



---

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**CENTRO MEXICANO PARA LA PRODUCCIÓN MÁS**  
**LIMPIA**

**“IMPACTO ECOTOXICOLÓGICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE  
ELEMENTOS MAYORES Y TRAZA EN SUELO, SEDIMENTO Y  
MATERIAL VEGETAL EN TAXCO, MÉXICO.”**

Tesis que presenta:

**I.A. Andrés Felipe Zúñiga Cabezas**

Para obtener el grado de:

**Maestría en Ingeniería en Producción Más Limpia**

Directoras:

**Dra. Sandra Soledad Morales García, CMPL**

**Dra. Fabiola Sagrario Sosa Rodríguez, UAM-Azcapotzalco**

Ciudad de México

---



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de  siendo las  horas del día  del mes de  del  se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de:  para examinar la tesis titulada:

"Impacto Ecotoxicológico De La Distribución De Elementos Mayores Y Traza En Suelo, Sedimento Y Material Vegetal En Taxco, México."

del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Zúñiga	Apellido Materno:	Cabezas	Nombre (s):	Andrés Felipe
-------------------	--------	-------------------	---------	-------------	---------------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 3 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI**  **NO**  **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

#### **JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:**

Se utilizó el software Turnitin, filtrando coincidencias menores a 15 palabras, bibliografía, citas textuales y conceptos comunes como nombres propios y denominaciones de instituciones, métodos, normas, etc.

**\*\*Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR**  **SUSPENDER**  **NO APROBAR**  la tesis por **UNANIMIDAD**  o **MAYORÍA**  en virtud de los motivos siguientes:

El tesis evaluada cumple con los requisitos establecidos en los artículos 33 y 34 del Reglamento de Estudios de Posgrado del IPN; y representa una investigación original que aporta información relevante sobre el grado de impacto hacia el medio ambiente y biota por la exposición a metales altamente tóxicos en un región de explotación minera.

#### COMISIÓN REVISORA DE TESIS

  
\_\_\_\_\_  
Directora de Tesis  
Dra. Sandra Soledad Morales García

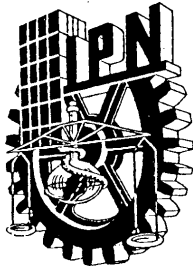
  
\_\_\_\_\_  
Dr. Abelardo Irineo Flores Vela

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Sujitha Suresh Babu

  
\_\_\_\_\_  
2ª. Directora de Tesis  
Dra. Fabiola Sagrario Sosa Rodríguez

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Pedro Francisco Rodríguez Espinosa

  
\_\_\_\_\_  
  
Dr. Abelardo Irineo Flores Vela  
**PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES**



**INSTITUTO POLITÉCNICO  
NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHO**

En la Ciudad de México el día 06 del mes de julio del año 2021, la que suscribe Andrés Felipe Zúñiga Cabezas alumno del Programa de Posgrado: Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia con número de registro A180898, adscrito al Centro Mexicano para la Producción más Limpia, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dra. Sandra Soledad Morales García y del Dra. Fabiola Sagrario Sosa Rodríguez y cede los derechos del trabajo titulado Impacto Ecotoxicológico De La Distribución De Elementos Mayores Y Traza En Suelo, Sedimento Y Material Vegetal En Taxco, México, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones afzunigac@gmail.com; smorales@ipn.mx; fssosa@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

\_\_\_\_\_  
Andrés Felipe Zúñiga Cabezas



## AGRADECIMIENTOS

Al *Instituto Politécnico Nacional* por ser la institución que me dio la oportunidad y las herramientas para desarrollar mi formación académica y profesional en la realización de mis estudios de Maestría, en Centro Mexicano de Producción más Limpia.

A la *Dra. Sandra Soledad Morales García*, co-directora de este trabajo, por su inigualable apoyo y dedicación en la realización de este trabajo de tesis, así como por su disposición a ayudarme a lo largo de estos años en todos los aspectos para mi beneficio.

A la *Dra. Fabiola Sagrario Sosa Rodríguez*, co-directora de este trabajo, por su orientación precisa y acertada en la realización de este trabajo de tesis, así como por la confianza para permitirme participar del mismo.

A la *Dra. Sujitha Suresh Babu*, *Dr. Pedro Francisco Rodríguez Espinosa* y *Dr. Abelardo Flores Vela* por sus valiosas sugerencias comentarios durante del desarrollo de mi trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), al programa Institucional de Becas de Posgrado del IPN, así como a la Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI), por el apoyo económico recibido durante la maestría.

A mis profesores por compartirme sus conocimientos y experiencias enriqueciendo mi desarrollo académico y personal.

A mis compañeros de maestría, en el CMP+L por su compañía, apoyo y amistad, dentro y fuera del campo académico.

Y a todas aquellas personas que directa o indirectamente contribuyeron al logro del presente trabajo.



## DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo incondicional a lo largo de mi carrera académica, profesional y a lo largo de mi vida.

A mis padres *Claudia Cabezas Lizarazo y Henry Zúñiga Díaz*, por estar siempre a mi lado, incluso en la distancia, apoyándome y dándome su consejo, cariño y amor incondicional, que me ayudo a superar todas y cada una de las adversidades. Por la paciencia, la tenacidad, el esfuerzo y el tiempo invertido en mi bienestar y el apoyo y fe incondicional en mí y mis capacidades. Siempre serán mi motor para seguir adelante y aunque no me alcanzara la vida para agradecerles por todo, en cada segundo de la misma me esforzare en hacerlos sentir orgullosos.

A mi hermano, *Diego Alejandro Zúñiga*, por ser mi primer maestro, al enseñarme lo buena que puede ser la vida y por compartir conmigo anécdotas, gustos, aventuras y cicatrices como el mejor amigo que me pudo haber regalado la vida

A mis amigos Camilo Ortiz y Miguel Fernando Altamirano, por ser apoyo incondicional y oídos pacientes; y ayudarme a sortear las tristezas y compartir mis alegrías en cada paso de este proceso. Sin ustedes, sin miedo a exagerar, no habría sobrevivido la experiencia.

A mi tía Janeth y mi primo Fernando por su apoyo absoluto en mi desarrollo académico y profesional por el cual les estaré eternamente agradecido.

A todos mis tíos, tías, primos y primas, por siempre recordarme que tengo toda una familia que me espera con brazos abiertos en Colombia y por poner cada uno, un pedacito de lo que soy hoy.

A mis amigos en Colombia, del Conservatorio de Ibagué y de la Universidad Distrital Francisco J. de Caldas, en especial Sebastián, Erika y Allison, por estar siempre a la distancia de una llamada y sin pedir nada a cambio, sacarme una sonrisa.



# Contenido

Índice de Tablas.....	9
Índice de Figuras.....	11
Resumen.....	13
Abstract.....	15
Introducción.....	17
Justificación.....	18
Hipótesis.....	19
Objetivos.....	20
Objetivo general.....	20
Objetivos específicos.....	20
Capítulo 1. Antecedentes.....	21
1.1 Elementos mayores y traza.....	22
1.2 Metales pesados.....	23
1.3 Toxicología.....	26
1.4 Técnicas de laboratorio para extracción (digestión) y cuantificación de metales.....	27
1.4.1 Digestión ácida-Descomposición por Agua Regia.....	28
1.4.2. Espectroscopia de emisión óptica acoplada inductivamente (ICP-OES).....	29
2.1 Minería.....	29
2.2 Desechos Mineros.....	30
2.3. Drenaje ácido de mina (DAM).....	31
2.4. Contaminación por actividades mineras en la zona de Taxco.....	32
2.5. Remediación.....	35
2.6 Remediación en la zona minera de Taxco.....	36
3.1 Estado del arte.....	37



<b>4.1. Estándares de Calidad Ambiental del Suelo</b> .....	39
<b>5.1 Índices de contaminación e impacto ecotoxicológico</b> .....	42
<b>5.2 Método de evaluación de riesgos para la salud humana</b> .....	43
<b>5.2.1 Riesgo no Cancerígeno</b> .....	44
<b>5.2.2 Caracterización del riesgo cancerígeno</b> .....	44
<b>6.1 Geo-Estadística</b> .....	45
<b>Capítulo 2. Metodología</b> .....	48
<b>1.1 Área de estudio</b> .....	48
<b>1.2 Metodología</b> .....	50
<b>1.2.1 Etapa 1. Muestreo</b> .....	51
<b>1.2.2 Etapa 2. Análisis de muestras</b> .....	57
<b>1.2.3 Etapa 3. Análisis de Datos.</b> .....	59
<b>Capítulo 3. Resultados.</b> .....	72
<b>1.1 Coordenadas definitivas de puntos de muestreo</b> .....	73
<b>1.2 Resultados de concentración de elementos potencialmente tóxicos</b> .....	77
<b>1.2.1 Concentración de elementos en material vegetal</b> .....	77
<b>1.2.2 Concentración de elementos en suelo y sedimentos</b> .....	83
<b>2.1 Resultados de análisis estadístico en suelo y sedimento</b> .....	94
<b>2.1.1. Matriz de correlación para todos los elementos</b> .....	94
<b>3.1 Estimación de índices de contaminación e impacto ecotoxicológico</b> .....	97
<b>3.1.1 Material vegetal</b> .....	97
<b>3.1.2 Suelo y Sedimento</b> .....	98
<b>4.1 Mapas geo estadísticos de dispersión de elementos de alto impacto eco-toxicológico en la región minera de Taxco, Guerrero.</b> .....	115
<b>4.1.1 Análisis Geo-estadístico Elementos traza en Suelos y Sedimentos</b> .....	115
.....	117



<b>Capítulo 4. Análisis de resultados</b> .....	120
<b>1.1 Concentración de elementos potencialmente tóxicos</b> .....	121
<b>2.1 Análisis estadístico</b> .....	132
<b>2.1.1 Coeficiente de correlación</b> .....	132
<b>3.1 Índices de contaminación</b> .....	133
<b>3.1.1 Material Vegetal.</b> .....	133
<b>3.1.2 Suelos y Sedimentos.</b> .....	135
<b>4.1 Guías de calidad del Suelo</b> .....	142
<b>5.1 Análisis geo-estadístico</b> .....	147
<b>5. Conclusiones</b> .....	149
<b>Referencias Bibliografía</b> .....	151





## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Términos utilizados a menudo para clasificar metales en estudios biológicos y ambientales .....	26
<b>Tabla 2.</b> Estudios realizados para la zona minera de Taxco.....	32
<b>Tabla 3.</b> Concentración de metales en una población de niños de Taxco, México .....	34
<b>Tabla 4.</b> Países más productivos en investigación de desechos mineros.....	37
<b>Tabla 5.</b> Estudios recientes de contaminación del suelo a nivel mundial con herramientas geo-estadísticas.....	38
<b>Tabla 6.</b> Concentraciones de referencia totales (CRt) por tipo de uso de suelo. ....	41
<b>Tabla 7.</b> Índices de contaminación por metales pesados dados en la literatura, su aplicación, fortalezas y debilidades .....	42
<b>Tabla 8.</b> Puntos de muestreo, ID Coordenadas y matriz para la zona de estudio.....	51
<b>Tabla 9.</b> Calidad del suelo según los valores del Índice de Geo-acumulación.....	61
<b>Tabla 10.</b> Calidad del suelo según los valores del Factor de enriquecimiento .....	62
<b>Tabla 11.</b> Calidad del suelo según los valores del Factor de contaminación .....	62
<b>Tabla 12.</b> Categorías de contaminación del Índice de Carga de Contaminación .....	63
<b>Tabla 13.</b> Categorías de contaminación del grado de contaminación y el grado de contaminación modificado.....	64
<b>Tabla 14.</b> Categorías de contaminación del Índice de riesgo ecológico potencial .....	65
<b>Tabla 15.</b> Localidades presentes en la Zona Norte.....	74
<b>Tabla 16.</b> Localidades presentes en la Zona Cnetral.....	74
<b>Tabla 17.</b> Localidades presentes en la Zona Sur. ....	75
<b>Tabla 18.</b> Contenidos de los elementos mayores en las muestras de Material vegetal, con su punto de muestreo y matriz. ....	77
<b>Tabla 19.</b> Contenidos de los elementos traza en las muestras de Material vegetal, separadas por su punto de muestreo y Matriz.....	80
<b>Tabla 20.</b> Contenidos de los elementos Mayores en las 57 muestras de Suelo y Sedimento en porcentaje de peso. ....	83
<b>Tabla 21.</b> Contenidos de los elementos Traza normados por la NOM-147 en las 57 muestras de Suelo y Sedimento en porcentaje de peso. ....	86
<b>Tabla 22.</b> Contenidos de los elementos Mayores no normados en la NOM-147 en las 57 muestras de Suelo y Sedimento en porcentaje de peso .....	91
<b>Tabla 23.</b> Resumen de los resultados de la matriz de correlación para los 57 puntos analizados en las muestras de suelo y sedimento, para elementos normados.....	95
<b>Tabla 24.</b> Resumen de los resultados de la matriz de correlación para los 57 puntos analizados en las muestras de suelo y sedimento, para elementos no normados.....	95
<b>Tabla 25.</b> Resumen de los resultados de la matriz de correlación para los 57 elementos analizados en las muestras de suelo y sedimento.....	96
<b>Tabla 26.</b> Resumen de los resultados de la matriz de correlación para los 57 elementos analizados en las muestras de suelo y sedimento.....	97
<b>Tabla 27.</b> Índice de translocación de elementos seleccionados en material vegetal .....	97
<b>Tabla 28.</b> Modelos definidos para los procedimientos geo-estadísticos y sus valores de Mean standardized y Root-mean-square-standardized.....	115



<b>Tabla 29.</b> Propiedades y mineralogía principal (primaria y secundaria) registradas en los jales de Taxco, Guerrero. ....	122
<b>Tabla 30.</b> Concentraciones de EPT reportadas para la zona minera de Taxco, Guerrero. ....	126
<b>Tabla 31.</b> Concentraciones de EPT reportadas para otras zonas de México y el mundo. ....	130
<b>Tabla 32.</b> Usos de diferentes índices de polución en otros estudios.....	137
<b>Tabla 33.</b> Porcentajes de clasificación de concentraciones de EPTs para la zona de estudio respecto a las.....	144
<b>Tabla 34.</b> Compendio de valores propuestos por normas internacionales como valores máximos permisibles para EPTs en Zonas Residenciales .....	145
<b>Tabla 35</b> Compendio de valores propuestos por normas internacionales como valores máximos permisibles para EPTs en Zonas Industriales.....	146
<b>Tabla 36</b> Porcentajes de clasificación de concentraciones EPTs para la zona de estudio respecto a las normas internacionales para zonas industriales. ....	146
<b>Tabla 37</b> Errores de predicción de interpolación Kriging ordinaria de las concentraciones de metales pesados.....	148



## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Tabla periódica de elementos en la que se destacan los macro y micronutrientes esenciales para las plantas, animales y humanos.(Nieder, Benbi, & Reichl, 2018) .....	23
<b>Figura 2.</b> Ubicación de las presas de jales y aspectos ambientales.(Industrial Minera México, 2016) .....	33
<b>Figura 3.</b> Estrategias biológicas y abióticas para remediar aguas ácidas de drenaje de minas. (Johnson & Hallberg, 2005) .....	35
<b>Figura 4.</b> Concentraciones totales de As, Pb, Zn y Cu en el suelo superficial y tendencias espaciales en el sitio de estudio (a, b, c, d, respectivamente). (Roque-Álvarez et al., 2018) .....	39
<b>Figura 5.</b> Procedimiento de derivación de valores de revisión basado en varios niveles de riesgo y sus aplicaciones asociadas. <b>Nota:</b> Tomado de (CHEN et al., 2018).....	40
<b>Figura 6.</b> Ubicación general de la zona de estudio.....	48
<b>Figura 7.</b> Mapa Geológico-Minero de la zona de estudio .....	49
<b>Figura 8.</b> Procedimiento metodológico general .....	50
<b>Figura 9.</b> Diagrama de proceso para la toma de muestras de material vegetal. ....	55
<b>Figura 10.</b> Diagrama de proceso para la toma de muestras de suelos y sedimentos. ....	56
<b>Figura 11.</b> Procedimiento de digestión de muestras de material vegetal. ....	59
<b>Figura 12.</b> Procedimiento de interpolaciones geo-estadísticas.....	71
<b>Figura 13</b> Mapas de distribución de puntos de muestreo para la zona de estudio.....	76
<b>Figura 14.</b> Concentración de elementos traza normados en la NOM-147 en la Zona Norte. ....	89
<b>Figura 15.</b> Concentración de elementos traza normados en la NOM-147 en la Zona Central.....	89
<b>Figura 16.</b> Concentración de elementos traza normados en la NOM-147 en la Zona Sur.....	90
<b>Figura 17.</b> Valores de FE para EPT de la NOM-147 para la Zona Norte. ....	100
<b>Figura 18.</b> Valores de FE de otros EPT para la Zona Nortor. ....	101
<b>Figura 19.</b> Valores de FE para EPT dela NOM-147 para la Zona Centro. ....	101
<b>Figura 20.</b> Valores de FE de otros EPT para la Zona Centro.....	102
<b>Figura 21.</b> <i>Valores de FE para EPT dela NOM-147 para la Zona Sur.</i> ....	103
<b>Figura 22.</b> Valores de FE de otros EPT para la Zona Sur. ....	103
<b>Figura 23.</b> Valores de Igeo para EPT dela NOM-147 para la Zona Norte.....	104
<b>Figura 24.</b> <i>Valores de Igeo de otros EPT para la Zona Norte.</i> ....	105
<b>Figura 25.</b> Valores de Igeo para EPT dela NOM-147 para la Zona Centro .....	106
<b>Figura 26.</b> Valores de Igeo de otros EPT para la Zona Central. ....	107
<b>Figura 27.</b> Valores de Igeo para EPT dela NOM-147 para la Zona Sur. ....	107
<b>Figura 28.</b> Valores de Igeo de otros EPT para la Zona Sur.....	108
<b>Figura 29.</b> Porcentajes de valores de clasificación de PLI por Zonas de Estudio.....	110
<b>Figura 30.</b> Porcentajes de valores de clasificación de mCdeg por Zonas de Estudio. ....	111
<b>Figura 31.</b> <i>Porcentajes de valores de clasificación de RI por Zonas de Estudio.</i> .....	112
<b>Figura 32.</b> Valores de RI por Zonas de Estudio. ....	113
<b>Figura 33.</b> Valores de Riesgo Cancerígeno en Niños por Zonas de Estudio.....	114
<b>Figura 34.</b> Valores de Riesgo Cancerígeno en Adultos por Zonas de Estudio. ....	114
<b>Figura 35.</b> Mapas de distribución de concentración de As y Pb respeto a la clasificación de la NOM-147 .....	117



**Figura 36.** Mapas de distribución de Índice de Geo-acumulación de As y Pb..... 118

**Figura 37.** Mapas de distribución de Factor de enriquecimiento de As y Pb..... 119



## Resumen

En este trabajo de investigación se determinó la concentración de elementos mayores (Al, Fe, Ca, Mg, K, P, Ti) y elementos traza normados (As, Ba, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y V) y no normados (Li, B, Na, Bi, Mn, Co, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, In, Sn, Sb, Cs, W, Au, Th y U) en México por la NOM-147 en suelo, sedimento y material vegetal recolectando en un muestreo, realizado durante la temporada de lluvias, en la zona minera de Taxco, Guerrero, para evaluar los resultados de concentración elemental obtenidos, mediante el uso de índices contaminación y el uso de herramientas estadísticas y geo-estadísticas; Lo anterior, con el fin de valorar su potencial impacto al medio ambiente y a la salud humana.

Para el trabajo de campo se realizaron visitas de campo para el reconocimiento del área de estudio, así como la observación, detección, verificación y tipificación de las posibles zonas contaminadas que constituyen algún grado de amenaza a las distintas fuentes de agua, suelo y material vegetal en las diferentes comunidades. Para ello se contó con el apoyo del gobierno local del municipio de Taxco y del municipio de Iguala, los comisariados ejidales y comunales, y Organizaciones de la Sociedad Civil, en diversos talleres y durante la colecta de muestras, lo cual se realizó entre el 27 y 29 de julio del 2019, en el municipio de Taxco, Guerrero y sus alrededores. Se identificaron 61 sitios relevantes para muestrear, los cuales reportaron los actores como potencialmente contaminados o fuentes relevantes de agua para la población.

Los datos obtenidos expresados como concentraciones de elementos en los grupos de elementos mayores y traza fueron muy variados entre los puntos muestreados, aunque de manera general se presentaron valores de concentraciones elementales superiores a sus respectivos niveles de fondo en especial para elementos potencial mente tóxicos como el As, el Pb y el Cd en las zonas cercanas a los jales.

Para identificar el riesgo ecológico y evaluar la contaminación del suelo, se calcularon para las zonas norte, centro y sur, del área de estudio varios índices de contaminación, como los índices de contaminación simple: índice de geo-acumulación (Igeo) y Factor de Enriquecimiento (FE). Por su parte entre los índices complejos totales estimados se



encuentran el Índice de carga de contaminación (PLI), el Grado de contaminación y Grado de contaminación modificado (Cdeg, mCdeg) y el Riesgo potencial ecológico (RI). Los resultados encontrados ponen en evidencia la tendencia a registrar valores de contaminación altos en las cercanías a los jales situación que representa un riesgo relevante tanto para los ecosistemas como para la población que reside a sus alrededores.

También se identificó el riesgo cancerígeno para la salud humana de acuerdo al método propuesto por la EPA para el Pb, el Cd, As y el Cr, en niños y adultos en la zona, encontrando que el As constituye el principal factor de riesgo para ambos grupos. Con las concentraciones de material vegetal, se calculó el factor de translocación para determinar la capacidad de las especies vegetales en la zona para trasladar los elementos potencialmente tóxicos desde las raíces hasta sus hojas. La identificación de las posibles fuentes de contaminación se evaluó mediante el análisis de correlación y el método multivariado de análisis de factores (FA) con resultados que apuntan como fuentes principales a los jales de la zona de acuerdo a la mineralogía rica en sulfuros como la pirita que se reporta para los mismos en la bibliografía consultada.

Por último, una vez con las concentraciones de los elementos y sus coordenadas georeferenciadas, mediante el uso del paquete geo-estadístico del software Arcgis 10.5, se utilizó la herramienta de interpolación Kriging para el ajuste, diagnóstico y comparación de modelos para la determinación de las zonas de mayor riesgo con base en la concentración de los metales analizados por arriba de la NOM-147 y normas internacionales. Para la selección del mejor método de interpolación se consideraron los resultados Mean Standardized Error y Root-mean-Square-Standardized Error registrándose altas concentraciones en las zonas cercanas a los jales.



## Abstract

In this research work, the concentration of major elements (Al, Fe, Ca, Mg, K, P, Ti) and regulated trace elements (As, Ba, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl and V) and non-regulated trace elements (Li, B, Na, Bi, Mn, Co, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, In, Sn, Sb, Cs, W, Au, Th and U) in Mexico by NOM-147 was determined in soil, sediment and plant material collected during the rainy season in the mining area of Taxco, Guerrero, to evaluate the results of elemental concentration obtained, through the use of contamination indexes and the use of statistical and geostatistical tools; The above, in order to assess their potential impact on the environment and human health.

For the field work, field visits were made for the reconnaissance of the study area, as well as the observation, detection, verification and typification of the possible contaminated areas that constitute some degree of threat to the different sources of water, soil and plant material in the different communities. For this purpose, with the support of the local government of the municipality of Taxco and the municipality of Iguala, communal commissaries, and Civil Society Organizations in various workshops and during the collection of samples, which was carried out between July 27 and 29, 2019, in the municipality of Taxco, Guerrero and its surroundings. Sixty-one relevant sites were identified for sampling, which were reported by stakeholders as potentially contaminated or relevant water sources for the population.

The data obtained, expressed as elemental concentrations in the major and trace element groups, varied greatly among the points sampled, although in general there were values of elemental concentrations higher than their respective background levels, especially for potentially toxic elements such as As, Pb and Cd in the areas near the tailings.

To identify the ecological risk and evaluate soil contamination, several contamination indexes were calculated for the northern, central and southern zones of the study area, such as the simple contamination indexes: geo-accumulation index (Igeo) and Enrichment Factor (FE). The total complex indices estimated include the Pollution Load Index (PLI), the Pollution Degree and Modified Pollution Degree (Cdeg, mCdeg) and the Potential Ecological



Risk (RI). The results show a tendency to register high contamination values in the vicinity of the tailings, a situation that represents a relevant risk for both the ecosystems and the surrounding population.

The carcinogenic risk to human health was also identified according to the method proposed by the EPA for Pb, Cd, As and Cr in children and adults in the area, and As was found to be the main risk factor for both groups. Using the concentrations of plant material, the translocation factor was calculated to determine the ability of plant species in the area to move potentially toxic elements from their roots to their leaves. The identification of the possible sources of contamination was evaluated using correlation analysis and the multivariate method of factor analysis (FA) with results that point to the tailings in the area as the main sources, according to the mineralogy rich in sulfides such as pyrite reported in the literature consulted.

Finally, once the concentrations of the elements and their geo-referenced coordinates were obtained, using the geostatistical package of Arcgis 10.5 software, the Kriging interpolation tool was used to adjust, diagnose and compare models to determine the highest risk zones based on the concentration of the metals analyzed above the NOM-147 and international standards. For the selection of the best interpolation method, the Mean Standardized Error and Root-mean-Square-Standardized Error results were considered, registering high concentrations in the areas near the tailings.





## Introducción

A nivel general las actividades antropogénicas son las principales fuentes de contaminación por metales en aire, agua y suelo, como son la minería, fundición, metalurgia, transformación química entre otras; sin descartar que se pueden dar enriquecimientos también por fuentes naturales. Esta situación adquiere especial importancia a nivel internacional, particularmente en México, debido a que, por sus abundantes recursos minerales, existen diversos proyectos mineros activos y abandonados en el territorio del país. En 2017 la producción minera alcanzó un monto total de 575 miles de millones de pesos, siendo los principales productos oro (16.9%), cobre (15.0%), basalto (14.5%), plata (10.6%), zinc (6.4%) y caliza (5.8%), (Servicio Geológico Mexicano, 2018). Estos minerales y metales fueron extraídos de diversos yacimientos explotados en diferentes regiones del país como Taxco, Guanajuato, Pachuca, Zacatecas y Santa Bárbara, solo por mencionar algunos. (Francisco Martín Romero & Ruíz, 2010)

En el caso de la zona de Taxco, en el Estado de Guerrero, al suroeste de México, la minería tiene una amplia tradición en la extracción de metales como plata, oro, cobre, plomo y zinc; por lo que representa un área de especial preocupación por la alta probabilidad de contaminación resultado de los drenajes ácidos de mina, que pueden llegar a dispersar metales tóxicos a los suelos de áreas cercanas a las poblaciones cercanas, como son (Cacalotenango, Dolores, El Fraile y Santa Rosa) así como los cuerpos de agua (Río Cacalotenango y Taxco) esta situación representa un riesgo para la salud y el medio ambiente. Los cambios en el paisaje, la destrucción de suelos agrícolas, el drenaje ácido de mina (DAM), originado por los depósitos de residuos mineros y minas abandonadas, así como el incremento de casos de enfermedades relacionadas con intoxicación por metales (arsenicosis, cáncer e insuficiencia renal) son, entre otras, evidencias significativas del impacto ambiental y a la salud humana que ha generado la industria minera (Méndez-Ramírez & Hernández, 2012).

En Taxco, debido a la actividad minera, están ampliamente estudiados los fenómenos de contaminación de metales tanto en el ambiente (i.e., suelo, sedimentos, agua), como en los



seres humanos y en las plantas. Los hallazgos de contaminación metálica se concentran en las áreas adyacentes a las zonas de acumulación de residuos mineros conocidos como jales.

Es importante mencionar que, en la literatura científica consultada existen limitados estudios sobre dispersión de metales en zonas más amplias y distantes a las fuentes de contaminación, siendo uno de los principales aportes de esta investigación el hacer un diagnóstico de los riesgos de contaminación ambiental y a la salud en la región minera de Taxco y no solo en las zonas núcleo de los proyectos mineros activos o abandonados. Por otro lado, existen pocos estudios en donde se analice con herramientas geo-estadísticas la presencia de concentraciones de contaminantes y su dispersión, teniendo en cuenta su distancia con respecto a fuentes de contaminación y otros atributos ambientales como la topografía. (Roque-Álvarez et al., 2018).

En sentido la importancia de este trabajo radica en la determinación de elementos potencialmente tóxicos, su dispersión y sus riesgos asociados al ambiente y la salud humana; cuyos resultados podrán ser útiles para apoyar a los gobiernos locales en la toma de decisiones administrativas acertadas y eficientes. Bajo este contexto en la presente investigación se hizo un monitoreo exhaustivo de varios compartimentos ambientales (suelo, sedimentos de río y biomasa del tronco, raíz, y hojas de los árboles en la zona de estudio); para determinar geo-estadísticamente la distribución de la concentración de elementos mayoritarios y trazas en Taxco, Guerrero y con ello estimar el impacto al medio ambiente y la salud humana.

## **Justificación**

Diversas regiones alrededor de Taxco han tenido una explotación minera durante décadas por lo que se han generado grandes cantidades de desechos sólidos con residuos metálicos que se han acumulados en las minas; los cuales, a pesar de estar contenidos en presas de jales, han generado la liberación de diversos contaminantes metálicos por las condiciones oxidativas del ambiente y se han dispersado hacia las comunidades aledañas de este municipio. De manera adicional, se desconoce si existe contaminación por metales tóxicos en los sitios abandonados por la actividad minera, diferentes a los comúnmente evaluados



(i.e., As, Pb, Cd), (Dótor Almazán, Armienta Hernández, Árcega Cabrera, & Talavera Mendoza, 2014), (Méndez-Ramírez & Hernández, 2012) Por consiguiente, la evaluación de su concentración y distribución es prioritaria para conocer sus posibles afectaciones ambientales y a la salud de los seres vivos de estas regiones.

El presente trabajo estudia de manera la distribución de contaminantes de elementos potencialmente tóxicos en sitios con potencial impacto o afectación al ambiente y/o la salud en las poblaciones en la Región Minera de Taxco, incluyendo aquellas cercanas a los jales, como aquellas que se encuentran en zonas distantes a los mismos, pero a lado de cauces. Aunque existen múltiples estudios sobre contaminación por metales pesados en la región, que presentan información útil y relacionan las fuentes de contaminación con sus posibles receptores, al tratarse de estudios en sitios puntuales, que dejan de lado la distribución de estos contaminantes en la Región Minera. Por lo que un estudio que evalué mediante herramientas geo-estadísticas, la distribución de contaminantes a través diversos compartimentos como la madera, la raíz, la corteza y las hojas de los árboles, los suelos y sedimentos, se presenta como una herramienta con alto potencial de utilidad en la identificación de áreas contaminadas críticas para evaluar los riesgos al medio ambiente y a la salud humana.

