	S15	8	7
S22	7	8	8	S22	7	9
S24	7	7	8	S24	9	9

Tabla F3. Conteo de Organismos Muertos de *Alona guttata* usados para calcular la CL₅₀ y las UTa.

Muestra	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Muestra	Rep 1	Rep 2	Rep 3
S1_Su_Es				S1_Se_Llu			
100%	4	5	5	*100%	6	7	8
75%	1	0	1	*75%	8	6	7
50%	0	1	0	*50%	8	9	9
*25%	0	0	0	*25%	8	7	8
*12.5%	0	0	0	12.5%	8	7	8
				6.25%	7	7	6
				3.125%	5	6	6
				1.56%	4	4	4
				0.78%	3	2	2
S15_Su_Es				S12_Se_Llu			
100%	4	4	4	100%	2	4	2
75%	0	0	0	75%	6	7	7
50%	0	1	0	50%	3	4	3
*25%	0	0	0	25%	1	1	1
*12.5%	0	0	0	12.5%	0	0	0
S22_Su_Es				S22_Se_Llu			
100%	5	6	4	100%	7	5	6
75%	4	4	3	75%	8	8	8
50%	3	2	1	50%	5	5	4
25%	0	0	1	25%	2	3	3
*12.5%	0	0	1	12.5%	3	0	1
S15_Se_Es				S24_Se_Llu			
*100%	3	5	4	*100%	4	2	2
*75%	10	10	9	*75%	10	9	9
50%	10	10	9	50%	8	10	9
25%	8	7	9	25%	7	7	7
12.5%	5	4	2	12.5%	3	2	4
6.25%	2	2	2	6.25%	1	1	0
3.125%	0	0	0	3.125%	1	0	0

Su: Suelo; Se: Sedimento; Es: Estiaje; Llu: Lluvias

* Dato no considerado para el cálculo de la CL₅₀ y las UTa

Tabla F4. Conteo de Organismos Muertos de *Lecane quadridentata* usados para calcular la CL₅₀ y las Uta, durante Suelo – Estiaje.

Muestra	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Muestra	Rep 1	Rep 2	Rep 3
S1				S12			
*100%	8	7	7	*100%	5	4	3
80%	7	8	9	60%	6	7	7
60%	6	7	6	40%	7	5	6
40%	7	6	5	20%	5	4	5
20%	6	6	5	10%	4	3	4
10%	5	6	5				
S2				S15			
*100%	4	6	6	100%	10	9	8
60%	6	7	7	80%	7	7	8
40%	6	7	6	60%	6	6	6
20%	5	6	6	40%	6	5	5
10%	5	6	5	20%	5	5	5
				10%	5	4	4
S4				S22			
*100%	6	7	6	100%	9	10	9
60%	6	7	8	80%	10	8	7
40%	8	6	6	60%	8	7	6
20%	6	5	6	40%	7	6	7
10%	5	5	5	20%	6	6	7
				10%	6	6	5
S6				S24			
*100%	4	5	5	100%	8	6	9
60%	7	6	7	60%	6	7	7
40%	7	6	5	40%	6	6	6
20%	6	6	5	20%	5	6	5
10%	5	5	4	10%	4	5	4

* Dato no considerado para el cálculo de la CL₅₀ y las Uta

Tabla F5. Conteo de Organismos Muertos de *Lecane quadridentata* usados para calcular la CL₅₀ y las Uta, durante Suelo – Lluvias.

Muestra	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Muestra	Rep 1	Rep 2	Rep 3
S1				S12			
100%	8	7	8	100%	8	7	8
60%	6	7	7	60%	6	7	7
40%	6	5	6	40%	6	6	6
20%	5	6	5	20%	5	5	5
10%	5	5	4	10%	5	3	4
S2				S15			
*100%	8	7	7	*100%	7	7	6
60%	8	7	7	60%	6	8	7
40%	7	6	6	40%	7	6	6
20%	6	6	6	20%	6	6	5
10%	6	6	5	10%	6	5	5
S4				S22			
100%	8	6	8	100%	10	9	8
60%	7	7	7	60%	8	7	7
40%	7	6	7	40%	7	8	5
20%	7	6	6	20%	5	6	6
10%	5	6	5	10%	6	5	5
S6				S24			
*100%	7	5	7	100%	9	10	10
60%	8	7	7	60%	7	8	7
40%	7	6	6	40%	5	6	7
20%	6	6	5	20%	5	6	6
10%	6	4	4	10%	5	5	5

* Dato no considerado para el cálculo de la CL₅₀ y las Uta

Tabla F6. Conteo de Organismos Muertos de *Lecane quadridentata* usados para calcular la CL_{50} y las Uta, durante Sedimento – Estiaje.

Muestra	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Muestra	Rep 1	Rep 2	Rep 3
S1				S12			
100%	7	8	9	100%	6	8	9
60%	7	7	8	60%	7	6	6
40%	8	6	6	40%	5	6	5
20%	5	6	7	20%	5	4	4
10%	7	6	4	10%	5	4	3
S2				S15			
*100%	7	7	6	100%	9	9	8
60%	7	8	7	80%	8	7	6
40%	8	6	6	60%	7	5	6
20%	6	6	6	40%	6	6	5
10%	6	5	5	20%	6	5	5
				10%	5	5	3
S4				S22			
100%	8	9	9	100%	7	8	8
60%	6	7	7	60%	8	6	7
40%	6	6	6	40%	7	6	6
20%	6	5	6	20%	5	7	6
10%	6	5	5	10%	6	6	5
S6				S24			
*100%	5	6	6	100%	7	7	8
60%	7	7	6	60%	8	7	6
40%	7	6	6	40%	5	5	6
20%	5	4	5	20%	4	6	5
10%	5	3	4	10%	5	5	4

* Dato no considerado para el cálculo de la CL_{50} y las Uta

Tabla F7. Conteo de Organismos Muertos de *Lecane quadridentata* usados para calcular la CL_{50} y las Uta, durante Sedimento – Lluvias.

Muestra	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Muestra	Rep 1	Rep 2	Rep 3
S1				S12			
100%	9	7	10	100%	8	7	8
80%	9	7	9	80%	9	7	6
60%	8	7	7	60%	8	6	7
40%	8	6	7	40%	7	6	7
20%	7	6	6	20%	6	6	7
10%	6	6	6	10%	5	5	6
5%	6	5	5	5%	5	5	5
S2				S15			
100%	7	7	6	100%	8	7	9
60%	4	5	5	60%	6	6	7
40%	5	3	4	40%	6	6	6
20%	5	3	3	20%	5	6	5
10%	3	2	2	10%	5	4	5
S4				S22			
100%	8	7	8	100%	7	9	8
60%	6	5	5	80%	9	8	7
40%	5	5	5	60%	8	7	6
20%	5	5	4	40%	7	6	6
10%	3	4	3	20%	6	5	6
				10%	5	4	3
S6				S24			
100%	6	7	8	100%	9	9	6
60%	6	6	6	80%	8	7	8
40%	5	6	5	60%	8	7	6
20%	5	4	4	40%	8	6	6
10%	4	4	4	20%	6	5	6
				10%	5	5	5

Los científicos que integran la profesión científica deben tener el hábito de la verdad. La honradez para consigo mismos, los colegas y la sociedad a la que sirven es esencial para el florecimiento de la ciencia.

— Fragmento libro: *Filosofía de la Química* —