## **Hipótesis**

La dispersión de los metales tóxicos presentes en el suelo, sedimentos y material vegetal, cuya fuente principal son los jales de la zona minera de Taxco, son un riesgo a la salud humana y al medio ambiente, ya que sus niveles de concentración superan los límites máximos permisibles de la normatividad mexicana. Lo anterior se puede atribuir al drenaje ácido de mina producido por un insuficiente manejo de las presas de jales, aunado a su dispersión los causes existentes, lo que favorece la contaminación de zonas remotas.



## Objetivos

### Objetivo general

Evaluar la concentración de elementos potencialmente tóxicos en suelos, sedimentos y material vegetal en la región minera de Taxco con el fin de determinar su distribución y potencial impacto a la salud humana y al medio ambiente (impacto eco-toxicológico).

### Objetivos específicos

- Determinar la concentración de elementos mayores y traza en las matrices ambientales: suelo, sedimento y material vegetal (raíz, corteza, madera y hojas).
- Identificar los metales con mayor potencial de afectación al medio ambiente y la salud humana (riesgo eco-toxicológico) en la zona mediante índices especializados.
- Evaluar las zonas de riesgo ambiental y a la salud por la dispersión de elementos potencialmente tóxicos por medio de herramientas geo-estadísticas.



# Capítulo

# 1



## Capítulo 1. Antecedentes

### 1.1 Elementos mayores y traza.

Los elementos químicos son de interés para los científicos por varias razones. Algunos, como el silicio (Si) y el hierro (Fe) son tan abundantes que sus propiedades químicas rigen el comportamiento de los materiales geológicos. Los elementos menos abundantes como el rubidio (Rb) y el estroncio (Sr), aunque participan más pasivamente en los procesos geológicos, pueden ayudarnos a entender cómo funcionan estos procesos. Otros elementos (como el cromo, (Cr), el neodimio, (Nd), o el uranio, (U) tienen importantes usos comerciales o impactos ambientales importantes.(Gill, 2015)

En términos de su abundancia en los materiales geológicos, los elementos pueden dividirse en dos clases: elementos mayores y elementos traza u oligoelementos.

#### Elementos mayores

Estos elementos, que incluyen Si, Al, Mg y Na, tienen concentraciones en la mayoría de los materiales geológicos superiores al 0.1%. Son constituyentes esenciales de los minerales que forman las rocas y las concentraciones de elementos principales en los minerales de silicato suelen expresarse en términos de porcentajes de óxido(Gill, 2015)

El término elemento menor se aplica a veces a los elementos mayores menos abundantes, como el manganeso (Mn) y el fósforo con concentraciones de óxido inferiores al 1%.

#### Elementos traza

Los elementos traza, como el rubidio (Rb) y el zinc (Zn) tienen concentraciones en la mayoría de los materiales geológicos demasiado bajas, (normalmente menor del 0,1%), para influenciar la cristalización de los minerales. La mayoría de las veces se presentan como "impurezas" disueltas en los minerales formadores de roca, aunque algunos, como el circonio (Zr), pueden formar minerales accesorios separados. La concentración de elementos traza en las rocas suelen expresarse en partes por millón (ppm = 1 mg/kg) del elemento (no el óxido) o en partes por billón (ppb = 1 ng/g).(Gill, 2015)

La distinción entre elementos mayores y menores tiene que aplicarse de forma flexible, ya que un mismo elemento puede ser un elemento mayor en un tipo de roca (potasio en el granito, por ejemplo) y un elemento menor en otro (el potasio en la peridotita).

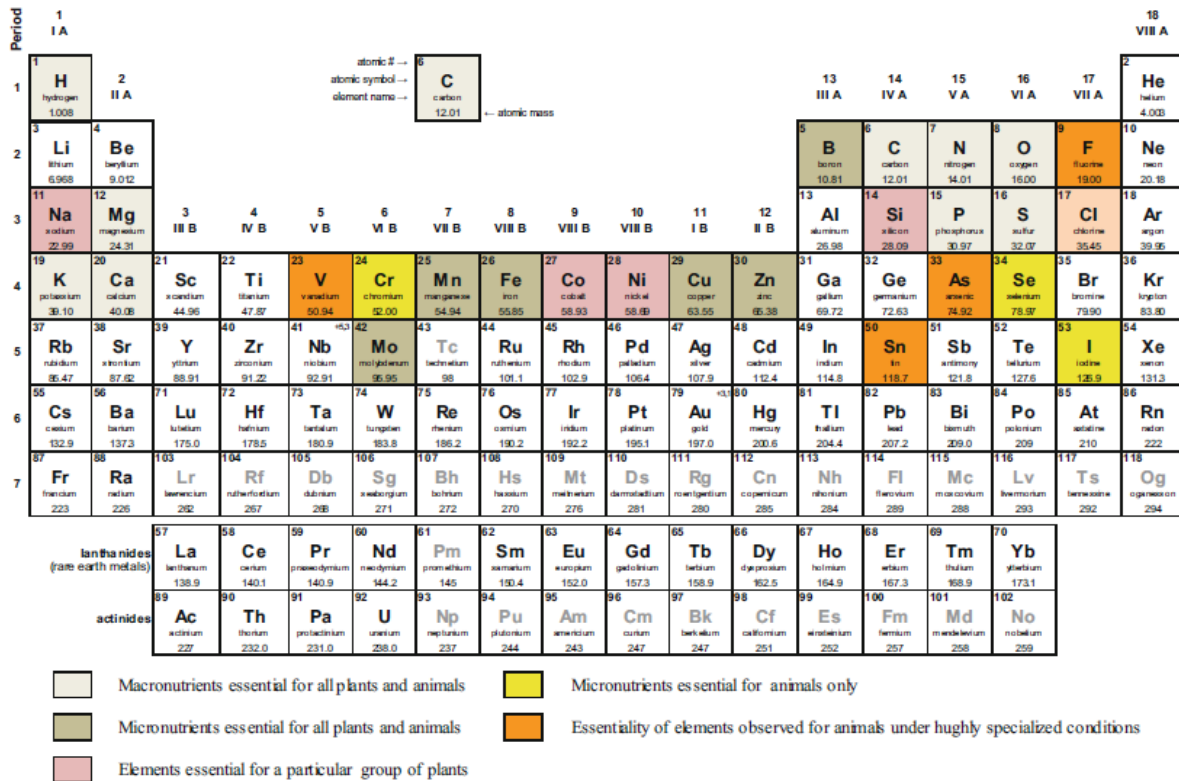


Figura 1. Tabla periódica de elementos en la que se destacan los macro y micronutrientes esenciales para las plantas, animales y humanos.(Nieder, Benbi, & Reichl, 2018)

## 1.2. Metales pesados

Los metales y los compuestos metálicos son constituyentes naturales de todos los ecosistemas, con una amplia distribución en la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera y la biosfera producida por fenómenos naturales como el vulcanismo, la erosión, la actividad bacteriana, el intemperismo físico y químico del suelo y las rocas, así como de diversas actividades antropogénicas en especial las relacionadas con la industria metalúrgica, de combustibles extractiva (i.e., minerales preciosos y materiales pétreos), así como los



desechos de estos últimos.(Robledo Marengo, Rojas García, Medina Díaz, & Vivianco, Barrón, 2014)

Algunas especies metálicas son componentes esenciales para la vida de los organismos, funcionando como macro o micro nutrientes (como se puede apreciar en la Fig. 1), con funciones como el mantenimiento del metabolismo en humanos, animales, plantas y microorganismos. Algunos otros metales se han reportado como estimulantes del crecimiento de las plantas. Sin embargo, también existen especies metálicas que no poseen ninguna función biológica aparente, pero que son absorbidos por los organismos, inclusive a niveles de concentración en los que se reportan como tóxicos.(Robledo Marengo et al., 2014)

De acuerdo con (Giannuzzi, 2018) entre los metales considerados oligoelementos se pueden mencionar:

- Con funciones esenciales: hierro, zinc y magnesio.
- Con funciones metabólicas importantes: cobalto, cobre, manganeso, magnesio, molibdeno, calcio, cromo, sodio, potasio, níquel, zinc, selenio, estaño y el silicio.
- 

En cuanto al grupo de metales sin función biológica y con mayor toxicidad conocida se pueden listar: el aluminio, el arsénico, el berilio, el cadmio, el cromo, el mercurio y el plomo(Giannuzzi, 2018). (Figura 1)

Se distingue a los metales pesados como un grupo especial de elementos, debido a su efecto tóxico ejercido en plantas y humanos en altas concentraciones. Solo tres metales pesados, es decir, Pb, Cd y Hg, fueron mencionados en el Programa de Monitoreo Global adoptado por la ONU en 1973. Posteriormente, en el informe entregado por el Director Ejecutivo del Programa Ambiental de la ONU (PNUMA), otros siete metales pesados (Cu, Sn, V, Cr, Mo, Co y Ni) y tres metaloides (Sb, As y Se) se agregaron a la lista de los elementos más peligrosos.(Vodyanitskii, 2016) , y de allí la relevancia de que sea monitoreada su concentración para evitar que represente un riesgo al medio ambiente y la salud.

En general, los metales pesados son un conjunto de elementos que presentan propiedades metálicas, en el que se incluyen metales de transición, algunos semimetales, lantánidos y actínidos. El criterio más general para su clasificación se basa en la densidad específica, de





acuerdo con la cual se incluyen en este grupo elementos con una densidad mayor a 5 g/cm<sup>3</sup>.(Covarrubias & Peña Cabriales, 2017).

Actualmente, a menudo se usa para nombrar un grupo de metales y semimetales (metaloides) que se han asociado con la contaminación del medio ambiente (agua, suelos, aire), así como con un potencial de toxicidad o eco-toxicidad, siendo sus principales mecanismos de toxicidad a nivel molecular, el bloqueo de grupos funcionales esenciales en biomoléculas, el desplazamiento de centros catiónicos en enzimas importantes y la formación de especies reactivas de oxígeno (ERO), debido a la auto-oxidación de metales como Fe<sup>2+</sup> o Cu<sup>+</sup> (Covarrubias & Peña Cabriales, 2017).

Sin embargo, vale la pena aclarar que a pesar de que el término "metales pesados" junto con otros términos se han usado comúnmente para especificar grupos de metales en estudios biológicos y ambientales, así como cada vez más en publicaciones y diferentes legislaciones a nivel mundial relacionadas con riesgos químicos y el uso seguro de productos químicos en las últimas décadas, se enumeran en la Tabla 1.(Duffus, 2002).

La Tabla 1 presenta algunas definiciones de los conceptos de metales más utilizados con limitaciones claras dado que son arbitrarios e imprecisos. Por ejemplo, el término "metal pesado", usado a menudo con connotaciones de contaminación y toxicidad probablemente la menos satisfactoria de los términos citados, ya que conduce a la mayor confusión; siendo que "pesado" en su uso convencional implica alta densidad, contribuyendo esta, muy poco a la predicción de los efectos biológicos de los metales.

Las legislaciones y las sustancias que regulan pueden diferir de un conjunto de regulaciones a otro, o el término puede usarse sin especificar qué "metales pesados" están cubiertos por lo que el término ha sido usado de manera inconsistente llevando a una confusión general sobre la importancia del término, así como de la tendencia a suponer que todos los llamados "metales pesados" tienen propiedades altamente tóxicas o eco-tóxicas.(Duffus, 2002).

**Tabla 1.** Términos utilizados a menudo para clasificar metales en estudios biológicos y ambientales

Término	Comentarios	Ejemplos
<b>Metal</b>	Pueden definirse por las propiedades físicas del su estado elemental como elementos con brillo metálico, la capacidad de perder electrones para formar iones positivos y la capacidad de conducir calor y electricidad, pero se identifican mejor por consideración de sus propiedades químicas. El término se usa indiscriminadamente por no químicos para referirse tanto al elemento como a los compuestos.	
<b>Metaloide</b>	Un elemento que tiene la apariencia física y las propiedades de un metal pero se comporta químicamente como un no metal.	Boro (B), Silicio (Si) Germanio (Ge), Arsénico (As), Telurio (Te), Antimonio (Sb)
<b>"Metal Pesado"</b>	Término muy impreciso, usado libremente para referirse a ambos el elemento y sus compuestos. Se basa en la categorización por densidad, que es rara vez es una propiedad biológicamente significativa.	Mercurio (Hg), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Cromo (Cr).
<b>Metal esencial</b>	En términos generales, uno que se requiere para el ciclo de vida completo de un organismo, cuya ausencia produce síntomas de deficiencia específicos aliviados solo por ese metal, y cuyo efecto debe referirse a una curva dosis-respuesta. El término se usa a menudo engañosamente ya que debe ir acompañado de una declaración de qué organismos tiene como requisito el elemento. Nuevamente, se usa libremente para referirse tanto al elemento y sus compuestos.	Sodio (Na), Potasio (P), Calcio (Ca), Zinc (Zn) y Manganeseo (Mn).
<b>Metal Traza</b>	Metal que se encuentra en baja concentración, en fracciones de masa de ppm o menos, en alguna fuente especificada, por ejemplo, suelo, planta, tejido, agua subterránea, etc.	Hierro (Fe), Magnesio (Mg), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Níquel (Ni)

Fuente: (Duffus, 2002)

### 1.3. Toxicología

De acuerdo a (Giannuzzi, 2018) el estudio de la toxicología de los metales pesados incluye en su fase inicial la búsqueda de información e indagar en cuanto a:



- Origen del tóxico,
- Fuentes de exposición,
- Dosis tóxicas en el hombre,
- Forma química (orgánica o inorgánica) en la que son introducidos en el organismo y el estado de oxidación, que puede determinar el carácter tóxico de un metal y su distribución en el ambiente (especiación),
- Tipo de exposición (aguda o crónica),
- Cuali-cuantificación analítica de las especies tóxicas en diferentes matrices, para diagnóstico de intoxicación, monitoreo biológico y ambiental,
- Legislación vigente, líneas base de metales pesados en suelos urbanos o agrícolas.

Siendo los tóxicos metálicos una importante fuente de riesgo para la salud y el medio ambiente, la actividad antropogénica es una causa frecuente de exposición pues actúa concentrando los metales y produciendo en muchas ocasiones exposición ambiental, laboral y domiciliaria a través de los alimentos, aire, agua contaminados.(Giannuzzi, 2018)

Los metales se redistribuyen en el medio ambiente mediante ciclos biológicos, ciclos biogeoquímicos y ciclos biogeoquímicos; siendo en estos últimos donde la lluvia disuelve las rocas y minerales físicamente el material hacia cuerpos de agua, en donde se depositan y distribuyen hacia suelos y sedimentos adyacentes. La actividad industrial también contribuye a la redistribución de los metales en el medio ambiente, removiendo los metales de sus minerales, generando nuevos compuestos y aumentando la descarga de metales hacia la tierra, el agua y la atmósfera.(Giannuzzi, 2018)

#### **1.4 Técnicas de laboratorio para extracción (digestión) y cuantificación de metales**

Los metales pesados están presentes en suelos contaminados ya sea en grandes concentraciones o apenas en fracciones extraíbles y este contenido total tiene un valor real



que comprende todo el metal en el suelo (generalmente analizado después de una fuerte digestión ácida) y representa un valor máximo de riesgo derivado de la contaminación del suelo. Para efectuar esta digestión de ácidos se utilizan métodos que utilizan agua regia, ácido sulfúrico, ácido perclórico, ácido clorhídrico o ácido fluorhídrico.

La disposición y distribución de los metales pesados es diferente para cada suelo, lo que afecta las características de descomposición y extracción, por ende se deben elegir los métodos y reactivos de descomposición apropiados después de una cuidadosa evaluación de las características tanto de los suelos como de los metales.(Hu & Qi, 2013)

#### **1.4.1 Digestión ácida-Descomposición por Agua Regia**

Este método es ampliamente utilizado no sólo para suelos y sedimentos, sino también para desechos sólidos como cenizas de incineración. El agua regia es una mezcla 3: 1 de ácido clorhídrico concentrado y ácido nítrico concentrado. La mezcla es altamente corrosiva debido a la formación de cloro gaseoso ( $\text{Cl}_2$ ) y cloruro de nitrosilo ( $\text{NOCl}$ ). El fuerte poder oxidante de estos productos químicos puede descomponer sustancias orgánicas. y disolver metales muy insolubles (i.e., Au y Pt) que no se ionizan fácilmente. Sin embargo, el As se puede subestimarse como resultado de la volatilización, debido a los bajos puntos de ebullición de sus cloruros.(Hu & Qi, 2013)

Este tipo de digestiones ácidas pueden llevarse a cabo en vasos abiertos, siendo este durante mucho tiempo un método popular debido a su flexibilidad en el control de los parámetros de digestión, como la temperatura, el tiempo y la adición sencilla de reactivos. La digestión consiste en un ataque con ácido en recipientes abiertos o viales con tapón de rosca (baja presión) colocados sobre una plancha de calefacción. Sin embargo, las temperaturas máximas de digestión están limitadas por el punto de ebullición a presión ambiente del correspondiente ácido o mezcla de ácido. Otras desventajas son el riesgo potencial de contaminación del laboratorio, las grandes cantidades de reactivos que se requieren y la pérdida potencial de oligoelementos.(Hu & Qi, 2013)



#### **1.4.2. Espectroscopia de emisión óptica acoplada inductivamente (ICP-OES)**

La espectrometría de emisión óptica de plasma es una técnica con la que se pueden identificar y cuantificar todos los elementos de la tabla periódica, a excepción del nitrógeno, oxígeno, halógenos y gases nobles, mediante su espectro de emisión utilizando el plasma como fuente de excitación. Consiste en un sistema de introducción de muestra simple, una antorcha de plasma generalmente de gas argón, una fuente de alimentación de plasma y un sistema de medición óptica. La muestra debe introducirse en el plasma en una forma que pueda vaporizarse y atomizarse efectivamente (pequeñas gotas de solución, pequeñas partículas de vapor sólido). (Brundle, Evans, & Wilson, 1992).

Los átomos e iones producidos en el plasma son excitados y emiten luz. La intensidad de la luz emitida a las longitudes de onda características de los elementos particulares de interés se mide y se relaciona con la concentración de cada elemento de interés a través de curvas de calibración.

La información cualitativa sobre una muestra (elementos están presentes) se obtiene identificando la presencia de emisión longitud de onda características de los elementos de interés. La información cuantitativa sobre la muestra (concentración de los elementos) se puede extraer de las intensidades de las características de las líneas de emisión de los elementos de interés. Esto se logra mediante el uso de gráficos de intensidad de emisión vs concentración, llamadas curvas de calibración. Las curvas de calibración se establecen analizando soluciones con concentraciones conocidas (soluciones estándar) y obteniendo sus intensidades de emisión para cada elemento. Estas intensidades se pueden graficar contra las concentraciones de estándares para establecer una curva de calibración para cada elemento. (Cazes, 2004 ).

### **2.1 Minería**

La minería es un proceso con impactos medioambientales en todas sus etapas que comienza con la exploración, descubrimiento, extracción y procesamiento de yacimientos hasta el



cierre y la remediación de los sitios trabajados. En este sentido uno de los más grandes dilemas de la industria minera es la inadecuada eliminación de residuos; 1000 toneladas de extracción de mineral resultarán en aproximadamente 9 toneladas de metal, pero producen 990 toneladas de residuos.(Moreno et al., 2010)

De acuerdo con la información disponible en entes como la CEPAL para América Latina y el Caribe, la minería es una actividad que incide en la economía regional y representa uno de las industrias más importantes en términos de aporte al Producto Interno Bruto (PIB) en las comunidades de la zona. Sin embargo, su aprovechamiento se debe hacer respetando el entorno ambiental e identificando los posibles conflictos que genere en el territorio.(Ríos, 2018)

En el caso de México los seis estados con mayor participación en la producción minera para el año de 2018 en México, fueron Sonora, Zacatecas, Chihuahua, Durango, Coahuila y Guerrero (Servicio Geológico Mexicano, 2019) (González & González-Chávez, 2006), encontrándose en esta última la Unidad Minera de Taxco (UMT), la cual se ha caracterizado históricamente por su producción de plata y representa una de las zonas mineras más viejas de toda América, empezando sus actividades desde tiempos Pre-hispánicos (antes de 1521).

A partir de las dos primeras décadas del siglo XX la introducción de diferentes avances tecnológicos a nivel mundial en los procesos metalúrgicos llevaron a que se introdujeran en México los procesos de flotación y cianuración, convirtiéndose en un importante productor de Zn y Pb, aunque esto a su vez permitió, la explotación de mayores volúmenes de mineral y una mayor generación de residuos que a su vez generaron gran cantidad de áreas de acumulación de residuos denominados como jales.

## **2.2 Desechos Mineros**

Los relaves o más conocidos como “jales” en México o “colas” en Latinoamérica y otros países (Dótor-Almazán, Armienta-Hernández, Talavera-Mendoza, & Ruiz, 2017) son mezclas de subproductos (roca triturada y fluidos de procesamiento) de molinos, lavadoras o concentradores que quedan después de la extracción de metales preciosos, minerales,



combustibles minerales o carbón de minas; por lo que los términos relave y jale se usan de manera genérica sin diferenciar la fuente o industria extractiva específica de los que vienen los desechos. (Kossoff, Dubbin, Alfredsson, Edwards, & Macklin, 2014)

La composición química y el tamaño de los granos de los jales resultan difíciles de generalizar dado que dependen de la mineralogía del cuerpo mineral, la naturaleza de los fluidos de procesamiento de extracción, características específicas del proceso (como su eficiencia), así como de su grado de meteorización. (Kossoff et al., 2014)

### **2.3. Drenaje ácido de mina (DAM)**

La forma principal de contaminación del suelo por metales asociada a los jales, es la dispersión a través de escurrimientos superficiales de drenaje ácido de mina o AMD (por sus siglas en inglés). Este drenaje ácido es generado por la oxidación de sulfuros metálicos, como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y la galena ( $\text{PbS}$ ) entre otros, que se encuentran usualmente presentes en la composición de los jales y son fuente de elementos potencialmente tóxicos PHE (por sus siglas en inglés). (Akcil & Koldas, 2006).

El drenaje ácido se genera, en resumen, por la oxidación acelerada de la pirita de hierro ( $\text{FeS}_2$ ) y otros minerales sulfídicos resultante de la exposición de estos minerales al oxígeno y al agua (o a una atmósfera húmeda), como consecuencia de la extracción y el procesamiento de minerales metálicos. Muchos metales se presentan principalmente como minerales sulfurosos (el zinc en la esfalerita), y éstos suelen estar asociados a la pirita, que es el mineral sulfuroso más abundante del planeta. (Johnson & Hallberg, 2005)

Esta oxidación generalmente es muy limitada durante los años de operación de la mina y se desarrolla después que cesa la acumulación de material de ganga en el depósito y la porosidad en el mismo permite la difusión del oxígeno atmosférico a lo largo del tiempo. También en la superficie de los jales predominan granos de tamaño mediano, mientras que las partículas más finas están ausentes, lo que permite su transporte a los arroyos cercanos durante las lluvias y su dispersión aérea a los suelos cercanos durante la estación seca. (Dótor-Almazán et al., 2017).

## 2.4. Contaminación por actividades mineras en la zona de Taxco

Históricamente, las actividades mineras han producido vastas cantidades de jales mineros inactivos que contienen sulfuro en varias regiones de México y en todo el mundo. De manera general los jales pueden considerarse como acumulaciones de residuos de los procesos y trituración y molienda que son llevados a cabo en las actividades mineras para la obtención de los minerales deseados. Estos, generalmente contienen sulfuros metálicos residuales como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) que son la fuente de elementos potencialmente tóxicos (PHE) como arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn) y hierro (Fe) (Francisco Martín Romero & Ruíz, 2010).

Actualmente en la región de Taxco se encuentran 7 jales entre los cuales sobresalen la concha, EL Fraile I-II, Guerrero I-II, y el Solar (representados en la figura 1.) Desde el 2007, la explotación de minerales y sus beneficios se ha detenido debido a una huelga sindical.

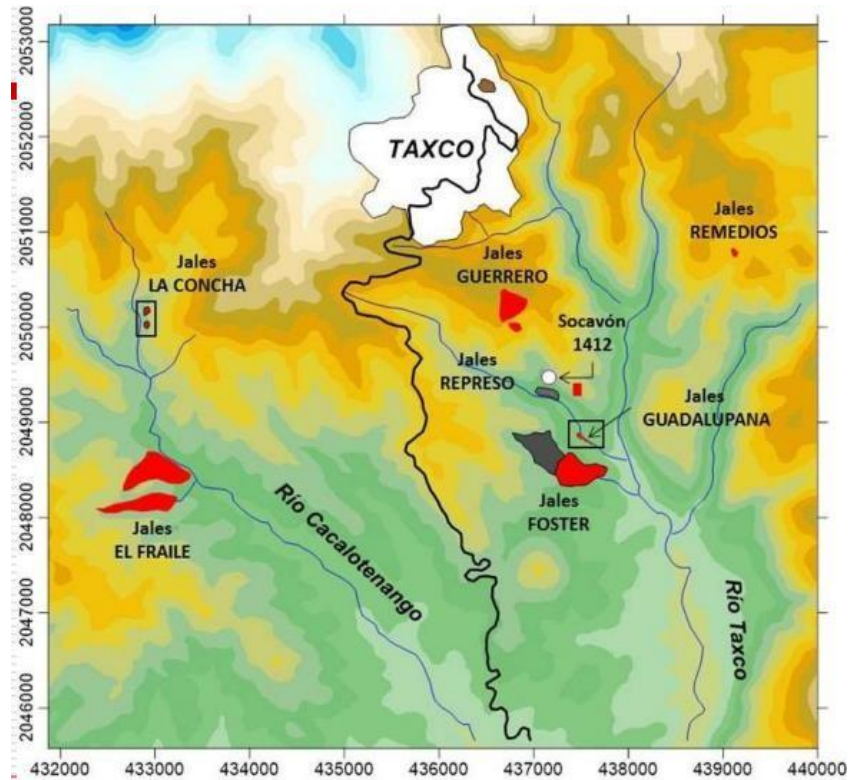
Respecto a lo anterior la zona minera de Taxco se encuentra ampliamente estudiada en diversos artículos y publicaciones en los que se demuestra la afectación en suelos, agua y especies vegetales presentes en las áreas y poblaciones cercanas por la contaminación con metales pesados generados por las actividades mineras. Cabe mencionar, que estos estudios se han concentrado en sitios puntuales en la zona núcleo o de influencia de los proyectos mineros activos o abandonados. De allí, que esta investigación contribuya al estado actual de conocimiento de la zona, al analizar la presencia de contaminantes resultado de esta actividad en la Región Minera de Taxco.

**Tabla 2.** Estudios realizados para la zona minera de Taxco

Año	Título	Autores	Medio
2008	Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros	(Francisco Martín Romero, Armienta, & Eugenia, 2008)	Suelo
2010	Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México	(Francisco Martín Romero & Ruíz, 2010)	Suelo
2012	Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros	(Huerta & Hernández, 2012)	Especies vegetales.



2012	Distribución de Fe, Zn, Pb, Cu, Cd y As originada por residuos mineros y aguas residuales en un transecto del río Taxco en Guerrero, México.	(Méndez-Ramírez & Hernández, 2012)	Agua
2013	Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución	(Corrales-Pérez & Romero, 2013)	Suelo
2014	Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: aplicación de isótopos estables	(Dótor Almazán et al., 2014)	Agua
2017	Geochemical behavior of Cu and sulfur isotopes in the tropical mining region of Taxco, Guerrero (southern México)	(Dótor-Almazán et al., 2017)	Suelo



**Figura 2.** Ubicación de las presas de jales y aspectos ambientales. (Industrial Minera México, 2016)

Para el caso específico de los efectos a la población en comunidades cercanas, un estudio realizado en el 2004 para evaluar la exposición a metales en niños entre de 6 y 11 años residentes de las zonas aledañas a los jales en la región minera de Taxco, concluyó que los niños objeto de estudio estaban expuestos a varios metales, de los cuales un alto porcentaje presentaba concentraciones superiores a los valores de referencia. (Moreno et al., 2010).

**Tabla 3.** Concentración de metales en una población de niños de Taxco, México

Metal	Valor bruto $\pm$ SD	Percentil				Valores de referencia (RV) en otros países	por encima de RV (%)
		5to	25vo	75vo	95vo		
PbB	9.4 $\pm$ 3.3	4.7	6.4	11.3	15.1	5 $\mu$ g/dL <sup>a</sup>	94
						1.9 $\mu$ g/dL <sup>d</sup>	100
NiU	75.4 $\pm$ 30.7	25	75	96	120	4.5 $\mu$ g/L <sup>a</sup>	100
BaU	18.4 $\pm$ 4.1	11	17	21	26	5.4 $\mu$ g/L <sup>a</sup>	100
MnU	5.2 $\pm$ 0.7	4	5	6	7	0.25 $\mu$ g/L <sup>a</sup>	100
CuU	29.6 $\pm$ 6.8	16	25	34	43	26 $\mu$ g/L <sup>a</sup>	66
AsU	16.5 $\pm$ 8.3	7	11.1	19.4	33.1	15 $\mu$ g/L <sup>c</sup>	46
						8.30 $\mu$ g/L <sup>e</sup>	86
HgU <sup>f</sup>	0.7 (<LOQ-3.9)	<LOQ	<LOQ	0.9	2.6	0.7 $\mu$ g/L <sup>c</sup>	30
CdU <sup>f</sup>	4(<LOQ-14)	<LOQ	4	4	11	0.5 $\mu$ g/L <sup>c</sup>	91
CrU <sup>f</sup>	15(<10-29)	10	11	16	24	0.59 $\mu$ g/L <sup>a</sup>	100
CoU <sup>f</sup>	18(3-47)	3	12	23	38	2.2 $\mu$ g/L <sup>a</sup>	100
SrU <sup>f</sup>	46(25-162)	25	25	52	120	394 $\mu$ g/L <sup>a</sup>	0
ZnU <sup>f</sup>	628(25-2605)	25	395	740	1200	1026 $\mu$ g/L <sup>a</sup>	9
FeU <sup>f</sup>	25(25-101)	25	25	30	101	NA <sup>#</sup>	NA
MoU <sup>f</sup>	52(17-142)	17	27	65	115	117 $\mu$ g/L <sup>a</sup>	3

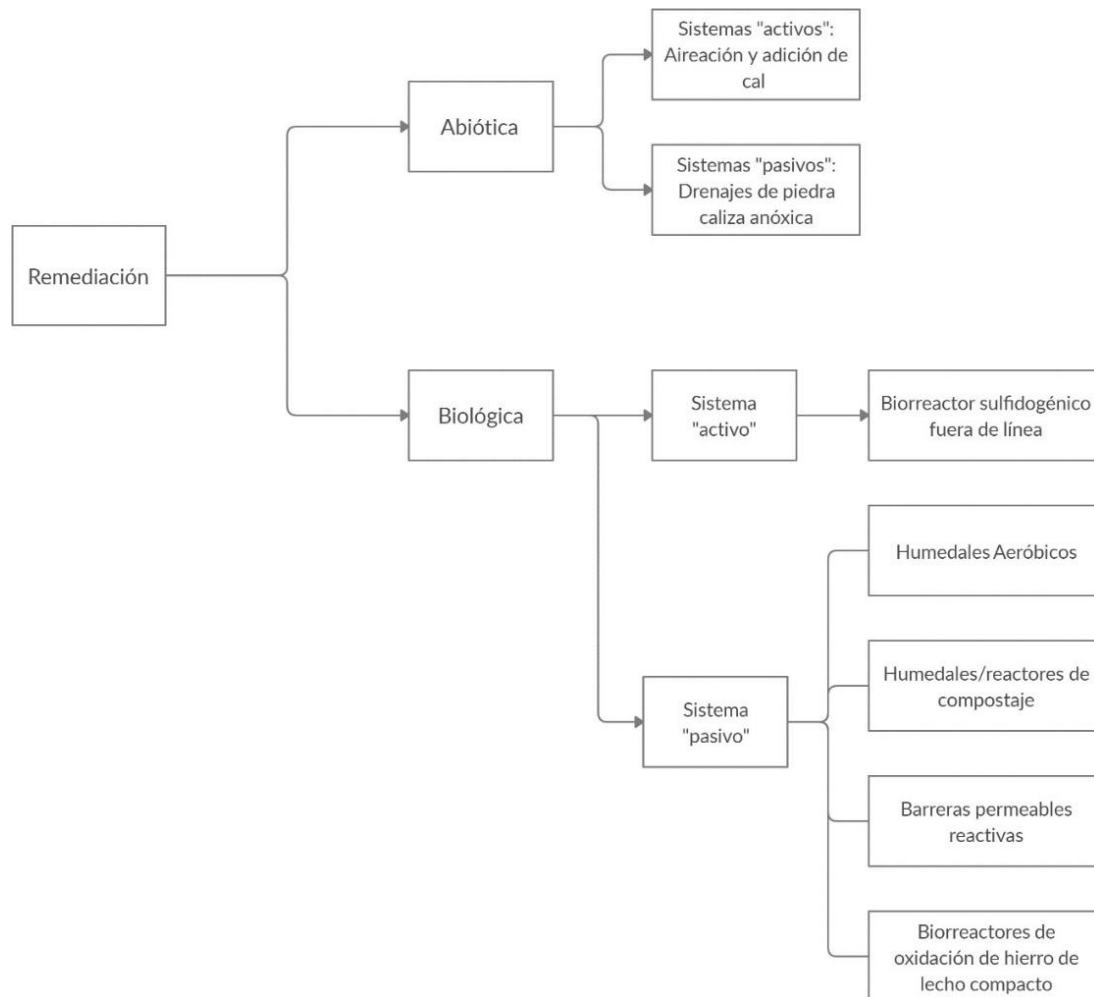
PbB, AsU y HgU se evaluaron en 50 niños (n = 50); todos los demás metales fueron evaluados en 35 individuos (n = 35). Pb se determinó en sangre; todos los otros metales fueron evaluados en orina. Los valores de PbB están en g / dL, otros valores de metales están en g / L; # Los valores de referencia para FeU en niños no estaban disponibles (NA); LOQ: límite de cuantificación del método analítico aHeitland y Köster (2006); bSchulz y col. (2009); cWilhelm y col. (2006); dJones y col. (2009); eCaldwell y col. (2009) Los datos representan la mediana (rango).

**Fuente:** (Moreno et al., 2010).

De manera similar un estudio que evaluó la presencia de plomo en mujeres en edad reproductiva (15 a 45 años) de dos comunidades rurales aledañas a la zona minera de Taxco, encontró que las mujeres están expuestas a fuentes de plomo tanto naturales como antropogénicas, estando las antropogénicas relacionadas con cerámica, polvo de zonas contaminadas por actividades mineras presentes en el hogar, pinturas interiores y gasolina. Sin embargo, mediante pruebas isotópicas señalo que los suelos y la mayoría del polvo interior presentan composiciones isotópicas que simulan las de las menas y jales presentes en Taxco, con lo que la dispersión extendida de plomo y otros metales se estaría produciendo desde las menas y jales a los recursos naturales vecinos.(Vázquez Bahéna et al., 2017).

## 2.5. Remediación

Dadas las dificultades prácticas que conlleva inhibir la formación de AMD en la fuente, a menudo, la única alternativa es minimizar el impacto que esta agua contaminada tiene sobre las corrientes y ríos; tal enfoque implica medidas de control de la migración de los contaminantes. A menudo, estos se dividen en procesos activos o pasivos, refiriéndose los activos (aunque no exclusivamente) a la aplicación continua de materiales alcalinos para neutralizar las aguas ácidas y precipitar metales, y los pasivos al uso de humedales naturales y construidos, presentado estas últimas ventajas como requerir relativamente poco mantenimiento y costos menos recurrentes, aunque pueden ser costosos y/o poco prácticos.



**Figura 3.** Estrategias biológicas y abióticas para remediar aguas ácidas de drenaje de minas. (Johnson & Hallberg, 2005)



También se puede presentar una subdivisión entre tecnologías que dependen de actividades biológicas y aquellas que no estando dentro de estos grupos procesos que pueden describirse como activos o pasivos. (Johnson & Hallberg, 2005).

## 2.6 Remediación en la zona minera de Taxco

En 2007, cuando las actividades mineras fueron abandonadas en el distrito minero de Taxco debido al inicio de un paro de los trabajadores, se inició el fenómeno de producción drenaje ácido de mina, teniendo este su origen, cuando el agua que se acumuló dentro de la mina (subterránea e infiltrada por las rocas fracturadas de la montaña) dejó de reciclarse en el propio proceso minero. Ante este escenario, (F. M. Romero, Núñez, Gutiérrez, Armienta, & Ceniceros-Gómez, 2011) se propuso como solución la creación de una barrera geoquímica, la cual dadas las condiciones de la geología local del área minera de Taxco dominada por esquisto calcáreo, con base en los resultados encontrados en pruebas de laboratorio, se encontró que era eficiente para la neutralización y eliminación de As y metales de lixiviados de minas ácidas en el área minera de Taxco. Los resultados identificados probaron que después del tratamiento propuesto los valores de pH en lixiviados de mina aumentaron de valores de 3 hasta 6.6 y 7.4, obteniendo también para estos valores de pH, la máxima eficiencia de eliminación de As, Pb, Cu y Fe.

Una vez identificada la presencia y el potencial del mineral calcacareo de la zona, se instalaron dentro de la mina tuberías, para guiar y controlar el caudal, y evitar el arrastre de material para construir un experimento con siete piletas de filtración y reposo del agua y determinar las variables y el comportamiento en épocas de lluvia y estiaje en la presa de jales El Fraile.

Con los resultados obtenidos en esta experimentación en la presa de jales El Fraile se instaló un sistema piloto de tratamiento (neutralización y filtración) para drenaje de la presa por medio de barreras geoquímicas. (Industrial Minera México, S.A. de C.V. Subdirección de Asuntos Ambientales).

En general se podría afirmar que los jales situados en la región de Taxco han recibido una inadecuada estabilización de parte de las mineras que han explotados los valores metálicos durante décadas. En 2006, especialistas de la UNAM determinaron que la oxidación de minerales sulfurosos y la falta de condiciones de amortiguamiento en el pH, generaría un drenaje ácido de roca en el jale denominado El Fraile ya que, aunque las concentraciones de varios de los constituyentes metálicos son atenuadas por una serie de reacciones de precipitación y sorción, sus concentraciones elevadas pudieran considerarse en el rango de contaminantes potenciales a dispersarse (F. M. Romero, Armienta, & González-Hernández, 2007).

### 3.1 Estado del arte

Una creciente conciencia de la necesidad de tratar adecuadamente los desechos mineros para proteger el medio ambiente ha llevado a un aumento en la investigación centrada en los residuos mineros y su gestión sostenible en una escala mundial. Una revisión sistemática y un análisis bibliométrico de 3577 artículos realizada por (Aznar-Sánchez, García-Gómez, Velasco-Muñoz, & Carretero-Gómez, 2018) muestra que la investigación sobre los desechos mineros ha aumentado de manera considerable, siendo los estudios centrados en la gestión de residuos mineros casi el 40% del total de estudios relacionados con los residuos mineros.

**Tabla 4.** Países más productivos en investigación de desechos mineros.

País	A	APC	TC	TC/A	R (A)		
					1998-1997	1998-2007	2008-2017
Estados Unidos	613	1.897	13646	22.3	1 (62)	1 (248)	1 (303)
Canadá	499	130752	9050	18.1	3 (21)	2(205)	2(273)
España	339	7.299	7247	21.4	8 (3)	5(99)	3(237)
Australia	301	12.476	4113	13.7	4 (17)	5(99)	5 (185)
China	280	0.203	4364	15.6	14 (1)	7(62)	4(217)
Reino unido	241	3.672	6977	29	2 (32)	3(113)	7(96)
Alemania	187	2.262	3191	17.1	6 (9)	4 (105)	10(73)
India	170	0.128	1492	8.8	8 (3)	8(61)	6(106)
Portugal	104	10.073	1996	19.2	0	21(16)	8(88)
Polonia	103	2.714	935	9.1	8 (3)	13(22)	9(78)

A: número anual de artículos totales; APC: número de artículos por 1 millón de habitantes TC: número anual de citas para todos los artículos; TC / A: número de citas por artículo; R:

**Fuente:** (Aznar-Sánchez et al., 2018)

En otro estudio realizado por (Hengl, Minasny, & Gould, 2009) se llevó a cabo un estudio geo-estadístico de las publicaciones y sus estadísticas de citas, con artículos obtenidos en Web of Science (4000 más relevantes), Scopus (2000 más relevantes) y Google Scholar (5389), teniendo como foco el análisis de la tasa de citas (CR), es decir, el número de citas de un autor o una biblioteca que recibe en promedio por año, como criterio principal para analizar las tendencias globales en geo-estadística. Este reveló grupos de excelencia científica en lugares como Wageningen, Londres, Hampshire, Norwich, París, Lovaina, Barcelona y Zúrich (Europa); Stanford, Tucson, Corvallis, Seattle, Boulder, Montreal, Baltimore, Durham, Santa Bárbara y Los Ángeles relacionado con estudios geo-estadísticos.

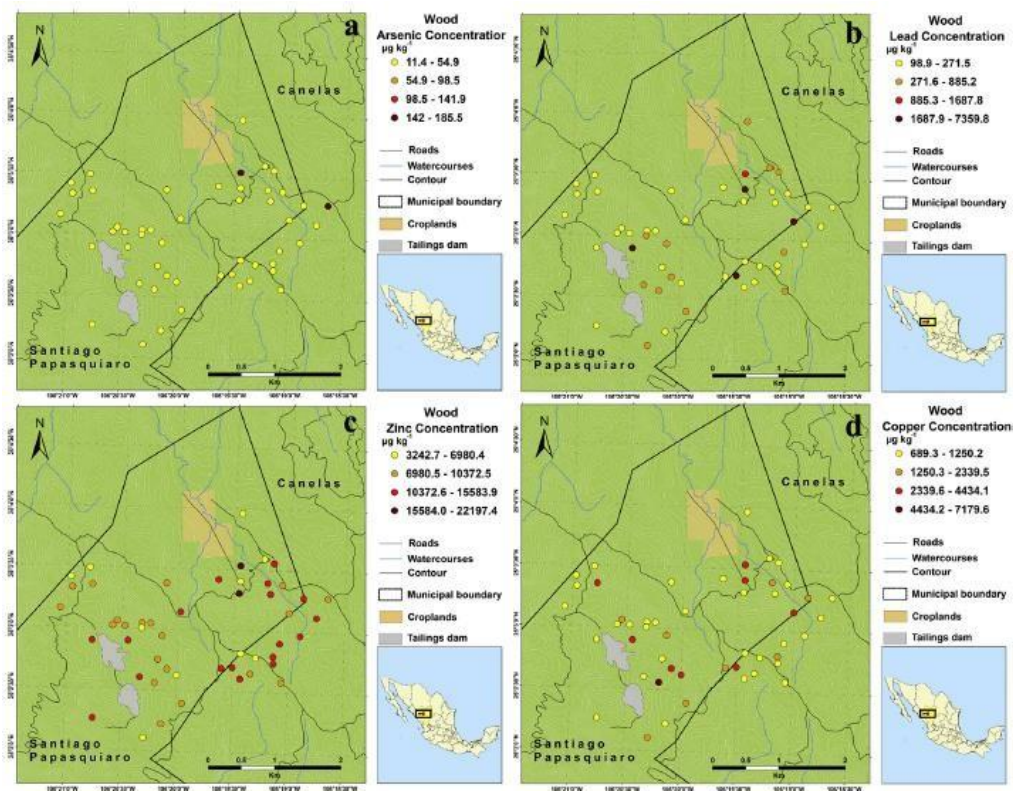
**Tabla 5.** Estudios recientes de contaminación del suelo a nivel mundial con herramientas geo-estadísticas.

Año	País	Título	Herramienta Geo-estadística
2014	E.E.U.U.	Analysis of Heavy Metal Sources in Soil Using Kriging Interpolation on Principal Components.	Kriging
2015	Marruecos	Spatial distribution of soil heavy metals in the Zaida mine (Morocco) based on Geostatistical Methods	Kriging
2016	China	Effects of natural factors on the spatial distribution of heavy metals in soils surrounding mining regions	Kriging
2018	China	Spatial characteristics of heavy metal pollution and the potential ecological risk of a typical mining area: A case study in China	IDW
2019	China	Risk assessment, spatial distribution, and source identification of heavy metal(loid)s in paddy soils along the Zijiang River basin, in Hunan Province, China	Kriging
2019	China	Improvement of Spatial Modeling of Cr, Pb, Cd, As and Ni in Soil Based on Portable X-ray Fluorescence (PXRF) and Geostatistics: A Case Study in East China	Co-kriging
2019	Nigeria	Risk assessment of heavy metals in soil based on the geographic information system-Kriging technique in Anka, Nigeria	Kriging

En el caso específico de México este tipo de herramientas han sido usadas para múltiples estudios con diferentes enfoques, que van desde la distribución de variables climatológicas como la lluvia y la temperatura (Carrera-Hernández & Gaskin, 2007) hasta la interpolación de los valores de radiación solar y evapotranspiración, para el estudio del potencial de producción de microalgas (Lozano-Garcia et al., 2019). Sin embargo, para el caso de la evaluación o análisis de la distribución de contaminantes, se encontró que herramientas geo-



estadísticas fueron usadas de manera satisfactoria en la zona minera de Santiago Papasquiario en donde los resultados obtenidos para evaluar el efecto de la elevación, la distancia a las fuentes de contaminación y el tipo de suelo sobre la distribución de PHE en el suelo encontraron una relación inversamente proporcional entre la concentración de PHE en el suelo y la distancia a las fuentes. (Roque-Álvarez et al., 2018).



**Figura 4.** Concentraciones totales de As, Pb, Zn y Cu en el suelo superficial y tendencias espaciales en el sitio de estudio (a, b, c, d, respectivamente). (Roque-Álvarez et al., 2018)

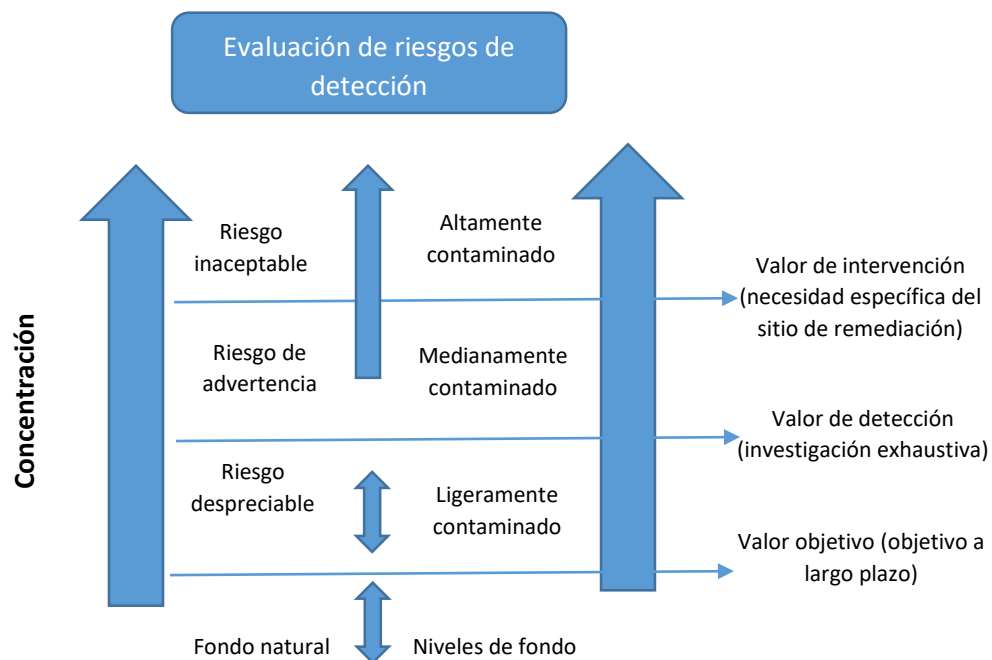
#### 4.1. Estándares de Calidad Ambiental del Suelo

Los Estándares de Calidad Ambiental del Suelo (SCAS) son un instrumento importante para implementar las políticas de protección del suelo. Se pueden aplicar como herramienta de apoyo a la toma de decisiones y en la evaluación de riesgos de suelos contaminados y sus impactos en la salud humana, así como en el análisis de los recursos hídricos.

En los años noventa, la mayoría de los países europeos promulgaron leyes sobre protección del suelo, incluida su contaminación. Existen diferentes nombres para las SCAS en todo el mundo. En general vienen en forma de umbrales de concentración (mg/kg en peso seco de suelo) de contaminantes en el suelo, por encima del cual se recomiendan o hacen cumplir acciones como una mayor investigación o actividades de remediación, además todos los SCAS tienen como objetivo principal la protección de la salud humana, mientras que algunos otros países también incluyen la protección de la función ecológica del suelo y el ecosistema.

Estos estándares al involucrar, elementos científicos y políticos, como la diferenciación en tipos de uso del suelo, consideraciones acerca del receptor, el tipo de riesgo, el nivel de protección, los criterios toxicológicos y ecotoxicológicos, entre otros producen una notoria variación en los valores definidos por estas mismas.(Provoost, Cornelis, & Swartjes, 2006)

De las características anteriores, el uso del suelo (agrícola, residencial, recreativo o industrial) es considerado principalmente por muchos países para definir sus SCAS. Por ejemplo, en los Países Bajos, se evalúan, los riesgos del sitio en función del uso del suelo, para la EPA se utiliza una política pragmática de evaluación de riesgo.(Chen, Wang, Li, Zhao, & E, 2018)



**Figura 5.** Procedimiento de derivación de valores de revisión basado en varios niveles de riesgo y sus aplicaciones asociadas. **Nota:** Tomado de (CHEN et al., 2018)



En el caso de una presunta contaminación, en general se sigue un enfoque escalonado en los que se utilizan estándares de calidad ambiental del suelo como criterio de activación para determinar la necesidad de una investigación preliminar o profunda del suelo o de actividades de remediación, con lo que también varían directamente los costos financieros del manejo del suelo (Fig 5),

En México, se ha establecido como estándar de calidad ambiental del suelo, por el Ministro de Protección Ambiental y la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT / SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por As, Ba, Be, Cd, Cr hexavalente, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y/o V (Tabla 6). Los límites expresados se refieren a suelos y sedimentos utilizados para la agricultura, fines residenciales, comerciales e industriales, pero sin diferenciación alguna. De manera general considera como contaminante, a cualquiera de los elementos mencionados en la norma que esté presente en concentraciones mayores cerca de la superficie del suelo y exceda los límites legales definidos.(Mireles et al., 2012)

**Tabla 6.** Concentraciones de referencia totales (CRt) por tipo de uso de suelo.

Contaminante	Uso agrícola/residencial/comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Arsénico (As)	22	260
Bario (Ba)	5400	67000
Berilio (Be)	150	1900
Cadmio (Cd)	37	450
Cromo hexavalente (Cr VI)	280	510
Mercurio (Hg)	23	310
Níquel (Ni)	1600	20000
Plata (Ag)	390	5100
Plomo (Pb)	400	800
Selenio (Se)	390	5100
Talio (Tl)	5,2	67
Vanadio (V)	78	1000

**Fuente:**(Semarnat, 2007), NOM-147-SEMARNAT/SSA1- 2004.

## 5.1 Índices de contaminación e impacto ecotoxicológico

A pesar del uso común de suelos y sedimentos en la evaluación de la contaminación por metales, su clasificación en diferentes niveles de contaminación y la predicción de los efectos biológicos adversos asociados todavía representan un desafío significativo desde un punto de vista práctico. Se ha propuesto una diversidad de enfoques para enfrentar este desafío siendo en este contexto, el uso de índices de contaminación uno de los enfoques más utilizados, con aproximadamente dieciséis índices propuestos hasta la fecha. (Peña-Icart et al., 2017).

El factor de contaminación (CF), el grado de contaminación (DC), el índice de geoacumulación (Igeo) y el factor de enriquecimiento (EF) se encuentran entre los más utilizados. En estos la cuantificación y clasificación del estado de la contaminación por metales de los sedimentos se basa en la comparación de la concentración total del metal en sedimentos en estudio con el fondo concentraciones. (Peña-Icart et al., 2017).

Sin embargo, entre la debilidades que presentan algunos de estos indicadores de calidad del sedimento, se encuentra que estos definen un umbral cualitativo o se enfocan en la evaluación del riesgo ecológico de un solo metal, a pesar de que la contaminación por metales pesados en el medio ambiente generalmente ocurre en forma de mezclas complejas por lo que los efectos sinérgicos de la contaminación por metales pueden ser de mayor concentración que los efectos de la contaminación metálica individual. (Duodu, Goonetilleke, & Ayoko, 2016).

*Tabla 7. Índices de contaminación por metales pesados dados en la literatura, su aplicación, fortalezas y debilidades*

Índice	Ámbito de aplicación	Fortalezas	Debilidades
Igeo	Valoración de los niveles de contaminación en el suelo por metales pesados individuales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite la comparación de la contaminación anterior y presente</li> <li>• Ampliamente utilizado</li> <li>• Método de cantidad simple</li> <li>• Aplicación GB</li> <li>• 1.5 factor de multiplicación reduce la posible variación de efectos litogénicos</li> <li>• Escala precisa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La elección incorrecta de GB conduce a resultados equivocados</li> <li>• Posible fluctuación natural dentro del GB</li> <li>• Omite la cantidad disponible de metales pesados</li> <li>• No tiene en cuenta la variabilidad geoquímica natural</li> </ul>

<b>EF</b>	Herramienta eficaz para la comparación de contenido de metales pesados Determinación del origen de metales pesados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estima impactos antropogénicos</li> <li>• Valoración del origen de metales pesados</li> <li>• Reduce la variabilidad del metal estandarizando elementos medidos contra uno utilizado para baja variabilidad en la ocurrencia de elementos</li> <li>• Evaluación de la contaminación por metales pesados individuales</li> <li>• Escala precisa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medido con respecto a valores de referencia</li> <li>• Evalúa arriba de la concentración sin contaminación</li> <li>• La clave es la elección de GB apropiado</li> </ul>
<b>Cf</b>	Evaluación de la calidad del suelo. Ayudar a describir las sustancias tóxicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método simple y directo Individual para cada metal.</li> <li>• Comprende la diferencia entre la muestra y los valores de referencia</li> <li>Se obtiene dividiendo la concentración de cada metal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No requiere la variación de los procesos naturales</li> <li>• Omite la capacidad disponible de metales pesados</li> <li>• No incluye GB</li> <li>• Valor de referencia preindustrial es necesario</li> </ul>
<b>PLI</b>	Evaluación del nivel de contaminación/ alcance de los metales pesados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combina cualquier número de metales pesados analizados.</li> <li>• Fácil de aplicar</li> <li>• Ampliamente utilizado</li> <li>• Permite comparar la contaminación en diferentes sitios</li> <li>• Aplicación de GB</li> <li>• Representa el número de veces en que el metal pesado supera su contenido natural en el suelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con respecto a GB</li> <li>• No requiere la variación de los procesos naturales</li> <li>• Omite la disponibilidad de metales pesados</li> </ul>
<p><b>Igeo:</b>Índice de Geoacumulación, <b>EF:</b>factor de enriquecimiento, <b>Cf:</b> factor de contaminación, <b>PLI:</b> Índice de carga de contaminación, <b>GB:</b> fondo geoquímico</p>			

Fuente: (Kowalska, Mazurek, Gąsiorek, & Zaleski, 2018).

## 5.2 Método de evaluación de riesgos para la salud humana

La recolección de muestras, el análisis químico, la evaluación de exposición, el análisis de toxicidad y la simulación de riesgos son los pasos principales para evaluación de riesgos para la salud humana, derivados de la presencia de sustancias tóxicas en el medio ambiente. Estos riesgos se clasificados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) en efectos cancerígenos y no cancerígenos, diseñando un método para la estimación de estos riesgos. (Roy, Singh, & Seo, 2019)



De manera general se puede definir que las personas están expuestas a sustancias potencialmente peligrosas que existen en el suelo, de tres maneras, la ingestión, la inhalación y el contacto con la piel. Estas tres vías de exposición a menudo se utilizan para evaluar el riesgo de exposición de metales a personas tanto en zonas urbanas, como rurales.

### **5.2.1 Riesgo no Cancerígeno**

El riesgo no cancerígeno generalmente se expresa en términos del cociente de peligro (HQ) y el índice de peligro (HI). Determinándose el primero para un contaminante al dividir la ingesta diaria estimada por la dosis de referencia (Rfd) del contaminante, siendo (Rfd) la dosis de referencia (mg /kg /d), que se considera como una estimación de la exposición diaria a la población humana. (Johnbull, Abbassi, & Zytner, 2019)

Varias exposiciones simultáneas a niveles por debajo del umbral podrían sumarse para causar efectos adversos por lo que sumando el HQ de cada metal que tiene un efecto tóxico similar o sobre el mismo órgano pueden indicar si los niveles de riesgos son o no aceptables. HI es la integración del cociente de todas las vías de exposición que tienen efectos tóxicos similares. En general, un HQ de menos de 0.2 se considera aceptable mientras que un valor de más que 0.2 se considera inaceptable. Del mismo modo, un HI de mayor que 1 de varias vías se considera inaceptable dado significa que la población expuesta puede experimentar severos efectos adversos a la salud.(Johnbull et al., 2019)

### **5.2.2 Caracterización del riesgo cancerígeno**

El riesgo cancerígeno se estima como la probabilidad incremental de la aparición de cáncer a lo largo de la vida como resultado de la exposición a un posible contaminante cancerígeno. Exceso de vida incremental de riesgo de cáncer (IELCR) es la terminología para caracterizar el riesgo cancerígeno.



Para resumir el efecto cancerígeno resultante de la exposición a dos o más carcinógenos, se puede calcular el riesgo acumulado objetivo (CTR). Cuando este excede  $1 \times 10^{-4}$  -  $1 \times 10^{-6}$  se requiere una evaluación química más específica; sin embargo, cuando este cae por debajo de  $1 \times 10^{-4}$  -  $1 \times 10^{-6}$  no se requiere ninguna acción desde una perspectiva de salud humana. Estos umbrales se han adoptado porque representan el riesgo para la población expuesta que sobre la que probablemente tendrá un efecto adverso para la salud.(Johnbull et al., 2019)

## 6.1 Geo-Estadística

La difusión de un contaminante en un espacio geográfico y sus características principales son fenómenos impulsados por complejas leyes físicas y químicas influenciadas por parámetros ambientales locales que se extiende en un espacio tridimensional y tiene una naturaleza dinámica. (Deraisme, Bobbia, & Fouquet, 2016)

Dependiendo de la naturaleza y las características de la fuente de contaminación se pueden identificar diferentes rangos de influencia espacial (puntual, local y regional) como se puede notar en casos como el de un halo geoquímico alrededor de un cuerpo mineral, que generalmente tiene una gran extensión y es más probable que sea observado a escala regional, mientras que la contaminación resultante de una pequeña veta mineralizada o de un vertedero de residuos industriales no se extiende mucho y se observaría solo localmente, o en una escala puntual (Benamghar & Gómez-Hernández, 2014)

Predecir la concentración de contaminantes en un punto dado en el espacio en un momento dado y asignar a ese valor una indicación de su fiabilidad está fuera del alcance de los modelos completamente deterministas, por lo que al elegir un marco probabilístico, como la geo-estadística (que espacializa las concentraciones obtenidas) abre el camino a modelos que pueden caracterizarse por observaciones reales para proporcionar respuestas prácticas a preguntas como el valor probable de la concentración de un contaminante en un lugar específico sin medición o la posibilidad de que el nivel de contaminación alcance una concentración admisible en el mismo punto. (Deraisme et al., 2016)



En este mismo sentido si se quisiera evaluar variables como la distancia total hasta la fuente de contaminación, patrones de viento, propiedades químicas del suelo, mineralogía, topografía, contenido de PHE, distribución espacial y la movilidad de metales y por consiguiente el riesgo al que está expuesta una población, los estudios con enfoques geoestadísticos ligados a estudios químicos o mineralógicos se presentan como una metodología ideal. (Roque-Álvarez et al., 2018)

Entre las múltiples herramientas propuestas por la geo-estadística, sobresale un método simple llamado kriging (llamado así por el Dr. Krige) para obtener un mapa de una propiedad específica medida en puntos sobre un área determinada. El método tiene como objetivo interpolar el valor en cualquier punto mediante la asignación de pesos dependiendo de la correlación con las mediciones de datos; esta correlación se cuantifica mediante variograma estimados a partir de estadísticas de dos puntos de los datos. Al introducir otros parámetros o factores medidos que pueden influir en el parámetro de interés, el resultado de la interpolación se puede obtener como una combinación lineal de todos los parámetros en el punto de datos denominado co-kriging. (Deraisme et al., 2016).

De manera general los pasos a seguir para la utilización del método de Kriging son los siguientes:

**Calcular el semivariograma empírico:** Como la mayoría técnicas de interpolación, Kriging se basa en el supuesto geográfico de que los puntos que están cerca unos de otros son más parecidos que los que están más lejos (cuantificado como autocorrelación espacial). El semivariograma empírico es un medio para explorar esta relación. Pares que están cerca deben tener una diferencia de medición menor que los más alejados unos de otros. (Krivoruchko & Lucas, 2014)

**Ajustar un modelo:** Definir una línea que proporcione el mejor encaje a través de los puntos en el gráfico de nube del semivariograma empírico. Es decir, encontrar una línea tal que el cuadrado de la diferencia (ponderado) entre cada punto y la línea es lo más pequeña posible. Esta línea se considera como un modelo que cuantifica la auto correlación espacial en la información. (Krivoruchko & Lucas, 2014)



# Capítulo

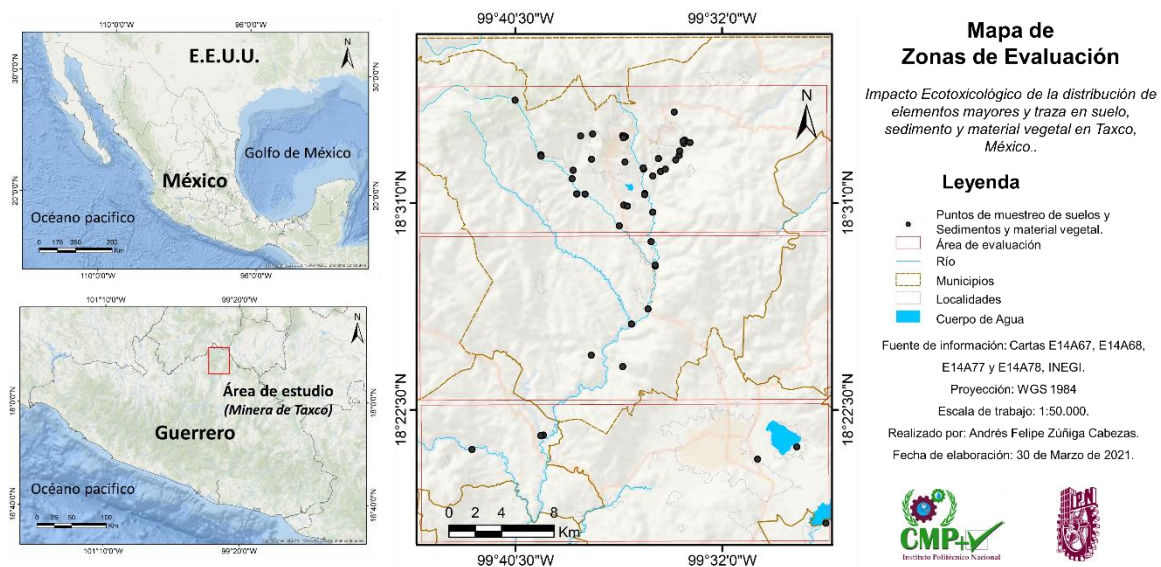
# 2

## Capítulo 2. Metodología

### 1.1 Área de estudio

El área minera de Taxco se encuentra al norte del estado de Guerrero, en el municipio de Taxco de Alarcón, dentro de las coordenadas  $18^{\circ}30'$  a  $18^{\circ}35'$  N y  $99^{\circ}35'$  a  $99^{\circ}40'$  O (Figura 6) y ha sido una de las zonas más importantes para la producción de metales básicos y preciosos desde tiempos prehispánicos. En esta zona aparece mineralización principalmente en venas hidrotermales y minerales de reemplazo alojados en piedra caliza, pizarra y esquisto. (Dótor Almazán et al., 2014)

Los principales minerales sulfurados de la zona son la pirita (10–15%), la esfalerita (11%) y la galena (4%), siendo los principales minerales de ganga, el cuarzo, la calcita y el feldespato. Con menor presencia de otros minerales y con concentraciones aún menores de goethita, hematita, cerusita, anglesita, melanterita y barita. (F. M. Romero et al., 2007)



**Figura 6.** Ubicación general de la zona de estudio



La zona se localiza en la parte media superior de la cuenca hidrográfica del Balsas específicamente en la subregión Medio Balsas de la Región Hidrológica N° 18 y en la región administrativa IV Balsas. Cuenta con elevaciones de hasta 2,400 msnm hacia la parte norte y elevaciones de hasta 1,200 msnm en las partes más bajas localizadas al sur; con presencia de cañadas en la zona central (Méndez-Ramírez & Hernández, 2012). Los principales ríos del área son el Cacalotenango (longitud de 11.5 km) y el Taxco (longitud de 29.3 km), cuyos flujos se unen al sur de la ciudad de Taxco en el poblado de Taxco el Viejo para formar el río Iguala y/o Cocula, cuya longitud es de 75 km.(Dótor Almazán et al., 2014).

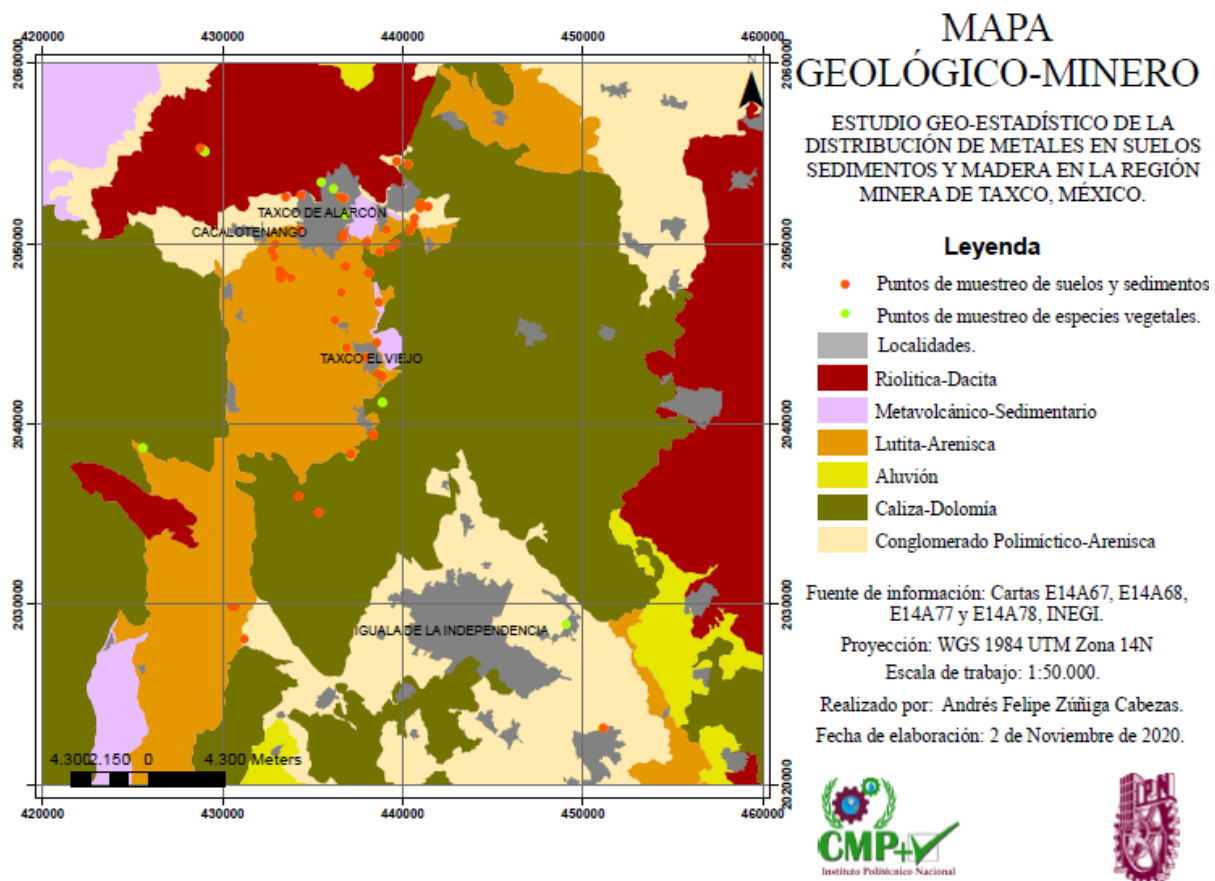


Figura 7. Mapa Geológico-Minero de la zona de estudio

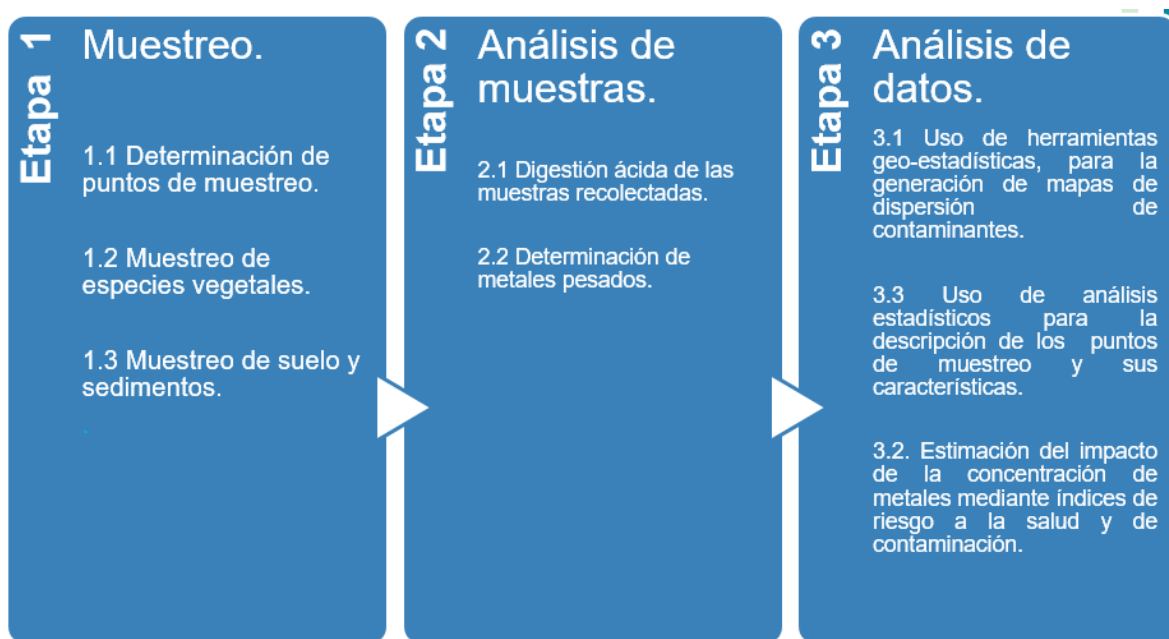
Respecto a los jales de desechos mineros que se encuentran en la zona, los jales de la Concha y El Fraile están cerca de los pueblos de El Fraile, Santa Rosa, Dolores y el río Cacalotenango. Los jales Guerrero (I y II) están ubicados cerca de la comunidad Xochula y

el arroyo Xochula, el cual desemboca en el río Taxco, finalmente, está el jal Solares que se encuentran a menos de 1 km al S-E de la ciudad de Taxco.(Dótor-Almazán et al., 2017)

El área se encuentra a una altitud de 1700 msnm, y por su cercanía al mar el clima de la región es cálido y subhúmedo con una temperatura media anual de entre 26 y 30 °C con un mínimo de 12 °C y un máximo de °35 C. Para la precipitación el registro histórico indica un promedio anual del orden de 1000 mm. Sin embargo, la precipitación se concentra de junio a octubre con valores máximos en septiembre y temperaturas máximas de 35 °C están registrados en estos meses favoreciendo la evapo-transpiración. De diciembre a mayo las precipitaciones son escasos con valores mínimos en febrero (1,2 mm).(F. M. Romero et al., 2007).

## 1.2 Metodología

A continuación, se detalla la metodología que se siguió en la presente investigación, explicando las tres etapas que comprendió: un muestreo, el análisis de las muestras colectadas, y el análisis de los resultados identificados (Figura 8).



**Figura 8.** Procedimiento metodológico general

## 1.2.1 Etapa 1. Muestreo

### 1.2.1.1 Determinación de puntos de muestreo

El trabajo de campo se realizó a través del reconocimiento del área de estudio a través de visitas de campo para la observación, verificación, detección y tipificación de las posibles zonas contaminadas que constituyen algún grado de amenaza a las distintas fuentes de agua, suelo y material vegetal en las diferentes comunidades.

Para ello se contó con el apoyo del gobierno local del municipio de Taxco y del municipio de Iguala, por medio de sus procuradurías ambientales; asimismo apoyaron en el proceso de la definición de los sitios de muestreo y de la colecta los comisariados ejidales y comunales, y OSC involucradas en la protección del medio ambiente como la OSC “Salvemos al río”. Dichos actores, ayudaron a que la visita de campo fuera ágil y mejor dirigida para identificar los puntos de muestreo de este estudio, además de facilitar que las brigadas entraran a terrenos privados para la colecta de muestras, las cuales se realizaron los días 27, 28 y 29, de julio de 2019 entre 08:30 y las 20:00 horas en el municipio de Taxco, Guerrero y sus alrededores. El muestreo colectó suelo, sedimento, agua y material vegetal en aproximadamente 61 sitios identificados por los actores clave como lugares potencialmente contaminados o fuentes relevantes de agua para la población.

De los 61 puntos de muestreo resultado del trabajo de campo realizado en la zona de estudio con sus coordenadas y el tipo de matriz de la muestra se encuentran contenidos en la Tabla 8.

*Tabla 8. Puntos de muestreo, ID Coordenadas y matriz para la zona de estudio.*

ID	Coordenada X	Coordenada Y	Matriz
1	-99.5660680555555	18.5790361111111	■
2	-99.5995461111111	18.5621150000000	●
3	-99.5872861111111	18.5407450000000	■
4	-99.5754000000000	18.5382780555555	■◆
5	-99.5807230555555	18.5352761111111	●
6	-99.5627819444444	18.5492830555555	■◆



7	-99.5595550000000	18.5574538888888	■ ◆
8	-99.5623688888888	18.5523969444444	●
9	-99.5769050000000	18.5471550000000	● ◆
10	-99.6220369444444	18.5639330555555	■ ◆
11	-99.6226869444444	18.5466369444444	● ◆
12	-99.5998769444444	18.5447469444444	●
13	-99.5790088888888	18.4734719444444	■
14	-99.5791111111111	18.4742838888888	■
15	-99.5819400000000	18.4901930555555	■
16	-99.5807961111111	18.5104269444444	■ ◆
17	-99.5870780555555	18.5399830555555	■
18	-99.6006180555555	18.5152919444444	● ◆
19	-99.6353450000000	18.5391288888888	● ◆
20	-99.6328788888888	18.5228300000000	■ ◆
21	-99.5553911111111	18.5581730555555	■ ◆
22	-99.5588669444444	18.5598630555555	■
23	-99.5650888888888	18.5462988888888	■ ◆
24	-99.5600230555555	18.5592019444444	■
25	-99.5721188888888	18.5398430555555	■
26	-99.6272080555555	18.5227888888888	■
27	-99.6328419444444	18.5228300000000	■ ◆
28	-99.5840038888888	18.4441588888888	■ ◆
29	-99.5953930555555	18.4338330555555	● ◆
30	-99.6328561111111	18.5228338888888	■ ◆
31	-99.5952872222222	18.4337238888888	● ◆
32	-99.6329480555555	18.5229511111111	● ◆
33	-99.6328949999999	18.5228569444444	■ ◆
34	-99.6229538888888	18.4124761111111	●
35	-99.5863319444444	18.5232683333333	●
36	-99.6750919444444	18.5871661111111	■ ◆
37	-99.6301988888888	18.5626219444444	■
38	-99.6036819444444	18.5011411111111	■
39	-99.6014338888888	18.5628988888888	●
40	-99.5872861111111	18.5407450000000	■
41	-99.6360230555555	18.5333819444444	● ◆
42	-99.6574572222222	18.5497313888888	●



43	-99.6573858333333	18.5488986111111	■
44	-99.6750919444444	18.5871661111111	■
45	-99.6014338888888	18.4046288888888	■ ♦
46	-99.6004827777777	18.5626288888888	●
47	-99.5863238888888	18.5224580555555	● ♦
48	-99.6009000000000	18.5614797222222	●
49	-99.5981483333333	18.5146161111111	●
50	-99.6557100000000	18.3576588888888	■
51	-99.4621711111111	18.2973450000000	■
52	-99.5090194444446	18.3412430555555	●
53	-99.4820761111111	18.3496199999999	■
54	-99.6572850000000	18.5487872222222	■ ♦
55	-99.6576038888889	18.3573919444444	■
56	-99.7046858333333	18.3478011111111	■
57	-99.5840369444444	18.4441561111111	■ ♦
58	-99.6334111111111	18.5264238888888	♦
59	-99.5864438888888	18.5252549999999	♦
60	-99.5869569444444	18.5398288888888	♦
61	-99.6574572222222	18.5497313888888	♦
62	-99.6328399999999	18.5228011111111	♦

■ = Sedimentos, ● = Suelos y ♦ = Material Vegetal.

### 1.2.1.2 Brigadas de muestreo

Para la recolección de las de muestras de suelo, sedimento y material vegetal se conformaron 5 brigadas, las cuales realizaron la colecta con base en las rutas previamente definidas. Cada brigada estuvo conformada entre 4 y 5 miembros de los participantes de un taller de capacitación para la colecta de las muestras con base en las NOMs; brigadas que fueron acompañadas 1 o 2 miembros de la procuraduría ambiental del municipio de Taxco, para obtener alrededor de 20 muestras de agua, suelo y material vegetal por duplicado para su validación.

Debido a la lejanía y problemas de accesibilidad en algunos de los puntos de muestreo, la toma de muestras se realizó en un periodo 3 días, en donde también se encontró que incluso



con las medidas tomadas en algunos puntos no fue posible coleccionar dichas muestras por su inaccesibilidad o por estar en zonas identificadas de peligro por conflictos sociales o por inseguridad, razón por la cual se optó por no realizar la colecta en los mismos.

Las 5 rutas comprendidas por cada brigada y los puntos de muestreo fueron las siguientes:

**Brigada 1:** Abarcó 13 puntos ubicados en las localidades de Taxco el Viejo, Xochula y Huamantla.

**Brigada 2:** Comprendió 12 puntos ubicados en las localidades de Totoapa, Icatepec y Temascalapa.

**Brigada 3:** Cubrió 11 puntos ubicados en las localidades de Tlamacazapa, Acamixtla, Huajojutla, Tehuilotepic y San Juan de Dios.

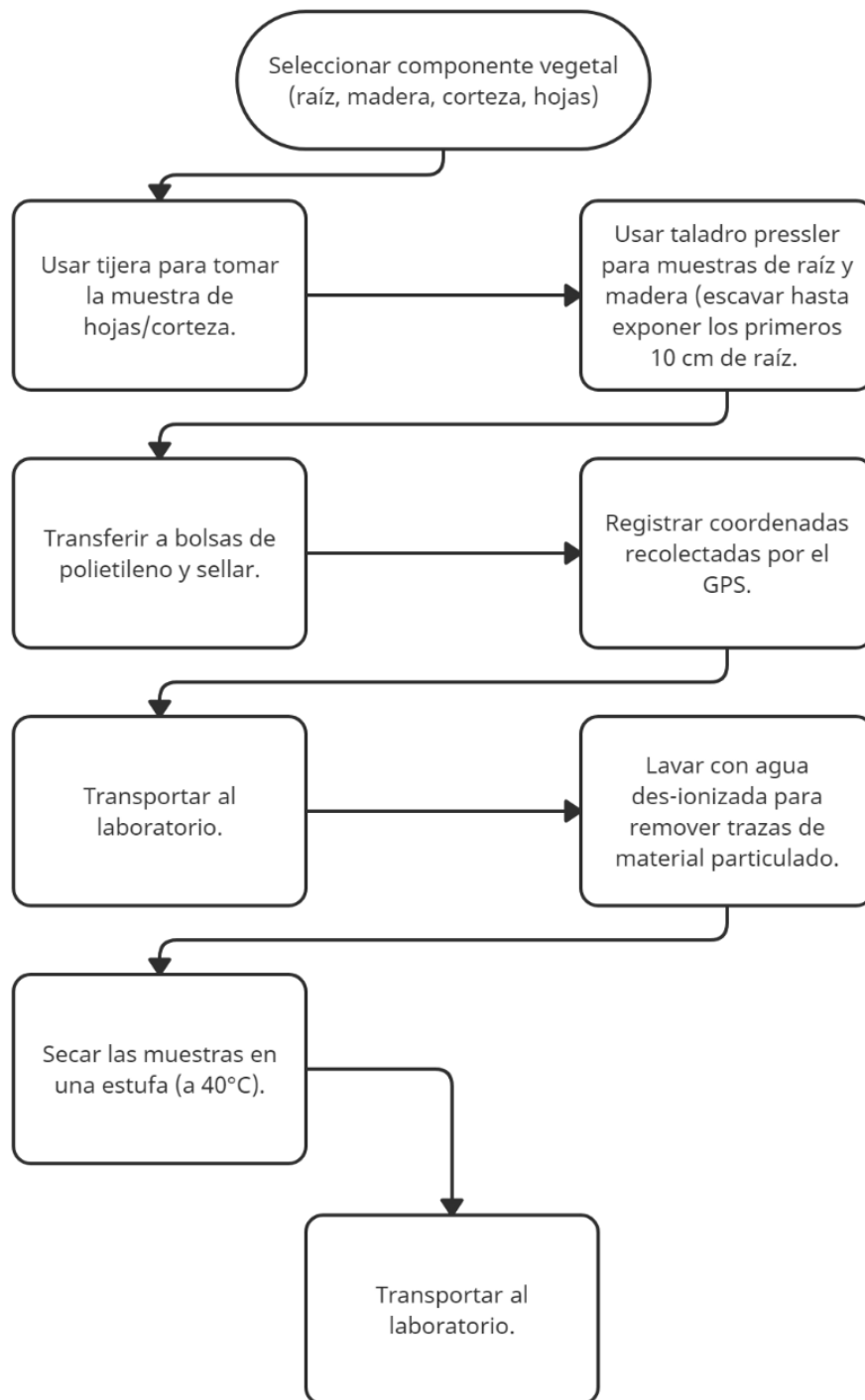
**Brigada 4:** Abarcó 14 puntos ubicados en las localidades de Chacoalco, El Chorrillo y Capilintla.

**Brigada 5:** Comprendió 11 puntos ubicados en las localidades de Dolores, Santa Rosa, Cacalotenango, Huizotla y El Fraile.

Cabe mencionar, que la colecta realizada comprendió el periodo de lluvia, por lo que se espera que los contaminantes identificados en estas muestras estén presentes en menores concentración, en lo que se esperaría encontrar para las muestras colectadas durante el periodo de estiaje.

### *1.2.1.3 Muestreo de especies vegetales*

Se definió la metodología para la toma de muestras de especies vegetales, contenida en la Figura 9.



**Figura 9.** Diagrama de proceso para la toma de muestras de material vegetal.

#### 1.2.1.4 Muestreo de suelo y sedimento.

Los pasos a seguir para el muestreo de suelo basado en los conceptos generales definidos por la NOM-SSA1-147-2004, la cual establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por As, Ba, Be, Cd, Cr hexavalente, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y/o V, fueron resumidos en la figura 10.

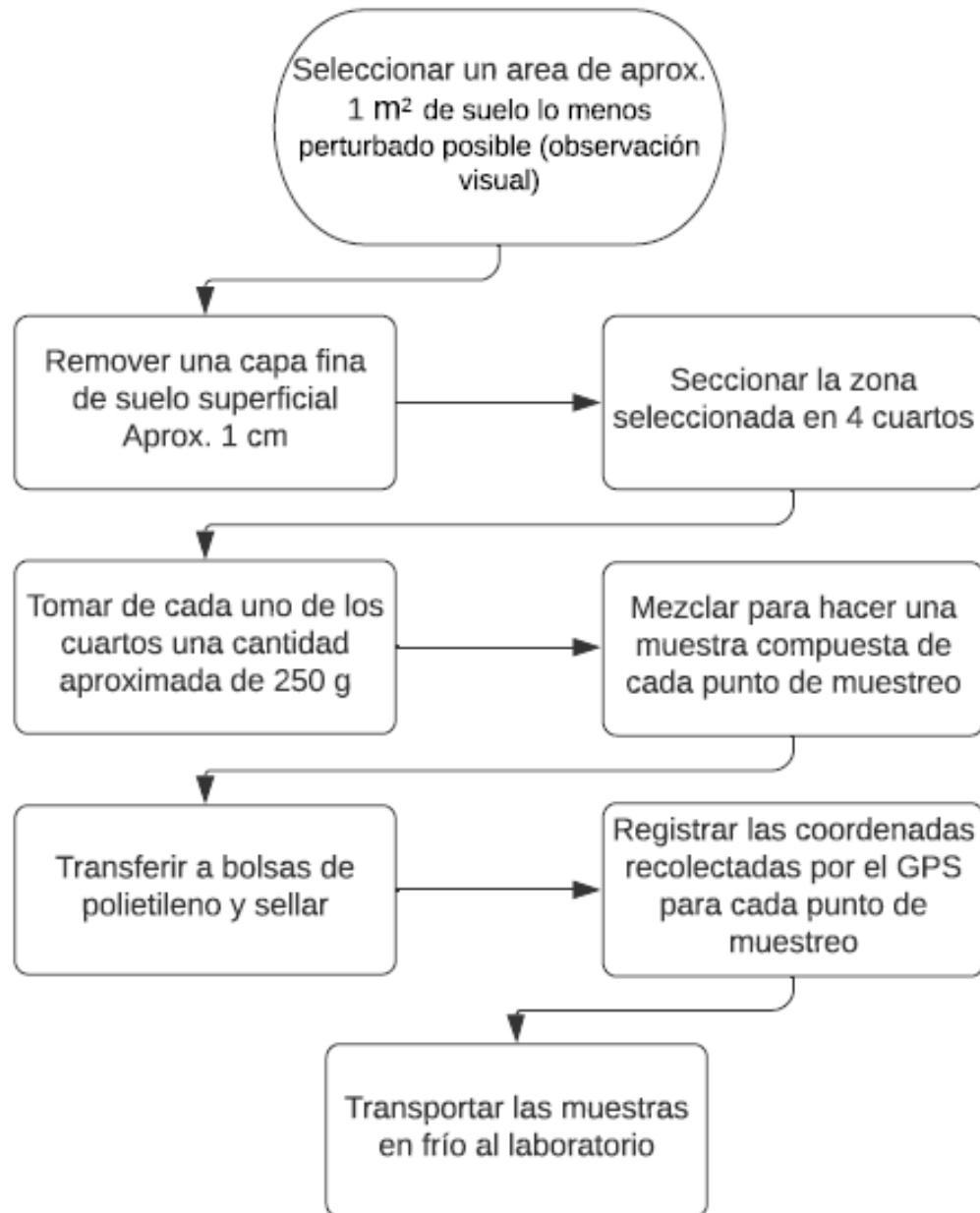


Figura 10. Diagrama de proceso para la toma de muestras de suelos y sedimentos.





## **1.2.2 Etapa 2. Análisis de muestras.**

### ***1.2.2.1 Digestión acida de muestras de suelo y sedimento***

El análisis de las muestras de suelo y sedimento se realizó en el laboratorio externo Actlabs con el servicio *Ultratrace 1-Aqua Regia- ICP-MS*, en este método se utiliza una muestra de 0,5 g que se digiere en agua regia a 90 °C en un bloque de digestión controlado por microprocesador durante 2 horas. Las muestras digeridas se diluyen y se analizan por ICP-MS. Se realiza un blanco por cada 68 muestras. Se realiza un control interno cada 33 muestras. Los estándares digeridos se ejecutan cada 68 muestras. Después de cada 15 muestras, se analiza un duplicado de digestión. El instrumento se recalibra cada 68 muestras.

Esta digestión utiliza una combinación de ácidos clorhídrico y nítrico concentrados para lixiviar sulfuros, algunos óxidos y algunos silicatos. Las fases minerales que apenas son atacadas (si es que se atacan) incluyen la barita, el circón, monacita, esfena, cromita, gahnita, granate, ilmenita, rutilo y casiterita. El resto de los silicatos y óxidos sólo son ligeramente o moderadamente atacados, dependiendo del grado de alteración. En general, pero la mayoría de los metales básicos y el oro se disuelven suelen estar disueltos.

### ***1.2.2.2 Digestión de muestras de material vegetal.***

A diferencia del proceso de digestión de las muestras de suelo y sedimento; para la digestión de las muestras de material vegetal, no se encontraron metodologías definidas y avaladas por instituciones reconocidas o por su amplio uso en el ámbito de la investigación, por lo que la revisión de la bibliografía se centró en la búsqueda de métodos para la digestión de material vegetal utilizadas en investigaciones afines con los objetivos y características de este estudio.

De acuerdo a los resultados encontrados por (Tafur-Marinos, Ginepro, Pastero, & Zelano, 2016), el método determinado como “húmedo” para la digestión de muestras de material

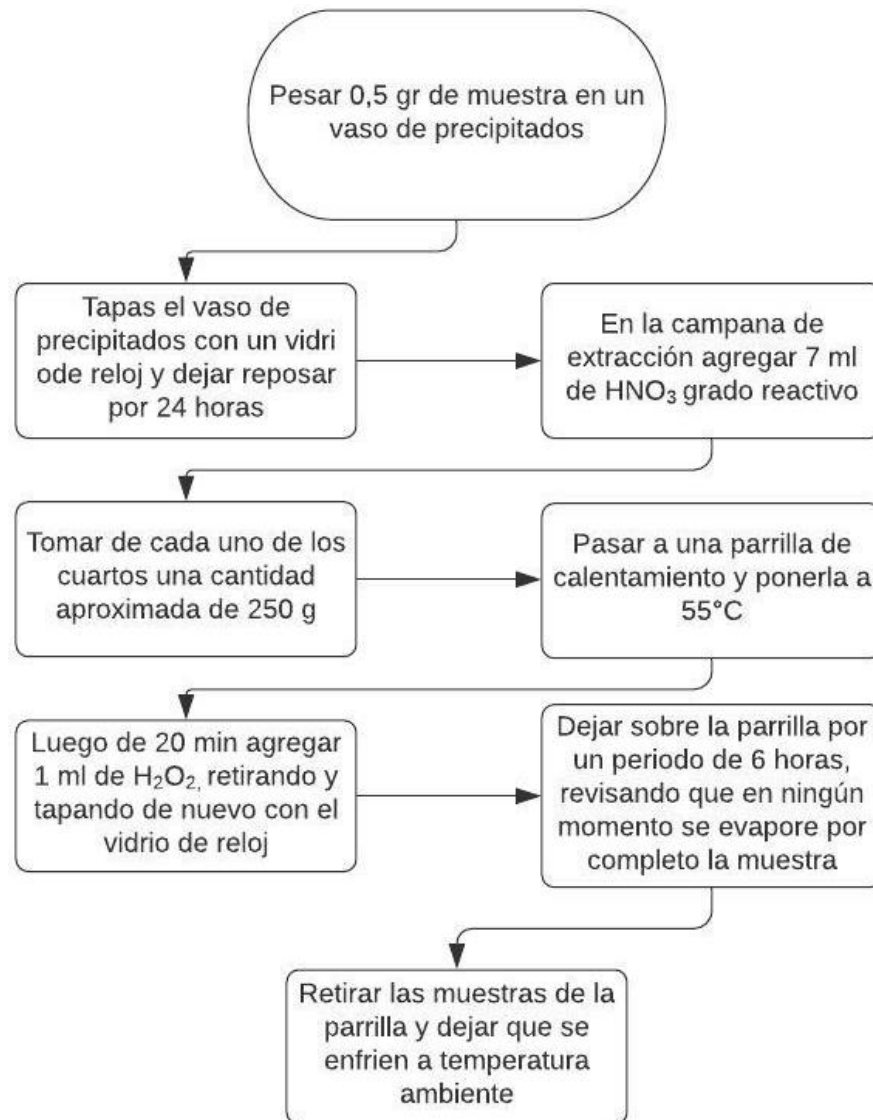


vegetal que consiste en poner 5 g de muestra y 15 ml de  $\text{HNO}_3$  en matraces de 200 ml hirviendo durante la noche. Posteriormente se añade 10 ml de  $\text{HNO}_3$  con reflujo sobre una parrilla caliente durante 6 h, para luego añadir 20 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  que nuevamente se someten a reflujo por 2 hr adicionales, Con base en este procedimiento, se determinó con precisión los elementos con excepción del aluminio y el silicio, además de ser considerado este método como adecuado para el análisis de la material vegetal, y poseer la ventaja de presentar resultados dentro el límite de detección del equipo de ICP-OES utilizado en el estudio a diferencia del método de digestión por microondas. Adicionalmente en estudios como el realizado por (Orça, Usufi, Itaku, & Uka, 2019) se utilizaron métodos similares a este pero con una cantidad de muestra menor (1g) con resultados positivos.

Por lo que, con la base de los datos encontrados, se siguió el procedimiento descrito en la Figura 11.

El procedimiento de análisis de cada una de las muestras digeridas de las cuatro matrices evaluadas se realizó por espectrofotometría de emisión atómica inducida por plasma, el cual presenta características como una excelente precisión, límites bajos de detección (hasta 0,001 ppm), así como un amplio espectro de metales detectables luego de un adecuado proceso de digestión. (Cazes, 2004 ).

Para el análisis de metales se empleó el método normalizado, propuesto por (Navarrete-López, Jonathan, Rodríguez-Espinosa, & Salgado-Galeana, 2012).



**Figura 11.** Procedimiento de digestión de muestras de material vegetal.

### 1.2.3 Etapa 3. Análisis de Datos.

#### 1.2.3.1 Factor de translocación

El factor de translocación (TF) se calculó dividiendo las concentraciones de metales en los tejidos aéreos (hojas) por las acumuladas en los tejidos de la raíz, de las especies vegetales a evaluar. La ecuación que describe el factor de translocación es la siguiente:

$$TF = \frac{C_i}{C_r}$$

donde  $C_i$  es la concentración de metal en los tejidos aéreos (mg/kg-seco) y  $C_r$  es la concentración de metal en las raíces (mg/kg-seco). Los valores más altos de TF corresponden a las especies acumuladoras y los valores más bajos a las especies que excluyen los metales pesados. En general los valores superiores a 1 indican una capacidad de transporte de metales pesados desde la raíz a la hoja y probablemente el secuestro de metales en la biomasa. (Huerta & Hernández, 2012)

### 1.2.3.2 Índice de geo-acumulación (*I<sub>geo</sub>*)

Müller definió originalmente un índice de geo-acumulación (*I<sub>geo</sub>*) en 1969, a fin de determinar y definir la contaminación por metales en los sedimentos, comparando las concentraciones actuales con los niveles preindustriales. (Qingjie, Jun, Yunchuan, Qingfei, & Liqiang, 2008)

Este índice se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

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

donde  $C_n$  es el valor de concentración del metal  $n$  en el suelo y  $B_n$  es el valor de referencia de fondo en la corteza terrestre para el metal  $n$ . El factor 1.5 se usa para minimizar el efecto de posibles cambios en los valores de fondo litogénicos en el suelo. (Baltas, Sirin, Gökbayrak, & Ozcelik, 2020)

Para el cálculo de los valores de base se tomaron en cuenta la concentración de metales encontradas en los puntos alejados de las fuentes de contaminación, que se espera estén libres de contaminación antropogénica.

La geo-acumulación definida por el índice fue distinguida en siete clases por Müller:  $I_{geo} \leq 0$ , clase 0, impoluto;  $0 < I_{geo} \leq 1$ , clase 1, de no contaminado a moderadamente contaminado;  $1 < I_{geo} \leq 2$ , clase 2, moderadamente contaminado;  $2 < I_{geo} \leq 3$ , clase 3, de moderadamente a fuertemente contaminado;  $3 < I_{geo} \leq 4$ , clase 4, muy contaminado;  $4 < I_{geo} \leq 5$ , clase 5, de muy

contaminado a extremadamente contaminado; e  $I_{geo} > 5$ , clase 6, extremadamente contaminado. Estos resultados se detallan en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Calidad del suelo según los valores del Índice de Geo-acumulación

Clases	Valores de $I_{geo}$	Calidad del suelo
0	$I \leq 0$	No contaminado
1	0-1	No contaminado a moderadamente contaminado
2	1-2	Moderadamente contaminado
3	2-3	Moderadamente a muy contaminado
4	3-4	Muy contaminado
5	4-5	Muy contaminado a extremadamente contaminado
6	5-6	Extremadamente contaminado

**Fuente:** (Kowalska et al., 2018)

### 1.2.3.3. Factor de enriquecimiento (FE)

Este índice, compara la relación del elemento de interés con un "elemento conservador", para identificar el impacto esperado de la antropogénesis en las concentraciones de metales pesados en el suelo. El contenido de metales pesados caracterizado por una baja variabilidad de ocurrencia se utiliza como referencia o "elemento conservador", tanto en las muestras analizadas como en las de referencia. (Duodu et al., 2016) Los elementos de referencia son generalmente Fe, Al, Ca, Ti, Sc o Mn (que se supone que no tienen influencia antropogénica y que está poco o no afectado por el clima). (Kowalska et al., 2018). La ecuación utilizada para estimar el factor de enriquecimiento es la siguiente:

$$E_f = \frac{\left(\frac{C_i}{C_{ie}}\right)_S}{\left(\frac{C_i}{C_{ie}}\right)_{RS}}$$

Cinco categorías de contaminación se reconocen generalmente en función del factor de enriquecimiento:  $E_f < 2$ , agotamiento del enriquecimiento mineral;  $2 \leq E_f < 5$ ,

enriquecimiento moderado;  $5 \leq EF < 20$ , significativo enriquecimiento;  $20 \leq EF < 40$ , muy alto enriquecimiento; y  $EF > 40$ , enriquecimiento extremadamente alto. (Qingjie et al., 2008).

**Tabla 10.** Calidad del suelo según los valores del Factor de enriquecimiento

Valor de EF	Enriquecimiento del suelo
< 2	Deficiencia al enriquecimiento mínimo
2-5	Enriquecimiento moderado
5-20	Enriquecimiento significativo
20-40	Enriquecimiento muy alto
> 40	Enriquecimiento extremadamente alto

**Fuente:** (Kowalska et al., 2018)

#### 1.2.3.4 Factor de Contaminación (Cf)

La evaluación de la contaminación del suelo también puede realizarse mediante el Cf. Este índice permite evaluar la contaminación del suelo, teniendo en cuenta el contenido de metales proporciona una relación entre un elemento en el lugar de muestreo en la superficie del suelo y el mismo elemento en un lugar de fondo de los niveles de referencia preindustriales, el Cf se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$Cf = \frac{C_m}{C_{p-i}}$$

donde  $C_m$ - contenido medio de metal pesado de al menos cinco muestras de metales individuales y  $C_{p-i}$ - valor de referencia industrial de las sustancias, que se refiere a la concentración de metal de interés en el suelo sin aporte antropogénico. (Kowalska et al., 2018)

**Tabla 11.** Calidad del suelo según los valores del Factor de contaminación

$C_f$ valor	Contaminación
< 1	Baja contaminación
1-3	Contaminación moderada
3-6	Contaminación considerable
> 6	Contaminación muy alta

**Fuente:** (Kowalska et al., 2018)



### 1.2.3.5 Índice de carga contaminante (PLI)

Para la evaluación total del grado de contaminación del suelo, también se utiliza el Índice de carga contaminante o PLI (por sus siglas en ingles). Este índice proporciona una forma fácil de demostrar el deterioro de las condiciones del suelo como resultado de la acumulación de metales pesados, por lo que muestra el estado de toxicidad general de la zona de muestreo para los elementos calculados. El PLI se calcula como una media geométrica de PI basada en la siguiente fórmula:

$$PLI = \sqrt[n]{Cf_1 \times Cf_2 \times Cf_3 \dots \dots \dots \times Cf_n}$$

donde n es el número de elementos de metales pesados analizados. Este índice proporciona un medio sencillo y comparativo para evaluar el nivel de contaminación por metales pesados, si el valor del PLI es superior a 1 ( $PLI > 1$ ), la zona investigada está contaminada por metales, y si el valor del PLI es inferior a 1 ( $PLI < 1$ ), no hay contaminación por metales en la zona investigada.(Varol, 2011).

**Tabla 12.** Categorías de contaminación del Índice de Carga de Contaminación

Valores de <i>PLI</i>	Estado de la contaminación
< 1	denota la perfección
1	Sólo los niveles básicos de contaminación
> 1	deterioro de la calidad del suelo

**Fuente:** (Kowalska et al., 2018)

### 1.2.3.6. Grado de contaminación (Cdeg) y Grado de contaminación modificado (mCd)

Para simplificar el control de la contaminación, Hakanson, sugirió un método que utiliza una herramienta de diagnóstico denominada grado de contaminación (Cdeg). El Cd se calculó como:

$$Cdeg = \sum_{i=1}^{i=n} Cf$$

donde Cf (factor de contaminación) para cada muestra y n, es el número de metales pesados analizados.(Devanesan, Suresh Gandhi, Selvapandiyam, Senthilkumar, & Ravisankar, 2017).

El grado de contaminación modificado fue utilizado por primera vez por Abrahin y Parker ; este índice permite evaluar la contaminación global del suelo por metales pesados, donde  $n$  = número de elementos analizados,  $i$  =  $i$ -ésimo elemento y  $CF$  = factor de contaminación. Para la clasificación y descripción del grado de contaminación modificado ( $mCd$ ) en el sedimento, se proponen las siguientes gradaciones:  $mCd < 1,5$  es un grado de contaminación de nulo a muy bajo;  $1,5$  grado de contaminación;  $1,5 mCd < 2$  es un grado de contaminación bajo;  $2 mCd < 4$  es un grado de contaminación moderado;  $4 mCd < 8$  es un alto grado de contaminación;  $8 mCd < 16$  es un muy alto grado de contaminación;  $16 mCd < 32$  es un grado de contaminación extremadamente alto grado de contaminación.(Devanesan et al., 2017).

**Tabla 13.** Categorías de contaminación del grado de contaminación y el grado de contaminación modificado

Valor $C_{deg}$	Contaminación	Valor $mCd$	Contaminación
< 8	Bajo grado de contaminación	< 1.5	Muy bajo
		1.5-2	Bajo
8-16	Grado de contaminación moderado	2-4	Moderado
		4-8	Alto
16-32	Grado considerable de contaminación	8-16	Muy alto
		16-32	Extremadamente alto
> 32	Grado de contaminación muy elevado	> 32	Ultra alto

**Fuente:** (Kowalska et al., 2018)

### 1.2.3.7 índice de riesgo ecológico potencial (RI)

El método del índice de riesgo ecológico potencial (RI) fue propuesto para evaluar las características y el comportamiento ambiental de los contaminantes metálicos pesados en los sedimentos. La función principal de este índice es indicar dónde los estudios de contaminación deben ser prioritarios. El índice de riesgo ecológico (RI) se introdujo para evaluar el grado de contaminación por metales pesados en los sedimentos, según la toxicidad de estos en los sedimentos y la respuesta del medio ambiente. Se calcula como la suma de todos los factores de riesgo de los metales pesados en los sedimentos, donde  $E_r^i$  es el factor de riesgo ecológico potencial,  $C_f$  es el factor de contaminación y  $T_r^i$  es el factor de respuesta tóxica, que representa el peligro potencial de la contaminación por metales pesados indicando la toxicidad de determinados metales y la sensibilidad ambiental a la contaminación. Según





el factor de respuesta tóxica normalizado propuesto por Hakanson Cr, Ei r As, Ni, Pb y Zn tienen factores de respuesta tóxicos de 2, 5, 5, 5 y 1, respectivamente.(Devanesan et al., 2017). Su fórmulas es la siguiente:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

donde n es el número de metales pesados y  $E_r^i$  es el índice único del factor de riesgo ecológico calculado en base a la ecuación:

$$E_r^i = T_r^i \times CF$$

donde  $T_r^i$  es el coeficiente de respuesta de toxicidad de un metal individual.

**Tabla 14.** Categorías de contaminación del Índice de riesgo ecológico potencial

RI	Riesgo ecológico potencial
< 90	Bajo
90-180	Moderado
180-360	Fuerte
360-720	Muy fuerte
≥ 720	Altamente fuerte

**Fuente:** (Kowalska et al., 2018)

### 1.2.3.8 Análisis estadístico

#### **Análisis Bivariado: Matriz de Correlación de Pearson**

Una matriz de correlación es un tipo especial de matriz de covarianza que se ha calculado sobre variables que han sido previamente estandarizadas para tener una media de 0 y una desviación estándar de 1.0.

Las correlaciones positivas implican una relación directa, y las correlaciones negativas una inversa. Asimismo, las correlaciones cercanas a 0 denotan que no hay asociación estadística o predictibilidad entre las dos variables. Las correlaciones que se desvían de 0 en dirección positiva o negativa indican una mayor asociación estadística y predictibilidad.



El coeficiente de correlación se distingue de otros tipos de covarianza al tener un límite matemático inferior de  $-1,0$  y superior de  $1,0$ . Lo que permite comparar los coeficientes de correlación, mientras que las covarianzas ordinarias normalmente no se pueden comparar.

#### ***Análisis Multivariado: Componentes Principales.***

El análisis factorial es un conjunto de métodos utilizados para examinar cómo los constructos subyacentes determinan las respuestas sobre una serie de variables medidas. Existen básicamente dos tipos de análisis factorial: exploratorio y confirmatorio.

El análisis factorial exploratorio (AFE) trata de descubrir la naturaleza de los constructos que influyen en un conjunto de respuestas. Por otro lado el análisis factorial confirmatorio (AFC) comprueba si un conjunto específico de constructos influye en las respuestas de una forma prevista.

Ambos tipos de análisis están basados en el modelo factorial común, que propone que cada respuesta observada es afectada por factores comunes subyacentes y parcialmente por factores únicos subyacentes. La fuerza del vínculo entre cada factor y cada medida varía, de modo que un factor determinado influye más en una medida que en otra.

Se realizan examinando el patrón de correlaciones (o covarianzas) entre las medidas observadas. Las medidas muy correlacionadas (positiva o negativamente) están probablemente influidas por los mismos factores, mientras que las que están relativamente no correlacionadas probablemente estén influidas por factores diferentes.

#### ***1.2.3.9 Estimación del impacto de la concentración de metales mediante índices de riesgo a la salud.***

##### ***Análisis de exposición.***

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) clasificó los riesgos para la salud humana derivados de la presencia de sustancias tóxicas en el medio ambiente en



efectos cancerígenos y no cancerígenos. En este sentido las personas están expuestas a metales y metaloides que existen en el suelo; dicha exposición se puede presentar de tres maneras diferentes, ingestión, inhalación y por contacto dérmico.

Estas tres vías de exposición a menudo se utilizan para evaluar el riesgo de exposición a metales a personas en áreas urbanas y rurales. Por lo que para la determinación de los posibles riesgos potenciales a la salud de las poblaciones de la zona se usó la metodología propuesta por la EPA. La caracterización cuantitativa del riesgo implica evaluar las estimaciones de exposición contra un punto de referencia de toxicidad, como un factor de pendiente de cáncer o un cociente de riesgo no canceroso. Las siguientes ecuaciones son utilizadas para cuantificar el riesgo de cáncer por las tres vías de exposición a suelo contaminado (Baltas et al., 2020).

$$CDI_{\text{inhale}} = \frac{Ci \times \text{InhR} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$

$$CDI_{\text{ingest}} = \frac{Ci \times \text{IngR} \times FC \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

$$CDI_{\text{Dermal}} = \frac{Ci \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

$$CDI_{\text{total}} = CDI_{\text{ingests}} + CDI_{\text{inhale}} + CDI_{\text{dermal}}$$

**Donde:**

**Ci:** la concentración de elementos de metales pesados (mg. kg<sup>-1</sup>)

**IngR:** la tasa de ingestión de suelo (mg. kg<sup>-1</sup>)

**EF:** la frecuencia de exposición (días. año<sup>-1</sup>)

**ED:** la duración de la exposición (años)



**BW:** el peso corporal promedio (kg)

**AT:** el tiempo promedio (días)

**FC:** el factor de conversión (sin unidades)

**InhR:** la tasa de inhalación ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )

**PEF:** el factor de emisión de partículas (sin unidades)

**SA:** el área de superficie de la piel para el contacto con el suelo ( $\text{cm}^2$ )

**AF:** el factor de adherencia al suelo ( $\text{mg} \cdot \text{Cm}^{-2}$ )

**ABS:** el factor de absorción dérmica (sin unidades).

#### *A. Evaluación de riesgo cancerígeno*

El riesgo carcinogénico (RC) indica la posibilidad de que un individuo desarrolle cualquier tipo de cáncer debido a la exposición a riesgos cancerígenos. El CR de As y Cd se calcularon utilizando las ecuaciones.(Baltas et al., 2020)

$$\text{CR} = \text{CDI} + \text{SF}$$

$$\text{TCR} = \sum \text{CR} = \text{CR}_{\text{ingest}} + \text{CR}_{\text{inhala}} + \text{CR}_{\text{derma}}$$

**donde:**

**CR:** el riesgo carcinogénico (sin unidades)

**TCR:** el riesgo carcinogénico total (sin unidades)

**SF:** el factor de pendiente cancerígeno de metales pesados ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )

#### *1.2.3.10 Uso de herramientas geo-estadísticas, para la generación de mapas de dispersión de contaminantes.*

Antes de utilizar las técnicas de interpolación, es conveniente realizar explorar los datos recolectados. Las herramientas de *Exploratory Spatial Data Analysis* (ESDA) permiten



obtener información sobre los datos, lo que permite seleccionar los parámetros apropiados para el modelo de interpolación.

Para esto el software ArcGIS 10.5 proporciona las siguientes herramientas:

- **Histograma:** que permite explorar la distribución uni-variada (de una sola variable) de un conjunto de datos.
- **Mapa de Voronoi:** que permite analizar la estacionalidad y la variabilidad espacial de un conjunto de datos
- **QQPlot normal:** que permite verificar la normalidad de un conjunto de datos.
- **Análisis de tendencias:** que permite identificar identifique tendencias globales en un conjunto de datos.
- **Semivariograma / Nube de covarianza:** que permite analizar el espacio dependencias en un conjunto de datos.
- **QQPlot general:** que permite explorar si dos conjuntos de datos tienen el mismo distribuciones
- **Nube de covarianza cruzada:** que permite comprender la covarianza cruzada entre dos conjuntos de datos.

Se utilizó la herramienta de *Histograma* para examinar la forma de la distribución de la variable de interés por observación directa, evaluando si los datos se distribuyen normalmente (curva en forma de campana) en donde la media y la mediana serán similares, la asimetría debe estar cerca de cero, y la curtosis debería ser cercana a 3.

Al encontrar que los datos estaban muy sesgados, se realizó una transformación logarítmica, para acercarlos a la normalidad.

La exploración de los datos se realizó con los siguientes pasos.

1. Inicie la herramienta de *Geostatistical Analyst*.
2. Seleccionar la herramienta *Explore Data*.
3. Seleccionar la opción de *Histogram*.
4. Seleccionar el tipo de transformación que se quiere evaluar, en el menú de la propiedad *Transformation*.



Los intentos de interpolación se llevaron a cabo utilizando los modelos circular, esférico, exponencial, gaussiano, bajo el método de interpolación ordinaria de Kriging al ser este el método más usado en estudios ambientales y de distribución de contaminantes, en particular para sitios de estudio cuya topografía es accidentada, con una anisotropía positiva, definidas estas características en el cuadro de dialogo *Semivariogram/Covariance Modeling* y sin modificar los valores determinados por el software para la definición de vecindario en el cuadro de dialogo *Searching Neighborhood*. Por último, se comparó la precisión de interpolación realizada, con los valores de error, mostrados en el cuadro de dialogo *Cross Validation*. Este Procedimiento se muestra en la figura 12.

Los diferentes modelos de interpolación para la herramienta de Kriging corresponden a diferentes funciones de variación, que tienen una gran influencia en la confirmación de los valores pronosticados por lo que se debe tener alguna idea de qué tan bien el modelo predice los valores en ubicaciones desconocidas siendo en este caso, el modelo es el factor decisivo para la precisión de la interpolación.

En este sentido la validación cruzada ayuda a hacer una decisión informada sobre qué modelo proporciona las mejores predicciones y las estadísticas calculadas en esta pestaña sirven como diagnósticos que indican si el modelo y / o sus valores de parámetros asociados son razonables.

La validación cruzada utiliza todos los datos para estimar la autocorrelación del modelo, eliminando la ubicación de cada uno de los datos, (una a la vez) para predecir el valor asociado a la ubicación eliminada. Los valores predichos y reales en la ubicación del punto omitido son comparados, repitiendo este procedimiento para todos los puntos, para finalmente comparar los valores predichos con los valores medidos y de esto se obtenga información útil sobre el modelo de kriging (por ejemplo, los parámetros del semivariograma y de la búsqueda del *barrio*). (Krivoruchko & Lucas, 2014).

Por último, la comparación entre modelos determina qué tan bueno es el modelo con el que se creó una capa geo-estadística contra la generada por otro modelo, pero con diferentes parámetros para examinar los efectos de diferentes parámetros de entrada en un modelo para crear la superficie de salida.

Esta comparación se llevó a cabo utilizando la estadísticas de validación cruzada llamada *Mean standardized error*, para la cual si se tiene que  $\hat{Z}(s_i)$  es el valor predicho de la validación cruzada,  $z(s_i)$  el valor observado y  $\hat{\sigma}(s_i)$  sea el error estándar de la predicción para la ubicación  $s_i$ , y se puede entender como (Krivoruchko & Lucas, 2014):

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i)) / \hat{\sigma}(s_i)}{n}$$

Definiendo como el mejor modelo al que presente el valor más cercano a cero.

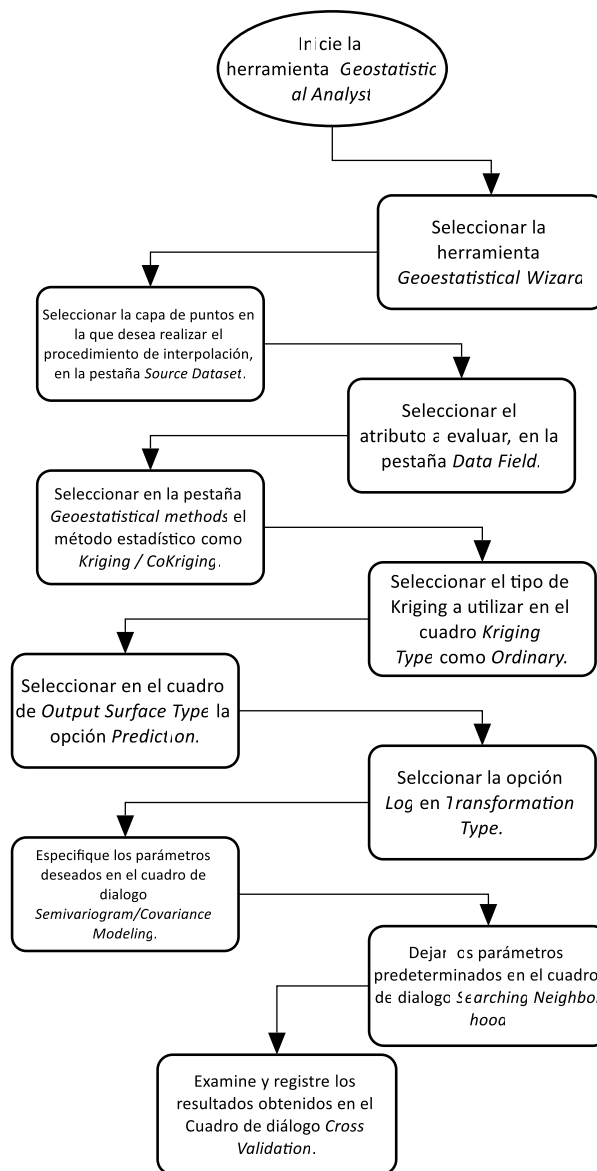


Figura 12. Procedimiento de interpolaciones geo-estadísticas.



# Capítulo

# 3





## Capítulo 3. Resultados.

### 1.1 Coordenadas definitivas de puntos de muestreo

Dada la extensión del área de estudio, así como la gran cantidad de puntos de muestreo que se tiene para el área de estudio los resultados se presentaran contenidos en tres áreas definidas de acuerdo a su localización en el área de estudio (zona norte, zona centro y zona sur) como se representa en la Figura 13. En las Tablas 14, 15 y 16 se indica el nombre, número de habitantes y tipo de localidad que integran cada una de las zonas, definidas respecto a su distancia respecto a las fuentes de emanación y su principal centro poblacional.

En la zona norte se ubican 13 localidades, 10 rurales y 3 urbanas, estas últimas con un número importante de habitantes, destacando Taxco de Alarcón como su principal centro poblacional con 52217 ha. la zona norte es donde están concentrados la mayoría de las minas y jales abandonados, por ende, esta zona concentra un mayor número de puntos de muestreo.

Dentro de esta zona se encuentran los jales La Concha, El Fraile I-II, Guerrero I-II y El Solar, estando La Concha y El Fraile cerca de los pueblos de El Fraile, Santa Rosa, Dolores y el río Cacalotenango. Los relaves de Guerrero se encuentran cerca del arroyo Xochula que desemboca en el río Taxco. El relave El Solar se encuentra a menos de 1 km al SE de la ciudad de Taxco. (Dótor-Almazán et al., 2017)

Los relaves de La Concha se generaron entre 1940 y 1950 y se depositaron aproximadamente 1 millón de toneladas se depositó cerca de un afluente del río Cacalotenango. Se construyó un muro de contención de 3 m de altura en la base de los relaves. Sin embargo, no bloquea la dispersión mecánica de las partículas de los relaves, que han llegado a los suelos agrícolas cercanos. (Dótor-Almazán et al., 2017)

Los jales Guerrero (Guerrero I y Guerrero II). contienen los residuos más recientes de todo el distrito, tiene un color grisáceo, de material no solidificado y expuesto debido a la construcción de un camino rural que llega al arroyo Xochula. Los relaves de Guerrero II están oxidados, tienen un color ocre-rojizo, están consolidados y se extienden ampliamente en la

ribera y el lecho del arroyo Xochula permitiendo el transporte de los relaves al río Taxco (Dótor-Almazán et al., 2017)

En la zona centro se tienen 9 localidades, 6 rurales y 3 urbanas; se observa que Buenavista de Cuéllar cuenta con un total de 7131 ha, seguido por Tlamacazapa con 6234; en ambos casos superan la población de Taxco de Alarcón y Taxco el Viejo. La zona Sur abarca el mayor número de localidades, siendo 18 en total, en donde Iguala de Independencia alcanza un total de 118 468 ha.

*Tabla 15.* Localidades presentes en la Zona Norte.

<b>Zona Norte</b>		
<b>Localidades</b>		
<b>Nombre</b>	<b>No. Habitantes</b>	<b>Tipo</b>
<b>Zacapalco</b>	892	RURAL
<b>Axixintla</b>	1647	RURAL
<b>Juliantla</b>	694	RURAL
<b>Paintla</b>	1695	RURAL
<b>Tehuilotepic</b>	2377	RURAL
<b>Cacalotenango</b>	1877	RURAL
<b>Casahuatlán</b>	1674	RURAL
<b>Acamixtla</b>	5301	URBANA
<b>Acuitlapán</b>	4006	URBANA
<b>Taxco de alarcón</b>	52217	URBANA
<b>Palmillas</b>	1104	RURAL
<b>Santa fe tepetlapa</b>	1510	RURAL
<b>Atzala (atzala de la asunción)</b>	893	RURAL

*Tabla 16.* Localidades presentes en la Zona Central.

<b>Zona Central</b>		
<b>Localidades</b>		
<b>Nombre</b>	<b>No.Habitantes</b>	<b>Tipo</b>
<b>Mexcaltepec</b>	588	Rural
<b>Puente campuzano</b>	659	Rural
<b>El naranjo</b>	870	Rural
<b>Venta de la negra</b>	246	Rural
<b>Taxco el viejo</b>	3172	Urbana



<b>Buenavista de cuéllar</b>	7131	Urbana
<b>Huixtac</b>	840	Rural
<b>Tlamacazapa</b>	6234	Urbana
<b>El ejido (ejido guerrero)</b>	701	Rural

*Tabla 17.* Localidades presentes en la Zona Sur.

<b>Zona Sur</b>		
<b>Localidades</b>		
<b>Nombre</b>	<b>No.Habitantes</b>	<b>Tipo</b>
<b>Cuexcontlán</b>	651	Rural
<b>San vicente palapa</b>	1130	Rural
<b>Tierra colorada</b>	1106	Rural
<b>Ceja blanca</b>	548	Rural
<b>Metlapa</b>	1578	Rural
<b>Colonia rancho del cura (el cura)</b>	699	Rural
<b>Tepochica</b>	740	Rural
<b>Colonia loma de los coyotes</b>	429	Rural
<b>El municipio (tijuana)</b>	440	Rural
<b>Tepecoacuilco de trujano</b>	6298	Urbana
<b>Tlaxmalac</b>	2217	Urbana
<b>Fermín rabadán cervantes</b>	1459	Rural
<b>Tuxpan</b>	2086	Rural
<b>Iguala de la independecia</b>	118468	Urbana
<b>Mextitlán (tonalapita)</b>	145	Rural
<b>Colonia 15 de septiembre</b>	836	Rural
<b>Coatepec costales</b>	1130	Rural
<b>Tlacuitlapa</b>	928	Rural

## Mapa de Zonas de Evaluación

IMPACTO ECOTOXICOLÓGICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS MAYORES Y TRAZA EN SUELO, SEDIMENTO Y MATERIAL VEGETAL EN TAXCO, MÉXICO

### Leyenda

- Puntos de muestreo de suelos y sedimentos.
- ★ Jales
- Localidades
- Río
- Cuerpo de Agua
- ▭ Área de evaluación

Fuente de información: Cartas E14A67, E14A68, E14A77 y E14A78, INEGI.

Proyección: WGS 1984 UTM

Escala de trabajo: 1:50.000.

Realizado por: Andrés Felipe Zúñiga Cabezas.

Fecha de elaboración: 30 de Marzo de 2021.

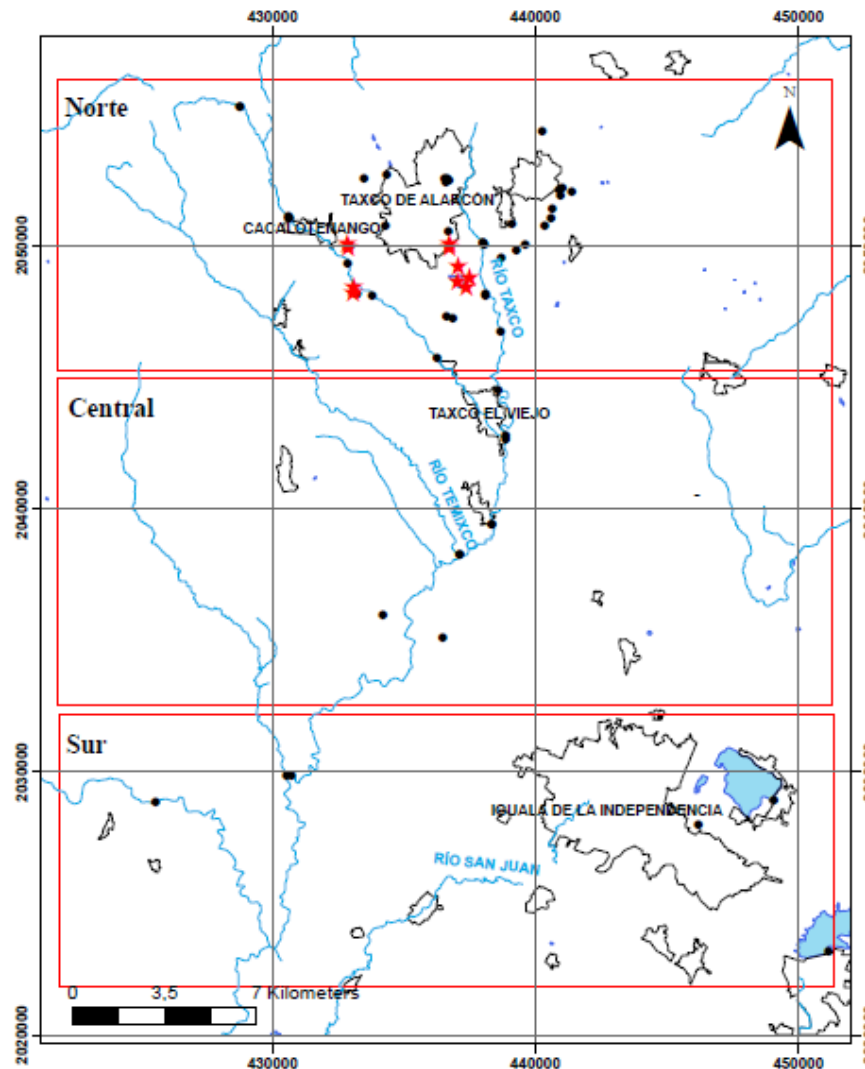


Figura 13 Mapas de distribución de puntos de muestreo para la zona de estudio.

## 1.2 Resultados de concentración de elementos potencialmente tóxicos.

### 1.2.1 Concentración de elementos en material vegetal

#### 1.2.1.1 Elementos mayores

Los resultados obtenidos de concentración de elementos mayores en material vegetal, en sus diferentes componentes (corteza, raíz, madera y hojas) de la zona de estudio por ICP-OES se presentan en la Tabla 17, en donde también se indican el valor máximo, valor mínimo y promedio de las concentraciones obtenidas.

El promedio de concentraciones para el área total de estudio de los elementos mayores respecto al promedio para todas sus matrices siguió el orden  $Ca < K < Mg < Fe < Al$ , variando para Ca, de 8.4 - 87269 mg/kg (promedio  $22774 \pm 19021$  mg/kg), K, de 0.8 - 51812 mg/kg (promedio  $8752 \pm 7746$  mg/kg), Mg de 0.3 - 5618 mg/kg (promedio  $1547 \pm 1056$  mg/kg), Fe, 0.1-3801 mg/kg (promedio  $551 \pm 0,1$  mg/kg) y Al, de 0.3 - 3283 mg/kg (promedio  $531 \pm 783$  mg/kg).

**Tabla 18.** Contenidos de los elementos mayores en las muestras de Material vegetal, con su punto de muestreo y matriz.

ID	Componente	Al	Fe	Ca	Mg	K
		mg/kg				
5	Corteza	1573	1883	27056	2218	5521
	Raíz	1413	1465	24632	1969	8074
	Hojas	602	64.5	7613	1673	51812
	$\bar{X}$	1196	1137	19767	1954	21802
7	Corteza	505	515	87269	3808	4193
	Hojas	168	125	13777	2013	18458
	Raíz	3283	2612	39203	1869	4162
	$\bar{X}$	1318.5	1084	46750	2563	8938
8	Madera	579	442	25001	3353	1270
	Hojas	19.8	87.4	18855	2204	22246
	$\bar{X}$	299	265	21928	2778	11758
9	Madera	55.7	82.6	57446	5618	22619
10	Corteza	334	238	7353	1283	16323

	<b>Hojas</b>	0.4	0	11.5	0.9	4.1
	$\bar{X}$	167	119	3682	642	8164
<b>11</b>	<b>Hojas</b>	701	152	36018	4714	31240
<b>16</b>	<b>Madera</b>	32.8	49.5	13345	198	2967
<b>18</b>	<b>Corteza</b>	97.9	105	24279	492	4548
<b>19</b>	<b>Corteza</b>	514	1153	28871	652	705
	<b>Raíz</b>	72.1	26.9	1405	115	497
	<b>Madera</b>	68	8.7	899	60.8	439
	<b>Hojas</b>	538	1232	27758	2602	10856
	$\bar{X}$	298	605	14733	858	3124
<b>20</b>	<b>Corteza</b>	1752	2817	41358	1137	2167
	<b>Raíz</b>	19.1	18.3	9322	123	1408
	<b>Madera</b>	33.9	30.2	9921	1021	5553
	<b>Hojas</b>	161	193	12074	2673	21326
	$\bar{X}$	491	765	18169	1238	7613
<b>21</b>	<b>Madera</b>	523	314	48179	2820	6307
<b>23</b>	<b>Corteza</b>	43.4	32.4	21443	2350	11876
	<b>Madera</b>	247	56.4	27994	2343	27138
	$\bar{X}$	145	44.4	24718	2346	19507
<b>27</b>	<b>Raíz</b>	63.4	95.6	2114	1736	15493
	<b>Madera</b>	128	164	10025	3988	12423
	<b>Hojas</b>	77.7	133	27920	3898	24115
	$\bar{X}$	89.7	131	13353	3207	17344
<b>28</b>	<b>Corteza</b>	107	125	37246	691	11018
	<b>Raíz</b>	1017	1158	26711	943	8247
	<b>Madera</b>	91.1	86.7	12289	516	5844
	<b>Hojas</b>	43.7	36.2	20077	2041	18371
	$\bar{X}$	315	352	24081	1048	10870
<b>29</b>	<b>Corteza</b>	734	840	66081	1499	9313
	<b>Raíz</b>	2351	2734	59181	1984	7258
	<b>Madera</b>	120	137	48611	861	15257
	<b>Hojas</b>	260	86.4	24835	2794	23130
	$\bar{X}$	866	949	49677	1785	13739
<b>30</b>	<b>Corteza</b>	151	146	64962	4496	1159
<b>31</b>	<b>Corteza</b>	1.9	0.3	14	0.8	1.8
	<b>Raíz</b>	1303	1237	52894	1011	2113
	<b>Maderas</b>	253	52.4	13476	609	5631

	<b>Hojas</b>	90.2	135.6	12959	1438	16504
	$\bar{X}$	412	356	19836	765	6062
<b>32</b>	<b>Corteza</b>	627	414	19776	445	4894
<b>33</b>	<b>Corteza</b>	2286	1614	49662	4037	2411
<b>36</b>	<b>Corteza</b>	134	50.3	8386	420	2102
<b>41</b>	<b>Corteza</b>	1867	1420	52604	2413	1884
	<b>Raíz</b>	173	68.9	957	126	2483
	<b>Madera</b>	48.1	11.8	1548	238	1290
	<b>Hojas</b>	178	138	19044	1392	17895
	$\bar{X}$	567	410	18538	1042	5888
<b>45</b>	<b>Corteza</b>	3140	3801	60247	2700	1839
	<b>Raíz</b>	2314	3102	24935	2950	12841
	<b>Madera</b>	76.9	173	7454	1001	5124
	<b>Hojas</b>	341	56.9	28448	5599	19900
	$\bar{X}$	1468	1783	30271	3063	9926
<b>47</b>	<b>Madera</b>	96.3	184	13342	446	2089
<b>54</b>	<b>Corteza</b>	476	534	32776	1644	954
	<b>Madera</b>	208.9	250.7	74939	1398	6973
	$\bar{X}$	343	392	53857	1521	3964
<b>58</b>	<b>Raíz</b>	271	772	11209	924	3758
	<b>Hojas</b>	134	50	8386	420	2102
	$\bar{X}$	202	411	9797	672	2930
<b>59</b>	<b>Corteza</b>	0.3	16.5	8.4	0.3	0.8
	<b>Hojas</b>	95.2	74.3	4007	1676	6048
	$\bar{X}$	47.8	45.4	2008	838	3025
<b>60</b>	<b>Madera</b>	103	344	17347	1129	8222
<b>61</b>	<b>Corteza</b>	938	613	46382	1212	2268
	<b>Madera</b>	134	119	931	49.1	1092
	$\bar{X}$	536	366	23657	630	1680
<b>62</b>	<b>Corteza</b>	2772	2574	58406	3363	2284
	<b>Raíz</b>	172	155	1156	160	1600
	<b>Madera</b>	261	90.6	856	87.7	892
	<b>Hojas</b>	0.5	0.1	10.5	1.1	4.8
	$\bar{X}$	801	705	15107	903	1195
	$\bar{X}$	531	551	22774	1547	8752
	<b>Max.</b>	3283	3801	87269	5618	51812
	<b>Mín.</b>	0.3	0	8.4	0.3	0.8

De manera general encontramos que para Fe y Ca las máximas concentraciones se encuentran en la corteza, para el Al se encuentran en la raíz, para Mg en la madera y para el K en las hojas.

### 1.2.1.2 Elementos Traza

Los resultados obtenidos de concentración de elementos mayores en material vegetal, en sus diferentes componentes (corteza, raíz, madera y hojas) de la zona de estudio por ICP-OES se presentan en la Tabla 18, en donde también se indican el valor máximo, valor mínimo y promedio de las concentraciones obtenidas.

El promedio de concentraciones para el área total de estudio de los elementos mayores siguió el orden  $Co < Cr < As < V < Cd < Pb < Mo < Ba < Mn < Zn < Sr$ , variando para Co, de 0.1 - 6 mg/kg (promedio  $0.25 \pm 0.3$  mg/kg), Cr, de 0.1 - 8 mg/kg (promedio  $0.45 \pm 1$  mg/kg), As de 0.5 - 12 mg/kg (promedio  $0.48 \pm 0.1$  mg/kg), V, 0.1-11 mg/kg (promedio  $2.2 \pm 2$  mg/kg) Cd, de 0.1 - 47 mg/kg (promedio  $2.22 \pm 5$  mg/kg), para Pb, de 0.1 - 736 mg/kg (promedio  $16 \pm 16$  mg/kg), Mo, de 0.1 - 1433 mg/kg (promedio  $18 \pm 337$  mg/kg), Ba de 0.3 - 107 mg/kg (promedio  $20 \pm 14$  mg/kg), Mn, 0.5-321 mg/kg (promedio  $40 \pm 44$  mg/kg), Zn, de 0.1 - 534 mg/kg (promedio  $49 \pm 37$  mg/kg) y Sr, 0.1-186 mg/kg (promedio  $57 \pm 30$  mg/kg).

Para la mayoría de los elementos solo con la excepción del Mo, V y Co la mayoría de los elementos evaluados presentan las mayores concentraciones de los elementos evaluados en la corteza lo que significaría una translocación y bio-acumulación de los mismos desde la raíz hasta otros componentes del espécimen. Sin embargo, para un análisis más detallado se dependerá de la determinación de las especies de cada uno de los puntos muestreados para definir características específicas que pueden afectar estos procesos

**Tabla 19.** Contenidos de los elementos traza en las muestras de Material vegetal, separadas por su punto de muestreo y Matriz

ID	Componente	As	Ba	Cd	Cr	Co	Cu	Mn	Mo	Pb	Sr	V	Zn
		mg/kg											
5	Corteza	0	26.9	29.7	3.1	0.7	25	140	1	38.3	50.3	4.6	94
	Raíz	0	34.4	1.1	0	0.5	15.5	127	0.8	47.5	52.2	4.1	77.5
	Hojas	0	2.1	5.3	0	0	15.3	17	0.2	0.9	6.6	4.4	54.7
	$\bar{X}$	0	21.1	12	1	0.4	18.6	94.7	0.7	28.9	36.4	4.4	75.4
7	Corteza	0	47.2	0.2	0	0.3	4.2	24.7	1.9	5.5	178	3.7	9.3
	Hojas	0	6.7	0.3	0	0.2	12.5	37.6	0.6	0.8	25.9	1.1	61.7



	<b>Raíz</b>	0	50.1	3.1	0	1.1	13.9	103	0.9	23.8	58.6	6.7	32
	$\bar{X}$	0	34.7	1.2	0	0.6	10.2	55.2	1.1	10	87.5	3.8	34.3
<b>8</b>	<b>Madera</b>	0	50	0.1	1.3	0.2	6.5	33	0.3	4.1	90.5	1.5	9.5
	<b>Hojas</b>	0	18.3	0.3	0.4	0	18.2	36.1	1.9	0.2	39.6	0	68.5
	$\bar{X}$	0	34.1	0.2	0.9	0.1	12.3	34.6	1.1	2.1	65.1	0.8	39
<b>9</b>	<b>Madera</b>	0	19.4	6	0	0.5	16	86.5	2.5	3.4	122	3	58.3
<b>10</b>	<b>Corteza</b>	0	26.3	0.1	0	0.1	14.7	107	1.7	0	23.4	0.9	42.1
	<b>Hojas</b>	0	0.5	0	0	0	-	0.1	0	0.1	0	0	1
	$\bar{X}$	0	13.4	0.1	0	0	14.7	53.7	0.9	0	11.7	0.5	21.5
<b>11</b>	<b>Hojas</b>	0	13.2	0.9	0	0.1	21.6	67.1	0.8	0	62.5	2.8	111
<b>16</b>	<b>Madera</b>	0	1.9	1.2	0	0	1.6	0.8	0.9	3	24.3	0.3	3.6
<b>18</b>	<b>Corteza</b>	0	4.3	0.1	0	0.1	1.5	29.6	1.9	1.4	44.8	3.1	0
<b>19</b>	<b>Corteza</b>	9.4	19	7.3	0	0.3	10.3	75.6	2.1	160	24.3	4.2	534
	<b>Raíz</b>	0	35.3	1.2	0	0.1	1.6	2.2	0.5	3.8	3.7	2.3	8.3
	<b>Madera</b>	0	2.8	0.4	0	0	1.4	0.7	0.5	1	3	0.5	10.9
	<b>Hojas</b>	1.6	26.7	2.1	1.8	0.3	9.3	56.4	1.6	28	45.2	1.9	278
	$\bar{X}$	2.7	20.9	2.8	0.4	0.2	5.6	33.7	1.2	48.3	19.1	2.3	208
<b>20</b>	<b>Corteza</b>	12.2	14.6	1.6	2	0.7	12.8	65.2	0.7	49.9	90.9	3.6	140.1
	<b>Raíz</b>	0	1.2	0	0	0	0.7	0.5	0.8	0	15.2	0	2.1
	<b>Madera</b>	0	0.4	0.1	0.3	0.1	1.4	1.1	0.9	0	23.9	0.8	0.7
	<b>Hojas</b>	0	2.6	1	0.2	0.3	11.6	49.5	1.5	2	19.2	2.4	42.8
	$\bar{X}$	3.1	4.7	0.7	0.6	0.3	6.6	29.1	1	13	37.3	1.7	46.4
<b>21</b>	<b>Madera</b>	0	40.8	0.7	0	0.2	10	32.9	1.9	2.7	92.2	3.2	26
<b>23</b>	<b>Corteza</b>	0	8.2	0.1	0	0.1	1.8	6.5	1.9	1.7	47.6	2.8	3.4
	<b>Madera</b>	0	23	0.1	0	0	6.8	18.5	0	0	33	1.9	25.5
	$\bar{X}$	0	15.6	0.1	0	0.1	4.3	12.5	1	0.9	40.3	2.3	14.5
<b>27</b>	<b>Raíz</b>	0	0	0.3	0	0.1	1.6	1.1	1.5	0	7.7	0.9	13.5
	<b>Madera</b>	0	1.2	0.5	0	0.1	4.8	6.6	0.9	2.1	27.4	1.3	21
	<b>Hojas</b>	0	12.8	0.2	0	0	21.2	138	1433	0	41.1	0	86
	$\bar{X}$	0	4.7	0.3	0	0.1	9.2	48.5	478	0.7	25.4	0.7	40.2
<b>28</b>	<b>Corteza</b>	0	35.3	0.4	0	0	6.6	55.2	0.9	5.2	52.5	0.7	34.5
	<b>Raíz</b>	0	0	2.3	0	0.8	14.7	106	1	51.3	51.8	4.1	225
	<b>Madera</b>	0	11.5	0.1	0	0	3	8.4	0.7	1.7	24.6	1.6	18.2
	<b>Hojas</b>	0	20	0.1	0	0.1	4.7	16.4	2.1	0.4	34.6	2.8	19.4
	$\bar{X}$	0	16.7	0.7	0	0.2	7.2	46.4	1.2	14.6	40.9	2.3	74.4
<b>29</b>	<b>Corteza</b>	0.5	18.1	46.7	4.4	0.3	39.1	65.3	0.5	736	134	1.4	82.7
	<b>Raíz</b>	8.4	30.7	46.7	2.2	0.9	-	192	0.9	105	115	4.6	241
	<b>Madera</b>	0	9.5	1.9	0	0.2	13.5	20.3	1.7	6.3	96.9	3	18
	<b>Hojas</b>	0	4.7	1	0.4	0	19	71.3	0	0.4	34	4.2	44.6

	$\bar{X}$	2.2	15.7	24.1	1.8	0.4	23.9	87.3	0.8	212	94.8	3.3	96.5
30	Corteza	0	22.9	0.2	0	0.1	3.3	8.6	0.3	3.3	185.9	0.4	16.8
31	Corteza	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Raíz	0	62.7	0.2	1.4	1	9.7	74.7	1	0.6	66.9	10.9	24.3
	Maderas	0	9.1	0	0	0.2	6	1.6	0.4	0.5	13.5	2.7	11.2
	Hojas	0	9.7	0.2	0	0	14.8	14	0.1	0.1	27.7	0.9	78.6
	$\bar{X}$	0	20.5	0.1	0.4	0.3	7.6	22.6	0.4	0.3	27	3.6	28.5
32	Corteza	0	5.8	0.1	1.4	0.1	10.5	14.7	0.5	3.6	62	1.1	11.4
33	Corteza	0	34.7	0.5	0	0.6	7.4	47.6	2	20.6	157	6.2	37.2
36	Corteza	0	107	0.1	0.1	0	2.7	68.7	1	0.4	34.5	1.4	4
41	Corteza	0	86.3	1.2	0	0.6	5	64.3	1.9	39.4	126	6.2	77.7
	Raíz	0	2.7	0.5	0.6	0.1	2.4	1.3	1	0.1	5.8	3.2	1.9
	Madera	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1
	Hojas	0	10.1	0.2	0	0.1	1.4	11.9	1.4	0.8	40.3	3.2	11
	$\bar{X}$	0	25	0.5	0.2	0.2	2.2	19.4	1.1	10.1	43.1	3.2	22.7
45	Corteza	6.4	72.3	4.3	3.4	1.6	23.4	321	1.8	87.9	150	5.5	366
	Raíz	5.9	30.3	3.8	0	0.8	15.7	157	1.1	47.5	60.4	4	200
	Madera	0	18.9	1.1	0	0.1	8.3	5.7	1.8	0.9	21.7	3.1	8.5
	Hojas	0	20.6	4.2	0	0	8	26.8	0.5	0	37.8	3.1	131
	$\bar{X}$	3.1	35.5	3.4	0.9	0.6	13.8	128	1.3	34.1	67.5	3.9	176
47	Madera	0	3.6	0.2	0.1	0	6.3	37.7	0.9	1.3	24.1	0.5	15
54	Corteza	0	14.9	0.2	0.6	0.2	5.3	21.9	0.5	3.9	101	0.4	26.5
	Madera	0	5.3	1.9	4.2	0.2	6.4	37.4	0.4	47.3	92.7	1.2	76
	$\bar{X}$	0	10.1	1.1	2.4	0.2	5.9	29.7	0.5	25.6	97.1	0.8	51.2
58	Raíz	0	6.3	5.4	0	0.6	5.5	27.9	0.7	25.3	23.4	2.6	138.3
	Hojas	0	3.4	6.4	0	1.9	17.2	52.8	1.3	0.9	22.8	1.6	165.8
	$\bar{X}$	0	4.9	5.9	0	1.2	11.3	40.4	1	13.1	23.1	2.1	152
59	Corteza	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2
	Hojas	0	3.3	0.3	0	0	3.3	1.8	1.6	0.9	8.5	0.4	9.9
	$\bar{X}$	0	1.8	0.1	0	0	1.7	0.9	0.8	0.5	4.3	0.2	5
60	Madera	0	5.7	0.1	0	0	4.1	5.3	2.6	3.1	41.5	0.6	12.6
61	Corteza	0	31.8	0.1	0	0.3	40.3	18.1	2.2	1.1	101	4.3	16.6
	Madera	0	2.6	0.5	1.8	0	1.7	1.1	1.4	0	3.4	1.6	8.7
	$\bar{X}$	0	17.2	0.3	0.9	0.2	21	9.6	1.8	0.6	52.4	3	12.6
62	Corteza	10.9	66.7	1.9	7.8	1.1	12.4	105	0.8	57.6	139	4.7	103
	Raíz	0	6.5	0.3	0.9	0	3.2	3.5	0.7	5.2	5.1	1.6	22.1
	Madera	0	0.9	0.1	0	0	1.6	1.1	0.9	1.5	4.2	2.4	4.7
	Hojas	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4
	$\bar{X}$	2.7	18.6	0.6	2.2	0.3	4.3	27.4	0.6	16.1	37.1	2.2	32.6

$\bar{X}$	0.5	20	2	0.45	0.25	9.4	40	18	16	57	2	49
<b>Max.</b>	12	107	47	8	6	40.3	321	1433	736	186	11	534
<b>Min.</b>	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

## 1.2.2 Concentración de elementos en suelo y sedimentos

### 1.2.2.1 Elementos Mayores

Los resultados obtenidos de concentración de elementos mayores en los suelos y sedimentos en porcentaje de masa del análisis de los 57 puntos de muestreo de la zona de estudio por ICP-MS se presentan en la tabla 19, en donde también se indican el valor máximo, valor mínimo y promedio de las concentraciones obtenidas.

El promedio de concentraciones para el área total de estudio de los elementos traza siguió el orden  $Ca < Fe < Al < Mg < K < P < Ti$ , variando para Ca, de 0.26-16.1 % (promedio  $4.43 \pm 3.06$ ), Fe de 0.73-16.4 % (promedio  $3.69 \pm 2.29$ ), Al, de 0.48-5.29 % (promedio  $1.9 \pm 0.73$ ), Mg, 0.1-1.96 % (promedio  $0.65 \pm 0.31$ ), K, de 0.05-0.50 % (promedio  $0.21 \pm 0.09$ ), P, de 0.01-0.23 % (promedio  $0.07 \pm 0.03$ ) y Ti 0.00-0.10 % (promedio  $0.03 \pm 0.02$ ).

**Tabla 20.** Contenidos de los elementos Mayores en las 57 muestras de Suelo y Sedimento en porcentaje de peso.

Óxidos	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
	%						
NASC	9.34	4.86	3.58	0.94	2.43	0.21	0.63
UCC	8.15	3.91	2.56	1.49	2.32	0.06	0.38
Elemento	Al	Fe	Ca	Mg	K	P	Ti
	%						
ID							
1	1.72	2.12	1.11	0.29	0.26	0.023	0.035
2	2.8	4.99 +*	0.26	0.47	0.15	0.051	0.011
3	1.76	3.49	2.89 *	0.6	0.16	0.068 *	0.022
4	1.96	5.36 +*	5.24 +*	0.72	0.38	0.078 *	0.036
5	2.03	3.43	8.89 +*	0.87	0.34	0.094 *	0.017
6	1.6	2.36	4.89 +*	0.57	0.22	0.071 *	0.031
7	1.27	2.35	3.77 +*	0.44	0.19	0.042	0.033



8	1.43	2.36	4.7 +*	0.49	0.22	0.054	0.031
9	2.57	4.25 +*	1.93	0.64	0.3	0.226 +*	0.012
10	2.26	2.6	3.93 +*	0.44	0.29	0.059	0.013
11	2.29	4.35 *	5.24 +*	0.75	0.19	0.07 *	0.001
12	2.04	10.8 +*	2.64 *	0.83	0.1	0.124 *	0.048
13	1.5	3.54	3.24 *	0.65	0.15	0.071 *	0.02
14	1.78	4.5 *	2.06	0.64	0.2	0.053	0.028
15	1.68	4.08 *	3.78 +*	0.72	0.19	0.091 *	0.02
16	1.65	3.84	3.27 *	0.64	0.16	0.076 *	0.02
17	1.66	3.22	2.03	0.67	0.16	0.057	0.021
18	2.79	4.18 *	5.1 +*	1.06 +	0.36	0.112 *	0.002
19	0.48	2.4	16.1 +*	0.55	0.07	0.027	0.001
20	2.35	3.65	10.2 +*	0.79	0.24	0.061 *	0.001
21	2.9	4.18 *	1.64	0.99 +	0.24	0.112 *	0.046
22	1.98	2.39	3.37 *	0.44	0.24	0.043	0.044
23	1.98	2.9	3.95 +*	0.59	0.27	0.078 *	0.037
24	1.47	2.48	2.58 *	0.29	0.27	0.025	0.042
25	1.56	2.69	3.97 +*	0.57	0.24	0.058	0.036
26	1.8	3.23	7.68 +*	0.67	0.2	0.055	0.027
27	2.11	3.74	8.96 +*	0.93	0.24	0.059	0.002
28	1.16	3.09	3.69 +*	0.6	0.14	0.075 *	0.016
29	1.78	4.69 *	3.57 *	0.7	0.19	0.077 *	0.024
30	1.47	3.45	4.63 +*	0.56	0.16	0.056	0.027
31	2.06	2.86	8.84 +*	0.69	0.23	0.055	0.034
32	1.98	2.56	2.93 *	0.56	0.17	0.044	0.056
33	1.51	2.42	3.05 *	0.41	0.13	0.044	0.032
34	1.67	4.36 *	8.37 +*	1.49 +	0.39	0.034	0.004
35	2.02	3.51	6.13 +*	0.52	0.18	0.072 *	0.029
36	1.04	0.73	3.35 *	0.15	0.06	0.107 *	0.011
37	1.41	2.4	0.31	0.1	0.12	0.011	0.061
38	0.51	16.4 +*	4.28 +*	0.61	0.05	0.017	0.02
39	1.35	3.47	3.59 +*	1.96 +*	0.13	0.156 *	0.044
40	1.75	3.3	2.86 *	0.62	0.15	0.067 *	0.029
41	1.7	4.01 *	2.89 *	0.47	0.2	0.044	0.103
42	2.97	3.15	3.36 *	1.15 +	0.45	0.059	0.076
43	2.18	3.98 *	4.59 *	0.81	0.24	0.098 *	0.015
44	1.53	1.77	1.75	0.24	0.07	0.104 *	0.024
45	1.57	3.13	3.39 *	0.6	0.16	0.074 *	0.02
46	1.16	2.38	8.32 +*	0.57	0.12	0.073 *	0.036



47	1.76	4.13 *	3.25 *	0.68	0.18	0.079 *	0.029
48	2.6	4.02 *	5.45 +*	0.65	0.21	0.063 *	0.001
49	2.41	8.62 +*	1.34	0.7	0.5	0.075 *	0.02
50	1.51	3.39	4.79 +*	0.64	0.16	0.061 *	0.024
51	1.86	2.2	13.7 +*	0.75	0.33	0.042	0.041
52	1.89	3.32	4.44 +*	0.67	0.19	0.093 *	0.02
53	1.11	1.43	8.1 +*	0.59	0.18	0.068 *	0.038
54	2.85	3.77	3.03 *	1.14 *	0.35	0.09 *	0.005
55	3.42	2.18	0.55	0.1	0.14	0.049	0.034
56	5.29	2.34	0.89	0.12	0.08	0.081 *	0.096
57	1.62	3.65	3.48 *	0.62	0.16	0.069 *	0.023
Max	5.29	16.4	16.1	1.96 +*	0.5	0.226	0.103
Min	0.48	0.73	0.26	0.1	0.05	0.011	0.001
$\bar{X}$	1.9	3.7	4.4	0.6	0.2	0.1	0.03

NASC= North American Shale Composite, UCC = Upper Continental Crust, += superior al valor de NASC, \*=Superior al valor de UCC. Fuente: (Gromet, Haskin, Korotev, & Dymek, 1984), (Rudnick & Gao, 2013)

Los resultados del contenido de las zonas norte, centro y sur muestran la variabilidad de los resultados, así como sus máximos y mínimos locales.

Para la zona norte de evaluación se encuentra que sigue el mismo patrón de las concentraciones totales que para la totalidad de la zona de estudio. La concentración total de metales varió para Ca, de 0.26-16.1 % (promedio  $4.3 \pm 2.9$ ), Fe de 0.73-16.4 % (promedio  $3.8 \pm 2.6$ ), Al, de 0.48-2.97 % (promedio  $1.9 \pm 0.6$ ), Mg, 0.10-1.96 % (promedio  $0.65 \pm 0.31$ ), K, de 0.05-0.5 % (promedio  $0.21 \pm 0.1$ ), P, de 0.01-0.23 % (promedio  $0.1 \pm 0.04$ ) y Ti 0.001-0.10 % (promedio  $0.03 \pm 0.02$ ). Con puntos máximos de concentraciones notables en Ca para el punto 20 y en el punto 39 para Fe, siguiendo para todos los demás puntos relativamente poca variabilidad.

Al igual que para la zona norte, la zona central de evaluación (descrita en la figura 16) sigue el mismo patrón de concentraciones, con concentraciones de elementos que varía para Ca, de 2,06-8,8 % (promedio  $4,5 \pm 2,4$ ), Fe de 2,8-4,6 % (promedio  $3,8 \pm 0,7$ ), Al, de 1,1-2,06 % (promedio  $1,6 \pm 0,2$ ), Mg, 0,6-1,4 % (promedio  $0,7 \pm 0,3$ ), K, de 0,1-0,3 % (promedio  $0,2 \pm 0,1$ ), P, de 0,03-0,09 % (promedio  $0,1 \pm 0,02$ ) y Ti 0,004-0,03 % (promedio  $0,02 \pm 0,01$ ). Con puntos máximos de concentraciones notables en la concentración de Ca en los puntos 32 y 35.

Para la zona sur de evaluación se encuentra una ligera variación, intercambiando su lugar el Al y el Fe, de los elementos mayores evaluados:  $Ca < Al < Fe < Mg < K < P < Ti$ , cambiando la tendencia presentada en las anteriores zonas de estudio. La concentración total de metales varió para Ca, de 0,5-13,7 % (promedio  $5,4 \pm 4,9$ ), Al de 1,1-5,2 % (promedio  $2,5 \pm 1,6$ ), Fe, de 1,4-3,3 % (promedio  $2,4 \pm 0,8$ ), Mg, 0,1-0,7 % (promedio  $0,4 \pm 0,3$ ), K, de 0,08-0,33 % (promedio  $0,18 \pm 0,1$ ), P, de 0,04-0,09 % (promedio  $0,07 \pm 0,02$ ) y Ti 0,02-0,09 % (promedio  $0,04 \pm 0,03$ ).

Con un punto máximo de concentración local en la concentración en el punto 51, para el Ca.

### 1.2.2.2 Elementos Traza normados por la NOM-147

Los resultados obtenidos de concentración de elementos traza normados por la NOM-147 para suelo y sedimento (As, Ba, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl, V) del análisis de 56 muestras de suelo y sedimento se encuentran contenidos en la tabla 20 en mg/kg, así como su valor máximo, mínimo y promedio de las concentraciones obtenidas. En donde se observa el siguiente comportamiento  $Pb > As > Ba > V > Cd > Cr > Ni > Ag > Tl > Se > Hg > Be$ .

**Tabla 21.** Contenidos de los elementos Traza normados por la NOM-147 en las 57 muestras de Suelo y Sedimento en porcentaje de peso.

ID	As	Ba	Be	Cd	Cr	Hg	Ni	Ag	Pb	Se	Tl	V
	mg/kg											
1	10.5	157	0.9	0.74	12	0.46	6.9	1.3	41.3	0.3	0.18	24
2	39.4	145	0.5	17.4	24	0.21	11.6	42.8	616	0.8	0.3	42
3	28.4	102	0.6	4.24	24	0.89	26.7	30.7	363	0.5	0.21	37
4	169	234	1	33.1	28	2.61	22.4	78.4	2200	2.2	0.46	49
5	16.7	60.1	0.4	1.31	32	0.18	29.3	12.3	74.3	0.6	0.24	51
6	20.2	113	0.5	0.83	24	0.35	19.1	8.88	84.6	0.3	0.24	39
7	10.9	118	0.5	0.43	23	0.13	14.9	1.96	29.9	0.2	0.16	28
8	12.5	112	0.6	0.6	21	0.19	19.1	6.42	46.3	0.3	0.22	34
9	57.7	121	1	14.9	34	0.8	48.4	100	543	1.1	0.57	57
10	11.4	90.4	3.4	0.97	22	0.33	23.1	3.06	61.4	0.7	0.27	37
11	13.1	83.4	0.7	0.56	34	0.12	37.8	0.476	20.1	0.5	0.2	50
12	1150	9.4	1.1	229	24	0.45	22.8	100	5000	10.2	1.11	39
13	54.1	102	0.5	11.1	26	1.11	26.5	14.8	503	0.6	0.22	35
14	131	145	0.7	17.1	31	3.19	27.9	39.3	3480	0.9	0.27	48



15	70.8	126	0.6	12.2	27	1.05	30.1	17.2	574	0.7	0.26	39
16	75.1	96.1	0.6	12.8	23	0.65	26.2	17.5	620	0.7	0.23	39
17	38.4	102	0.7	13.5	25	0.51	21.3	11.6	663	0.6	0.26	34
18	32.1	53.5	0.6	1.84	38	0.12	45.3	3.83	95.4	0.7	0.37	63
19	259	131	0.4	498	13	0.16	47.1	14	808	12.8	0.55	14
20	76	85.3	0.5	5.09	29	0.06	34.3	1.52	171	0.6	0.2	59
21	94.3	95.9	0.8	2.83	90	0.32	60.4	7.28	111	0.8	2.31	78
22	56.8	165	0.8	5.27	19	0.27	14.4	9.44	184	0.4	0.27	33
23	36.5	135	0.7	2.02	32	0.45	24.8	8.79	210	0.5	0.31	45
24	12.4	177	0.6	0.59	21	0.19	11.7	1.27	42	0.2	0.22	33
25	27.2	110	0.5	0.93	27	0.29	20.1	1.84	123	0.3	0.26	42
26	61.8	122	0.6	2.41	28	0.39	26.5	3.78	149	0.6	0.22	49
27	101	61.5	0.5	5.72	30	0.06	35.3	0.901	134	0.5	0.25	59
28	37.4	71.3	0.3	7.54	20	0.29	21.9	3.55	345	0.4	0.17	32
29	107	141	0.7	20	30	5.04	27.8	21.5	664	0.7	0.26	46
30	158	129	0.4	32.7	20	1.08	19.3	9.04	904	1	0.23	38
31	19.8	144	0.7	2.54	28	2.98	23.8	4.46	239	0.7	0.37	51
32	15.9	144	0.9	0.8	22	0.15	15	0.451	25.3	0.8	0.26	41
33	65.2	131	0.7	10.6	17	1.12	15.3	3.72	342	0.8	0.32	32
34	1350	48.6	0.1	1.28	24	10	36.3	0.276	27	30.4	164	73
35	87.9	133	0.5	21.1	27	2.53	27	19.8	1700	0.9	0.45	49
36	7	427	0.6	0.72	11	0.65	5.1	0.515	30.5	0.7	0.98	9
37	7	160	0.9	0.4	13	0.39	6.6	0.32	24.7	0.1	0.24	23
38	5500	6.2	0.4	781	20	1.69	18.4	100	5000	15.1	1.74	17
39	122	94.3	0.4	15.1	53	0.77	106	26.9	453	0.6	0.47	42
40	24	145	0.6	4.28	25	0.2	24.7	10	226	0.6	0.24	41
41	58.6	129	0.6	9.88	22	0.29	15.8	6.63	669	1.6	0.2	74
42	9.1	141	0.6	0.47	31	0.06	23.5	0.379	16.1	1.3	0.22	58
43	224	87	0.6	51.1	32	0.33	36.7	28.2	2020	1.9	0.55	60
44	14.4	152	0.6	0.26	10	0.14	7.7	1.76	16.7	0.6	0.32	20
45	53.2	94.4	0.5	9.01	21	0.81	25.7	11.8	327	1	0.22	35
46	28.8	96.4	0.5	2.95	27	0.15	17.6	13.6	341	1	0.34	41
47	109	113	0.7	14.3	27	1.72	27.2	31.1	800	0.9	0.27	44
48	12.5	82.4	0.7	0.47	29	0.18	35.2	0.305	19.9	0.8	0.26	53
49	303	95.9	1	34.9	31	0.24	28.8	65.7	1460	1.7	0.67	71
50	50.2	84.9	0.5	7.58	26	0.97	25.3	6.63	287	0.8	0.49	40
51	6.5	217	0.5	0.39	23	0.07	16.6	0.03	7.9	0.5	0.15	47
52	48.4	102	0.5	9.9	25	1.4	24.8	17.7	321	0.8	0.4	41

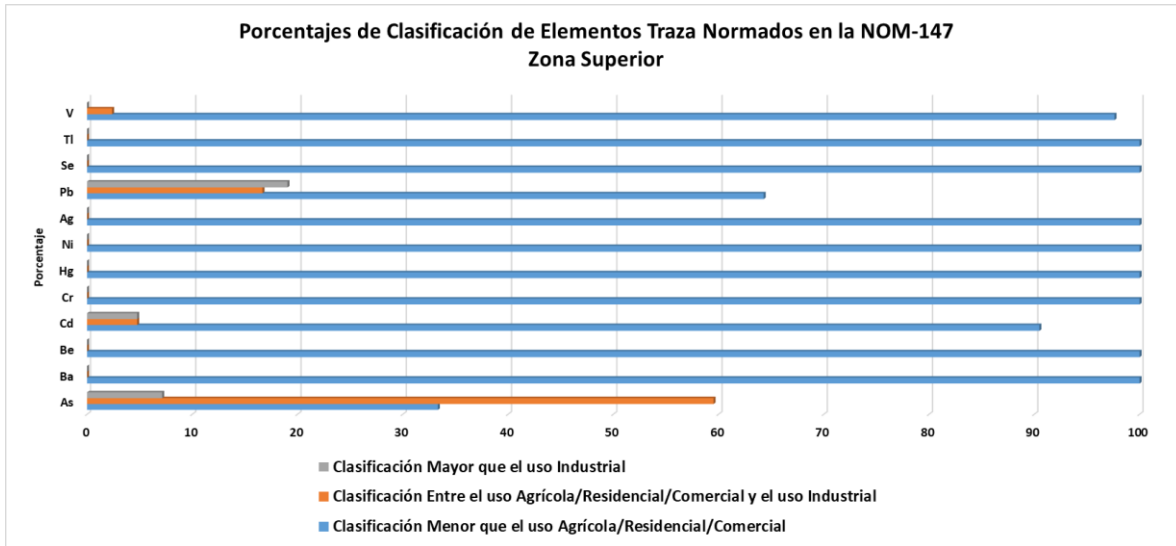


<b>53</b>	7.1	235	0.4	0.24	18	0.07	11.1	0.142	18.8	0.4	0.12	33
<b>54</b>	33	67.6	0.6	19.3	34	0.21	34.3	8.53	169	1.2	0.35	59
<b>55</b>	11.2	370	0.8	0.35	12	0.2	7.3	0.532	43.1	0.7	0.31	19
<b>56</b>	9.4	471	0.9	0.33	29	0.3	16.1	0.524	50.2	0.7	0.38	40
<b>57</b>	69.9	94.7	0.6	12	24	1.4	26.4	27.8	445	1.2	0.2	40
<b>Max</b>	5500	471	3.4	781	90	10	106	100	5000	30.4	164	78
<b>Min</b>	6.5	6.2	0.1	0.24	10	0.06	5.1	0.03	7.9	0.1	0.12	9
<b><math>\bar{X}</math></b>	197	131	0.7	34.5	26.2	0.9	25.6	16.9	595	1.9	3.3	42.6

Los resultados del contenido de las zonas norte, central y sur muestran la variabilidad de los resultados, así como la clasificación de uso del suelo respecto a la clasificación definida en la NOM-147, respecto a la concentración de los elementos evaluados en las figuras 18, 19 y 20.

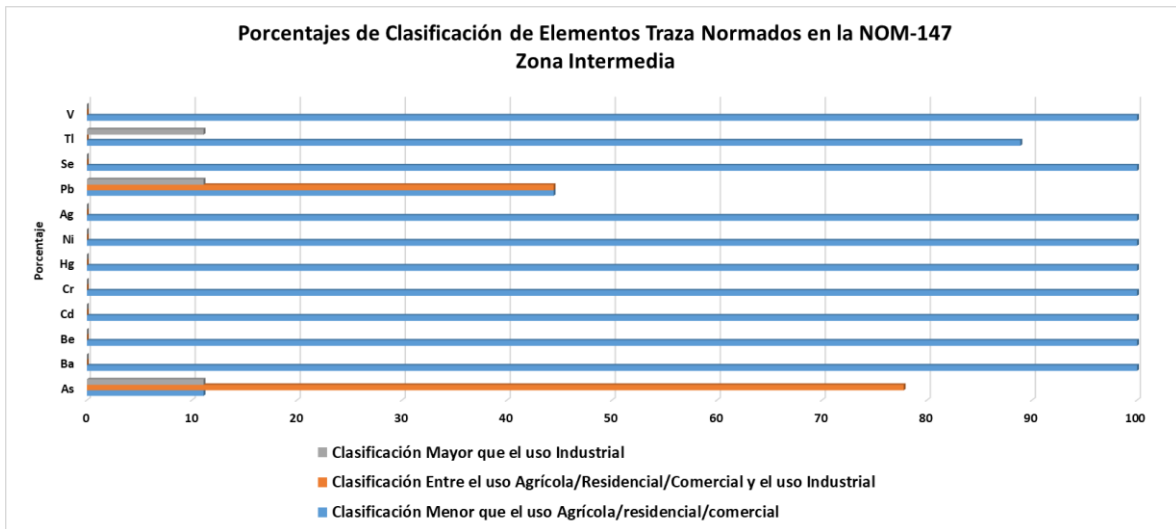
Para la zona norte de evaluación se encuentra que, para las concentraciones de los elementos encontradas, para la mayoría de los metales la totalidad de los puntos dentro de esta zona de estudio, se encuentran dentro del rango de clasificación menor al máximo definido para el uso como zonas agrícolas, residenciales o comerciales por lo que no se requerirían ningún tipo de remediación, sin embargo, dentro de las excepciones a este comportamiento se encuentran en primer lugar el As con casi un 60% de los puntos dentro del rango entre el máximo nivel permitido para los usos agrícolas, residenciales o comerciales y el uso industrial así como un 7% de lo puntos por encima incluso de los valores máximos permitidos para la zona industrial. Para el Pb se encuentran un 16% y 19% dentro de las categorías 2 y 3 respectivamente un 5% para las categorías 2 y 3 para el Cd y por ultimo un 2% en la zona 2 para el V.





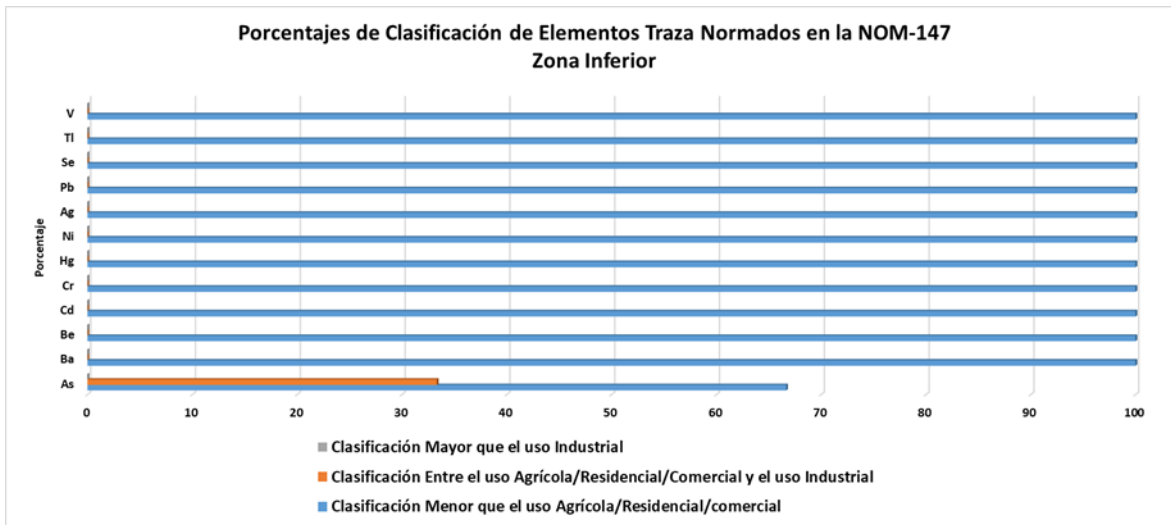
**Figura 14.** Concentración de elementos traza normados en la NOM-147 en la Zona Norte.

Para la zona central se encuentra de nuevo que solo las concentraciones de As y Pb entran a las categorías 2 y 3, con un 77% en la categoría 2 para el As y un 44% para el Pb y un 11% para ambos, así como para el Tl en la categoría 3.



**Figura 15.** Concentración de elementos traza normados en la NOM-147 en la Zona Central.

Por último para la zona sur se encuentra que para todos los elementos evaluados a excepción del As la totalidad de los puntos se encuentran en la categoría 1, encontrándose solo con un 33% de los puntos del As, en la categoría 2.



*Figura 16.* Concentración de elementos traza normados en la NOM-147 en la Zona Sur.



### 1.2.2.3 Elementos Traza no normados por la NOM-147

**Tabla 22.** Contenidos de los elementos Mayores no normados en la NOM-147 en las 57 muestras de Suelo y Sedimento en porcentaje de peso

ID	Li	B	Na	Bi	Mn	Co	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	In	Sn	Sb	Cs	W	Au	Th	U
	mg/kg																					
1	21.4	5	360	0.2	401	3.9	10.3	78.6	4.94	18.5	92.5	11.1	0.8	0.91	0.05	3.15	1.05	5.05	0.8	1.9	6.3	1.2
2	31.1	3	330	0.16	663	16.3	74.7	1870	6.66	13.5	9.3	1.1	0.2	2.17	0.1	49.8	27.8	3.16	0.4	11.2	1.6	0.6
3	27	6	320	0.23	743	9.6	78	629	4.5	10.9	63.9	3.2	0.2	1.73	0.04	4.93	8.3	3	0.6	6	3.9	0.6
4	28.9	17	240	0.43	3770	8.7	177	3140	5.18	22.9	104	3.3	0.6	4.18	0.14	70.3	90.3	5.13	2.5	37.5	2.7	1
5	26.8	8	130	0.21	411	12.7	60	157	4.52	12	149	0.9	0.3	1.39	0.03	0.64	4.31	2.61	0.3	<0.5	0.9	0.2
6	22.6	11	410	0.19	365	7.1	44.7	144	3.86	15.8	93.9	4.5	0.5	1.14	0.04	2.68	3.85	4.18	0.6	2.6	3.2	0.8
7	19	6	610	0.13	328	4.7	18.1	82.2	3.3	13.3	96.8	8	0.4	1.27	0.04	2.05	1.85	4.65	0.7	<0.5	4.7	0.9
8	20.2	7	380	0.44	339	5.9	40.3	107	3.69	15.7	101	6.7	0.4	1.23	0.03	2.25	2.54	4.24	0.6	<0.5	3.7	0.8
9	40.2	9	210	0.85	1600	14	376	1320	5.71	22	46.5	0.5	0.2	2.65	0.19	6.04	15.4	5.79	0.7	50.2	1	0.7
10	22.6	9	160	0.13	604	7.6	31.4	127	5.67	30.6	57.1	2.9	0.7	1.21	0.03	1.35	1.04	6.77	0.3	2	1.2	0.8
11	20.8	5	110	0.18	342	15.5	67.4	123	5.67	10.8	123	0.9	<0.1	1.47	0.05	0.37	1.6	1.92	0.2	2.5	2.7	0.2
12	25.7	28	170	34.3	9960	10.6	2600	> 5000	5.86	10.7	31.7	2.4	0.5	8.42	2.03	11.9	> 500	13.3	2.7	240	1.6	1.2
13	28.4	7	270	0.52	903	9.7	79.1	1670	4	11.8	68.7	2	0.2	1.43	0.07	2.53	9.95	3.36	0.6	16.6	3.1	0.5
14	28.2	8	200	0.69	1250	11.2	124	2220	4.77	14.6	46	2.1	0.4	2.13	0.15	6.84	26.8	3.44	1	19.1	3.3	0.6
15	31.7	8	270	0.5	1160	11.3	101	1640	4.53	13.4	72.3	1.5	0.2	1.87	0.09	4	10.5	3.68	0.8	9.9	3.4	0.5
16	27.8	7	330	0.55	1020	9.9	115	1580	4.12	11.8	69.5	1	0.3	1.74	0.12	3.84	9.9	3.3	1.3	7.3	2.9	0.5
17	33.7	7	240	0.48	1230	9.8	68.5	1470	5.21	14.6	56.6	4.3	0.3	1.68	0.14	2.96	8.26	4.77	0.6	1.9	4.3	0.7
18	53	9	110	0.2	975	19.3	86.8	257	6.01	18.2	107	1	<0.1	1.35	0.06	1.32	8.89	6.35	0.2	12.9	1.4	0.2
19	7	5	90	0.09	3740	16.2	181	> 5000	0.9	4.5	109	0.5	<0.1	2.55	0.05	1.73	81.9	2.43	0.2	5.8	0.6	14
20	19.4	6	120	0.31	412	10.7	64.5	767	4.41	9.8	231	1.1	<0.1	1.65	0.05	0.64	9.36	0.9	0.4	<0.5	1.6	0.2



21	59	6	120	0.13	1130	18.3	44.5	301	8.25	22.2	34.4	2.5	0.9	2.53	0.03	1.05	23.1	2.75	0.2	1.6	1.1	0.6
22	23.5	8	380	0.25	561	5.9	50.1	1140	5.07	21	83.3	9.4	1	1.4	0.04	3.75	8.21	5.29	0.6	< 0.5	5.5	1.2
23	27.5	9	330	0.25	563	9.3	84.5	254	4.76	19.6	82.5	2	0.7	1.45	0.07	4.55	5.81	4.78	0.5	3.2	2.7	0.8
24	15.8	9	690	0.2	349	3.8	14.7	138	4.18	21.2	81.3	17.8	1.1	1.34	0.04	3.31	6.2	5.64	1.3	< 0.5	5	1.2
25	24	7	330	0.16	428	7.6	36.1	186	4.15	19.4	87.4	6.9	0.4	1.11	0.04	4.23	3.65	5.15	0.4	< 0.5	3.6	0.7
26	19.8	7	220	0.23	460	10.3	46	307	4.01	11.7	159	2.3	0.3	1.49	0.04	1.38	6.61	2.9	0.5	2.5	2.7	0.6
27	21.7	7	130	0.25	708	14	64.6	1110	4.42	11.3	175	1.1	< 0.1	1.72	0.05	0.6	7.5	1.35	0.2	< 0.5	1.5	0.2
28	27	6	270	0.25	703	7.2	44	1410	3.22	10.1	83.7	3.4	0.2	1.38	0.04	1.64	7.25	2.99	0.6	< 0.5	3.3	0.5
29	29.1	8	240	0.45	1680	11.2	85.2	2170	4.22	11.9	73.1	1.3	0.3	2.82	0.12	3.57	13	3.18	0.9	9.7	3.2	0.5
30	18.7	6	170	0.21	733	8.5	101	2750	3.54	10.8	112	1.3	0.5	2.24	0.05	6.11	29.2	3	0.6	13.8	2.7	0.8
31	21.9	8	170	0.15	767	10.1	34.6	279	4.33	10.9	139	1.4	0.5	1.42	0.04	1.08	5.15	2.24	0.2	< 0.5	1.9	0.5
32	25.9	8	150	0.16	454	7.2	21.1	111	6.38	14.1	204	9.2	1.5	1.4	0.05	2.06	1.43	4.9	0.6	< 0.5	5.8	1.4
33	18.2	5	160	0.19	512	6.6	47.5	1050	3.86	10.1	103	3.3	1.2	1.77	0.06	3.55	13.1	2.33	0.9	1.3	3.4	1
34	8	21	140	0.1	152	7.7	29.2	133	4.07	16.7	98.1	8.8	< 0.1	157	0.04	1.5	> 500	4.97	0.4	4.4	1.2	9
35	25	7	170	0.42	3190	9.7	97.2	1710	4.15	12.1	103	2	0.5	3.3	0.06	2.11	26.3	2.34	0.6	2.7	2.1	0.5
36	3.2	22	100	0.05	1300	1.4	16.1	101	0.76	5.9	140	2	0.4	0.79	< 0.02	0.57	0.8	1.31	0.4	< 0.5	0.3	0.3
37	12.8	3	290	0.14	721	3.3	7.8	98.2	4.08	13.3	52.1	14.5	1.2	1.38	0.06	2.81	0.84	8.01	0.6	< 0.5	6.8	1.4
38	12.2	31	70	6.59	5930	14.8	1360	> 5000	2.7	6.8	36.1	2.1	0.3	4.41	22.6	55.1	156	7.74	8.2	59.5	0.8	1.3
39	24.7	8	1040	0.33	1410	20.5	70.8	1680	3.6	8.7	73.6	0.7	0.3	1.87	0.16	2.44	12.1	2.27	0.3	14.1	1	0.4
40	26.9	6	280	0.24	850	9.6	57.6	606	4.2	11.3	57.4	3.8	0.3	1.2	0.05	3.44	7.11	3.34	0.3	10.7	3.3	0.5
41	18.8	8	170	0.25	612	8.7	47.1	1020	4.63	16.2	114	3.9	1.2	2.29	0.05	3.63	15.1	5.9	0.7	10.7	3.5	1.1
42	54.7	21	200	0.18	639	11.6	30.7	86.5	6.49	26.3	249	6.2	0.9	1.24	0.04	0.9	1.49	26.9	0.1	4.3	2.7	0.8
43	32.1	9	200	0.36	1930	17.4	192	> 5000	4.95	15.9	89.9	0.9	0.3	1.89	0.05	1.14	25.6	4.09	0.1	26.9	1	0.2
44	6.1	5	170	0.33	461	2.3	12.3	86.2	3.93	6.5	45.8	1	1.1	1.03	0.04	1.7	5.41	0.94	0.6	6.5	1.3	0.9
45	25.2	7	240	0.42	757	8.5	84.4	1360	3.82	12	72	0.7	0.4	1.3	0.07	2.23	9.31	3.61	0.6	10.5	2.4	0.5
46	17.8	11	260	0.28	738	7	61.7	482	2.55	9.3	102	1.1	0.4	3.53	0.03	1.92	11.7	1.98	0.3	12.4	1.3	0.9



<b>47</b>	27.6	8	250	0.5	1260	10.2	119	1640	3.81	14	63.8	1.1	0.5	1.81	0.11	16.3	16.8	4.36	1.2	38.9	2.4	0.5
<b>48</b>	20.8	8	120	0.21	448	19.1	70.4	125	5.5	13.5	90.4	0.9	<0.1	1.59	0.05	0.45	1.72	3.02	<0.1	7	2	0.2
<b>49</b>	34.1	20	170	0.36	3360	13.2	301	2960	6.22	30.9	34.8	1.3	0.3	3.5	0.43	11.8	26.9	8.14	27	89.8	1.4	0.5
<b>50</b>	24.5	7	230	0.32	776	8.7	66.9	1470	3.6	12.4	105	2.4	0.4	1.91	0.07	3.21	10.9	3.75	0.9	8.4	2.5	0.5
<b>51</b>	13.1	7	180	0.17	384	8.4	17.7	49.6	2.75	16.5	166	7.5	0.1	0.56	0.03	0.68	1.68	0.93	<0.1	3.6	2.3	0.7
<b>52</b>	26.5	8	220	0.42	691	9.4	93.2	1360	4.32	13.2	94.5	0.5	0.5	1.27	0.06	2.86	9.59	3.6	0.5	15	1.6	0.5
<b>53</b>	9.6	6	440	0.12	289	5.7	13.1	57.5	0.65	9.3	362	4.9	0.4	0.61	<0.02	0.82	0.72	0.9	0.1	2.7	1.7	0.6
<b>54</b>	53.5	12	130	0.22	1020	17.3	80.3	808	6.11	21.4	95.2	1.8	0.1	1.11	0.06	0.68	8.74	7.54	<0.1	7.6	1.2	0.1
<b>55</b>	8.8	2	150	0.14	1080	2.8	11.4	94.4	8.15	14.7	45.6	1.2	1.1	0.91	0.06	2.16	0.7	0.86	0.2	0.8	0.7	0.7
<b>56</b>	11.9	7	190	0.22	1560	6.2	19.3	88.2	9.29	13.7	78.2	6.7	2.2	1.59	0.05	1.57	0.69	2.51	0.2	<0.5	1.2	1.1
<b>57</b>	26.9	7	220	0.4	905	8.7	78.8	1760	3.94	12.4	69.9	1.2	0.3	1.72	0.08	4.06	10.9	3.66	1	15.3	2.6	0.5
<b>Max</b>	59	31	1040	34.3	9960	20.5	2600	3140	9.29	30.9	362	17.8	2.2	157	22.6	70.3	156	26.9	27	240	6.8	14
<b>Min</b>	3.2	2	70	0.05	152	1.4	7.8	49.6	0.65	4.5	9.3	0.5	0.1	0.56	0.03	0.37	0.69	0.86	0.1	0.8	0.3	0.1
$\bar{X}$	24.4	9.1	246.5	1	1223.3	9.9	140.5	874.8	4.5	14.4	98	3.5	0.6	4.6	0.5	6	14.8	4.3	1.2	18.9	2.5	1.1



Los resultados obtenidos de concentración de elementos traza no normados por la NOM-147 para suelo y sedimento (Li, B, Na, Bi, Mn, Co, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, In, Sn, Sb, Cs, W, Au, Th y U) del análisis de 57 muestras de suelo y sedimento se encuentran contenidos en la Tabla 22 en mg/kg, así como su valor máximo, mínimo y promedio de las concentraciones obtenidas en donde se observa el siguiente comportamiento de las concentraciones promedio: Mn > Zn > Na > Cu > Sr > Li > Au > Sb > Rb > Co > B > In > Mo > Ga > Ca > Zr > Th > W > U > Bi > Nb < In.

## 2.1 Resultados de análisis estadístico en suelo y sedimento

### 2.1.1. Matriz de correlación para todos los elementos

Para el procesamiento de las concentraciones de elementos en las muestras de suelo y sedimento se utilizó el software Statistica 10 y se calculó la correlación de Pearson con significación estadística de 1)  $p < 0.05$ , 2)  $p > 0.01$  y  $p > 0.001$ , para detectar las correlaciones para elementos mayores y elementos traza normados y No Normados en la NOM-147. Desde un punto de vista estadístico, el coeficiente de correlación ( $r$ ) puede dividirse en cuatro clases de correlación:  $r \leq 0,1$  bajo,  $r$  en el rango  $0,1-0,3$  medio,  $r$  en el rango  $0,3-0,5$  alto y  $r \geq 0,5$  significa una interrelación muy fuerte (Weissmannová, Mihočová, Chovanec, & Pavlovský, 2019), por lo que los resultados de este análisis se encuentran resumidos en la tabla 22 señalado en rojo los valores que se consideraron significativos (mayores a 0.7).

Los altos coeficientes de correlación entre los metales pesados indican el origen similar de la contaminación fuentes de contaminación y los coeficientes de correlación muy bajos o negativos reflejan fuentes diferentes, y probablemente está estrechamente relacionado con procesos naturales o geogénicos.

La alta correlación entre los metales pesados observada en los suelos permite inferir que su presencia puede ser resultado de las actividades mineras en la zona y, por ende, su origen es refleja significativamente el antropogénico de las actividades industriales. La correlación baja o negativa de los metales pesados en los suelos también puede referirse a otras fuentes de metales relacionadas con procesos naturales.

Se seleccionaron las asociaciones más significativas entre los elementos traza y los elementos normados en la NOM-147 así como también para los elementos traza y los elementos no normados que cumplieron con los 3 *p* *valius* y coeficiente de correlación  $r2 \geq 0.7$ :

- **Para los elementos en la NOM-147 se encontró As-Fe (0.83) > Pb-Fe (0.82) > Ag-Fe (0.77) > Cd-Fe (0.71)** también se encontró **Ni-Mg (0.80)**
- **Para los metales que no se encuentran en la NOM-147 se encontró Cu-Fe (0.76) > Mn-Fe (0.74)** también se encontró **Ga-Al (0.87) Rb-K (0.79) y Nb-Ti (0.77)**

La alta correlación entre los metales pesados podría indicar que los metales provienen de una fuente de contaminación común y podrían caracterizarse con una migración y transformación similares a través de las condiciones físico-químicas en el medio ambiente.

**Tabla 23.** Resumen de los resultados de la matriz de correlación para los 57 puntos analizados en las muestras de suelo y sedimento, para elementos normados.

Mayores Nom-147	Ca	Fe	Al	Mg	K	P	Ti
As	-	0.83	-	-	-	-	-
Ba	-	-	-	-	-	-	-
Be	-	-	-	-	-	-	-
Cd	-	0.71	-	-	-	-	-
Cr	-	-	-	-	-	-	-
Hg	-	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	-	0.80	-	-	-
Ag	-	0.77	-	-	-	-	-
Pb	-	0.82	-	-	-	-	-
Se	-	-	-	-	-	-	-
Tl	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-

**Tabla 24.** Resumen de los resultados de la matriz de correlación para los 57 puntos analizados en las muestras de suelo y sedimento, para elementos no normados.

Mayores no NOM	Ca	Fe	Al	Mg	K	P	Ti
Mn	-	0.75	-	-	-	-	-
Zn	-	-	-	-	-	-	-
Na	-	-	-	-	-	-	-
Cu	-	0.76	-	-	-	-	-



<b>Sr</b>	-	-	-	-	-	-	-
<b>Sb</b>	-	-	-	-	-	-	-
<b>Li</b>	-	-	-	-	-	-	-
<b>Au</b>	-	-	-	-	-	-	-

### 2.1.2. Análisis de Factores para para todos los elementos

Para el Análisis Factorial se obtuvieron los valores propios (Eigen Values), la carga de Factores (Factor Loadings) y la puntuación de los factores (Factor Score). Para la matriz con todos los elementos analizados se obtuvieron 6 factores que explican el 70% de la variabilidad de la muestra.

La alta correlación entre los metales pesados observada en los suelos refleja significativamente el efecto antropogénico de las actividades industriales. La correlación baja o negativa de los metales pesados en los suelos también puede referirse a otras fuentes de metales relacionadas con procesos naturales.

**Tabla 25.** Resumen de los resultados de la matriz de correlación para los 57 elementos analizados en las muestras de suelo y sedimento.

<b>Factor 1</b>		<b>Factor 2</b>		<b>Factor 3</b>		<b>Factor 4</b>		<b>Factor 5</b>		<b>Factor 6</b>	
<b>Fe</b>	0.91120	<b>V</b>	0.809709	<b>Mo</b>	0.737735	-	-	-	-	-	-
<b>Mn</b>	0.86712	<b>Cr</b>	0.793164	<b>Tl</b>	0.750020	-	-	-	-	-	-
<b>Zn</b>	0.76471	<b>Li</b>	0.823082	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Pb</b>	0.86354	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>As</b>	0.77724	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Cu</b>	0.85589	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Cd</b>	0.74398	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Sb</b>	0.72123	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ag</b>	0.80518	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Au</b>	0.78226	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



**Tabla 26.** Resumen de los resultados de la matriz de correlación para los 57 elementos analizados en las muestras de suelo y sedimento.

Factor	Eigenvalue	Varianza Total %	Eigenvalue Acumulado	Acumulado %
1	10.29231	25.10319	10.29231	25.10319
2	5.87512	14.32956	16.16742	39.43274
3	5.15086	12.56307	21.31828	51.99582
4	4.06461	9.91367	25.38289	61.90949
5	2.26602	5.52688	27.64891	67.43637
6	2.06913	5.04666	29.71804	72.48304

### 3.1 Estimación de índices de contaminación e impacto ecotoxicológico

#### 3.1.1 Material vegetal

##### 3.1.1.1 Índice de Translocación

Los resultados del índice de translocación fueron muy variados siendo el menor valor de 1.31 para Co y el mayor identificado fue de 121.5 para Mn, con un promedio global de 6.5. Las plantas acumuladoras de metales se caracterizan por  $FT > 1$ , por lo que para los elementos evaluados en promedio los individuos muestreados se presentan como plantas acumuladoras.

**Tabla 27.** Índice de translocación de elementos seleccionados en material vegetal

ID	Cd	Co	Cu	Mn	Pb	Zn
31 (raíz)	0.19	1.03	9.71	74.66	0.64	24.32
31 (hojas)	0.16	0.01	14.83	13.98	0.12	78.6
TF	<b>0.8</b>	<b>0.01</b>	<b>1.53</b>	<b>0.19</b>	<b>0.19</b>	<b>3.23</b>
29 (raíz)	46.69	0.94	-	192.21	104.87	240.86
29 (hojas)	1.02	-	19	71.28	0.35	44.59
TF	<b>0.02</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.37</b>	<b>0</b>	<b>0.19</b>
45 (raíz)	3.8	0.77	15.67	156.91	47.45	199.9
45 (hojas)	4.2	-	7.97	26.85	-	130.55
TF	<b>1.1</b>	<b>-</b>	<b>0.51</b>	<b>0.17</b>	<b>-</b>	<b>0.65</b>



<b>28 (raíz)</b>	2.28	0.82	14.72	105.8	51.31	225.28
<b>28 (hojas)</b>	0.09	0.09	4.69	16.35	0.36	19.45
<b>TF</b>	<b>0.04</b>	<b>0.11</b>	<b>0.32</b>	<b>0.15</b>	<b>0.01</b>	<b>0.09</b>
<b>62 (raíz)</b>	0.34	-	3.16	3.48	5.19	22.07
<b>62 (hojas)</b>	-	-	0	0.01	0.03	0.41
<b>TF</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.02</b>
<b>27 (raíz)</b>	0.33	0.06	1.62	1.13	-	13.49
<b>27 (hojas)</b>	0.17	-	21.19	137.65	-	86.01
<b>TF</b>	<b>0.51</b>	<b>-</b>	<b>13.09</b>	<b>121.51</b>	<b>-</b>	<b>6.37</b>
<b>20 (raíz)</b>	0.03	-	0.73	0.53	-	2.1
<b>20 (hojas)</b>	0.21	0.01	18.17	58.3	0.75	54.77
<b>TF</b>	<b>6.86</b>	<b>-</b>	<b>24.79</b>	<b>109.35</b>	<b>-</b>	<b>26.11</b>
<b>58 (raíz)</b>	5.37	0.56	5.48	27.88	25.28	138.32
<b>58 (hojas)</b>	9.24	0.27	8.12	32.12	1.15	266.58
<b>TF</b>	<b>1.72</b>	<b>0.47</b>	<b>1.48</b>	<b>1.15</b>	<b>0.05</b>	<b>1.93</b>
<b>41 (raíz)</b>	0.53	0.08	2.36	1.33	0.28	3.81
<b>41 (hojas)</b>	0.34	0.23	13.19	22.44	1.46	21.51
<b>TF</b>	<b>0.64</b>	<b>2.88</b>	<b>5.58</b>	<b>16.82</b>	<b>5.31</b>	<b>5.65</b>
<b>19 (raíz)</b>	1.24	0.08	1.58	2.17	3.75	8.33
<b>19 (hojas)</b>	2.13	0.34	9.25	56.43	28.03	278.31
<b>TF</b>	<b>1.72</b>	<b>4.18</b>	<b>5.87</b>	<b>26.04</b>	<b>7.47</b>	<b>33.41</b>
<b>5 (raíz)</b>	1.15	0.53	15.49	127.33	47.45	77.55
<b>5 (hojas)</b>	5.31	-	15.26	17.05	0.93	54.74
<b>TF</b>	<b>4.62</b>	<b>-</b>	<b>0.99</b>	<b>0.13</b>	<b>0.02</b>	<b>0.71</b>
<b>7 (raíz)</b>	3.13	1.14	13.86	103.35	23.78	31.98
<b>7 (hojas)</b>	0.3	0.22	12.53	37.63	0.75	61.65
<b>TF</b>	<b>0.1</b>	<b>0.19</b>	<b>0.9</b>	<b>0.36</b>	<b>0.03</b>	<b>1.93</b>
<b>Max</b>	6.86	4.18	24.79	121.51	7.47	33.41
<b>Min</b>	0.022	0.011	0.0005	0.003	0.003	0.019
<b>Promedio</b>	1.65	1.31	5	23.02	1.45	6.69

### 3.1.2 Suelo y Sedimento

Sobre la base de las concentraciones de elementos determinadas en las muestras de suelo y sedimento, se calcularon dos índices simples y tres índices complejos. Los índices



individuales indicaron la contaminación por elemento (Igeo y EF) y los índices complejos reflejan la calidad del suelo para todos los elementos evaluados.

Los índices individuales -índice de geoacumulación (Igeo) y factor de enriquecimiento (EF) se utilizaron para evaluar el impacto antropogénico de la contaminación del suelo y los sedimentos por elementos potencialmente tóxicos.

### **3.1.2.1 Factor de enriquecimiento (FE)**

Para el cálculo del factor de enriquecimiento se utilizó la fórmula presentada en el capítulo dos con 5 elementos normalizadores de conformidad con lo encontrado en el análisis de matriz de correlación se seleccionó como elemento normalizador el Fe dado que presenta las correlaciones más fuertes con los elementos de interés ya que éste se caracteriza por las concentraciones relativamente estables en los suelos.

Al igual que para la evaluación de las concentraciones elementales iniciales los resultados obtenidos se separarán en las zonas de estudio anteriormente definidos.

Se encontró el mínimo enriquecimiento posible para la totalidad de los puntos en los suelos y sedimentos de la zona norte para más de la mitad de los elementos normados dentro la NOM-147 (V, Cr, Ba, Tl, Hg, y Be) así como para casi todos los puntos para Ni y Se. Sin embargo, para elementos con importantes potenciales tóxicos como el Pb, As y Cd se encontraron puntos dentro de las clasificaciones que representa algún tipo de enriquecimiento, con aproximadamente 25% de los puntos para estos tres elementos dentro de la clasificación de enriquecimiento moderado, y 17%, 7% y 12% respectivamente dentro de la clasificación de enriquecimiento significativo, encontrándose también como valor máximo de FE para todos los elementos, el valor 210.3 mg/kg de Cd en el punto #19, el cual se encuentra en las cercanías de los jales la concha y entraría en la clasificación de enriquecimiento extremadamente alto. También se encontró que, para todos los elementos a excepción de Ag, la mediana está en la categoría de deficiencia a enriquecimiento mínimo, lo cual deja en evidencia también los altos valores encontrados para este elemento.

### Valores de FE para EPT de la NOM-147 para la Zona Norte

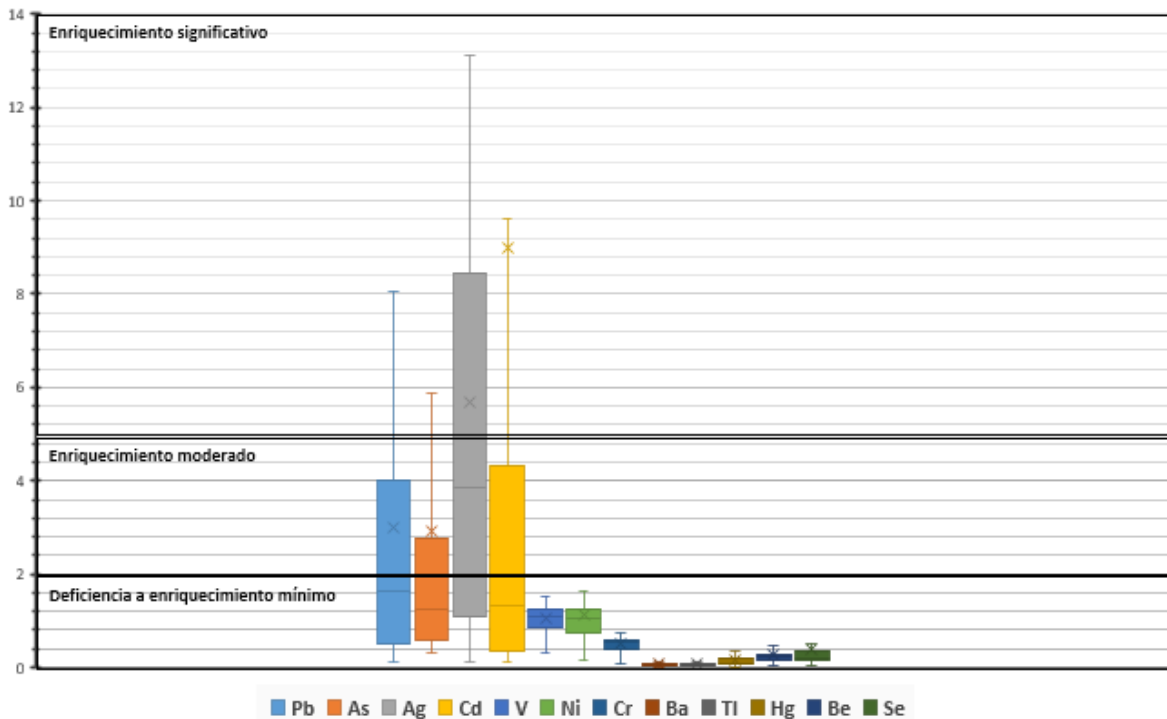


Figura 17. Valores de FE para EPT de la NOM-147 para la Zona Norte.

Para los otros EPT se encontró que la totalidad de los puntos de Rb y Mo están dentro de la categoría de menor enriquecimiento, así como para el U con la excepción del punto #19 cercano al jale la concha, en la categoría enriquecimiento significativo; en esta misma categoría también presentan puntos Cu y Zn con el 2% y el 7% de su total de puntos respectivamente. Por último, se encuentran un máximo local con un valor de FE de 42.2 para el Sb en el Punto #13

Para la zona central a diferencia de la zona norter el Tl, Hg y Se, presenta valores entre las categorías de enriquecimiento, con una especial importancia el Tl con único punto (#34) dentro la categoría de enriquecimiento muy alto y el Hg también con uno en la clasificación de enriquecimiento moderado. (figura 23). Se vuelven a presentar los elementos de Pb, As, Ag, Cd con una importante presencia de Ag (66%) en la clasificación de enriquecimiento significativo, así como un 77% de Pb y Cd y un 22% de As en la categoría de enriquecimiento moderado

### Valores de FE de Otros EPT para la Zona Norte

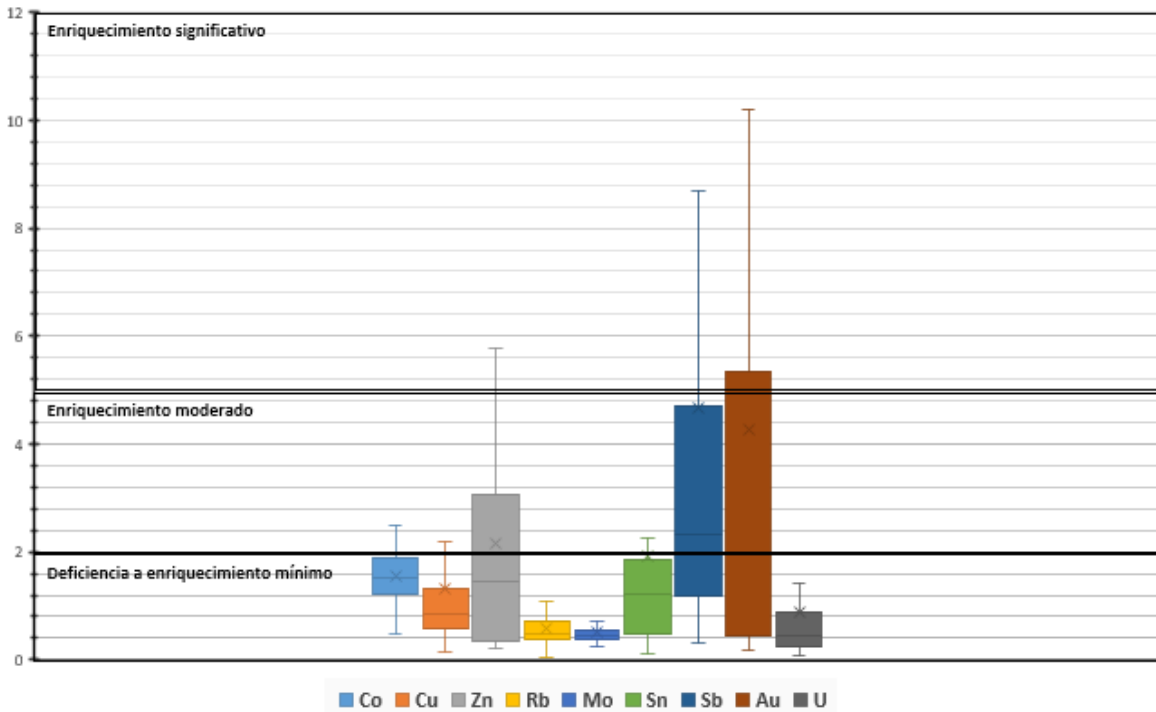


Figura 18. Valores de FE de otros EPT para la Zona Nortor.

### Valores de FE para EPT de la NOM-147 para la Zona Centro

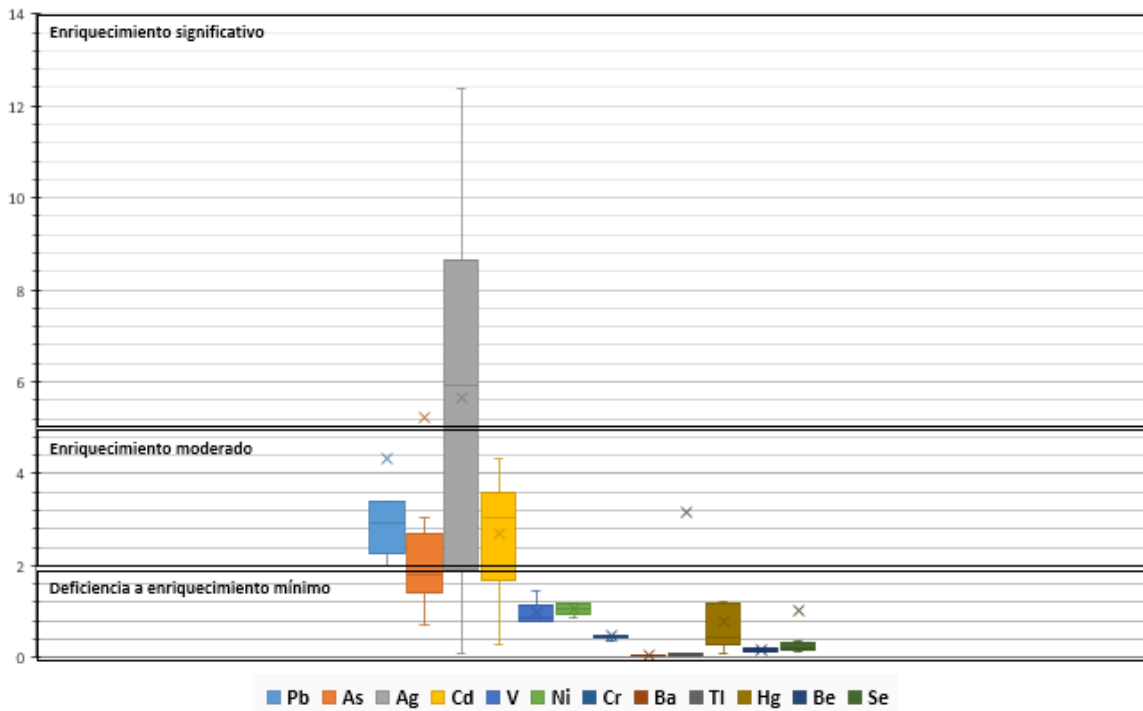
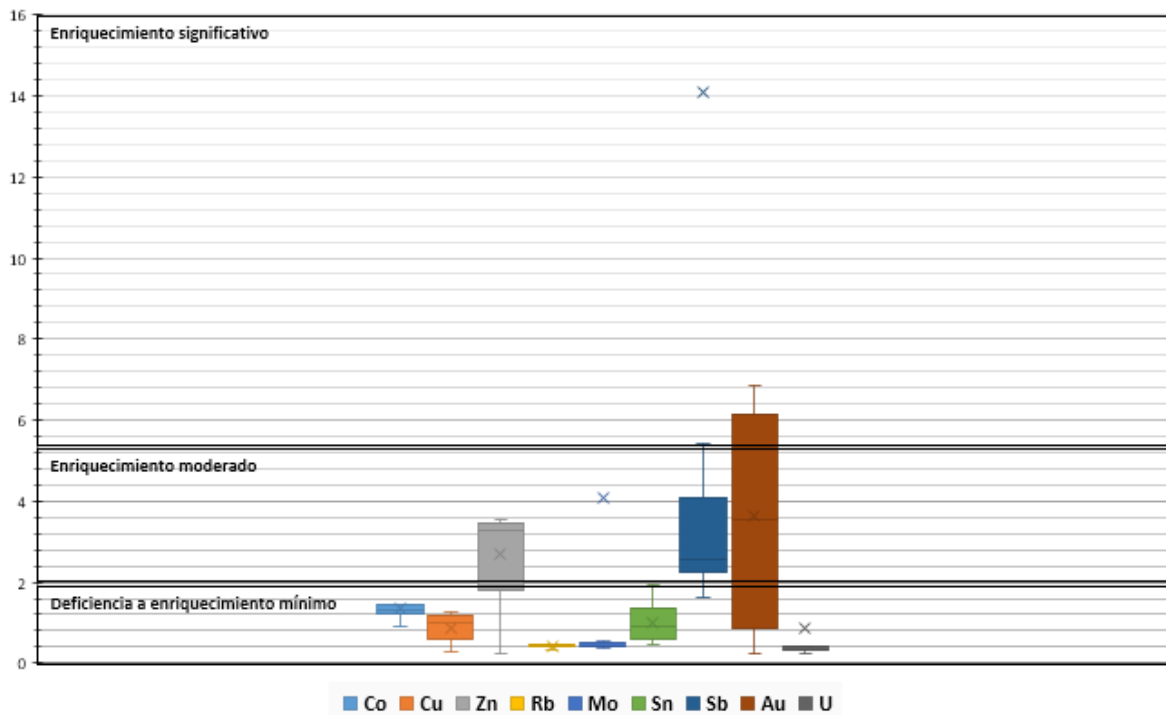


Figura 19. Valores de FE para EPT de la NOM-147 para la Zona Centro.

Para Co, Cu, Rb, Sn, U y Mo se encontró que la totalidad de sus puntos no se encuentran enriquecidos con la excepción de un punto para cada uno de los dos últimos de estos elementos que presentan un punto en la categoría de enriquecimiento significativo y en la categoría de enriquecimiento muy alto respectivamente. Por último, se encuentran un máximo local con un valor de FE de 104.6 para el Sb en el punto #34, el cual de acuerdo a la plancha E14-A78 para la zona minera de Taxco, se encuentra bastante cerca la mina la Aurora.

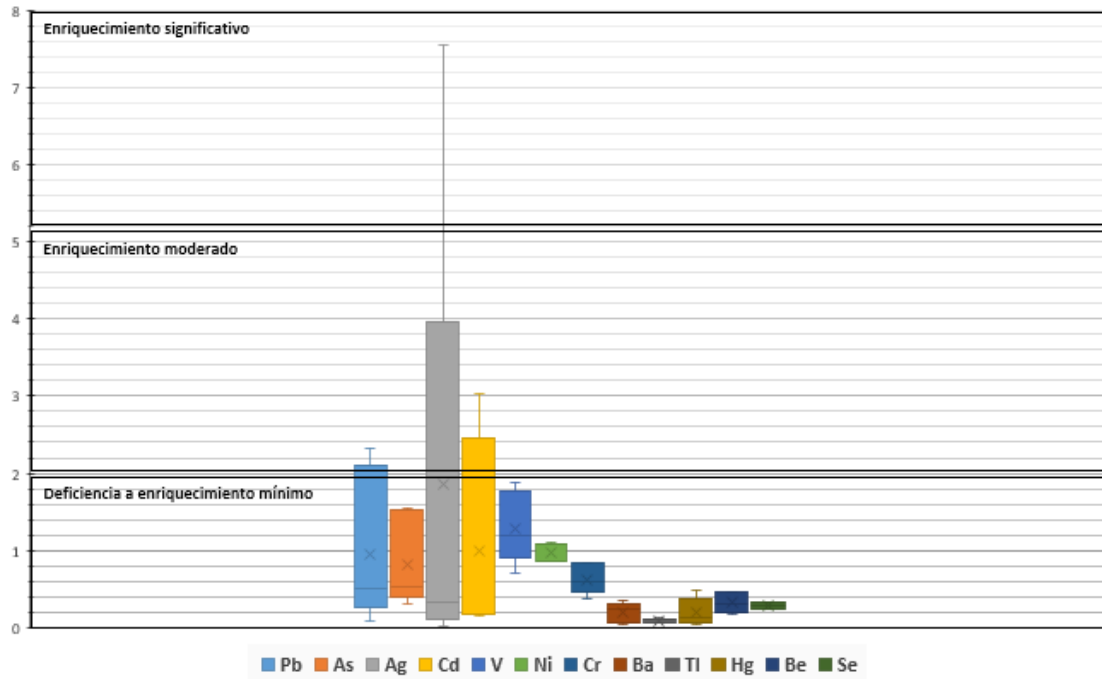
**Valores de FE de Otros EPT para la Zona Centro**



**Figura 20.** Valores de FE de otros EPT para la Zona Centro.

Por ultimo para la zona sur, se presenta un importante cambio en que sumado a los elementos que se presentaron en otras zonas como de enriquecimiento mínimo (Ni, Cr, Be, Se) se suma el As, (lo que podría indicar una disminución de las concentraciones debida al aumento de la distancia con las posibles fuentes de emanación que representan los jales, sim embargo aún se encuentra un 33% de los puntos de esta zona en una clasificación de enriquecimiento moderado para Pb y Cd y un 16.6% de los puntos para Ag en la zona de enriquecimiento significativo.

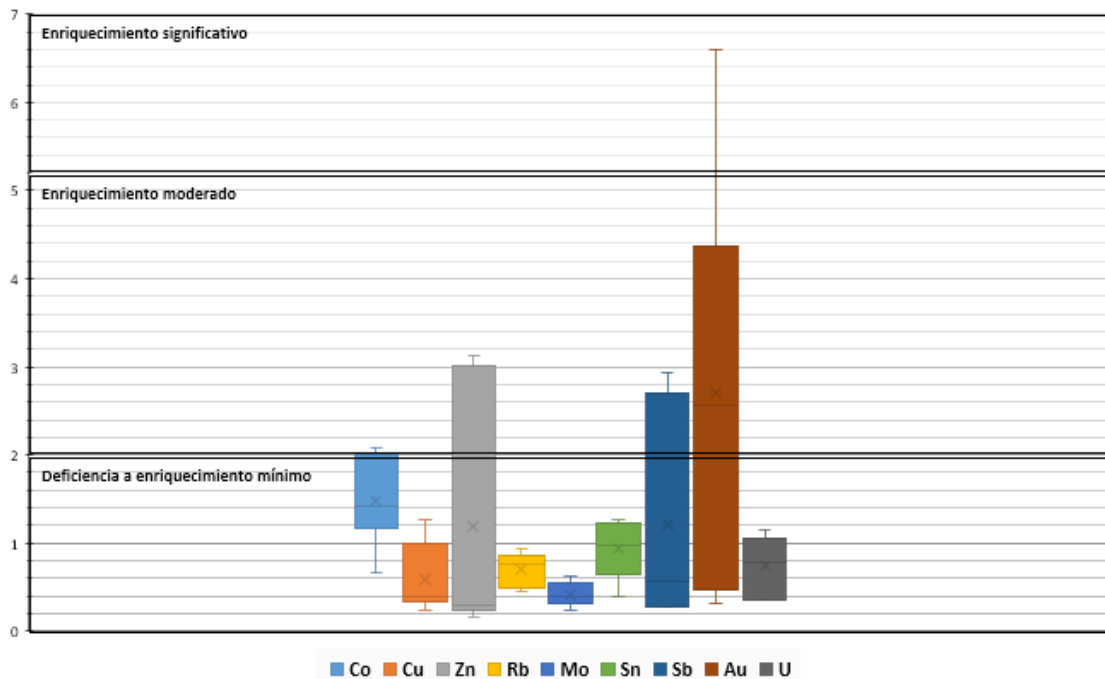
**Valores de FE para EPT de la NOM-147 para la Zona Sur**



**Figura 21.** Valores de FE para EPT de la NOM-147 para la Zona Sur.

Para los elementos no normados en general se sigue el mismo patrón que para la zona centro, sin presentarse esta vez para ninguno de los elementos un valor de FE mayor a

**Valores de FE de Otros EPT para la Zona Sur**

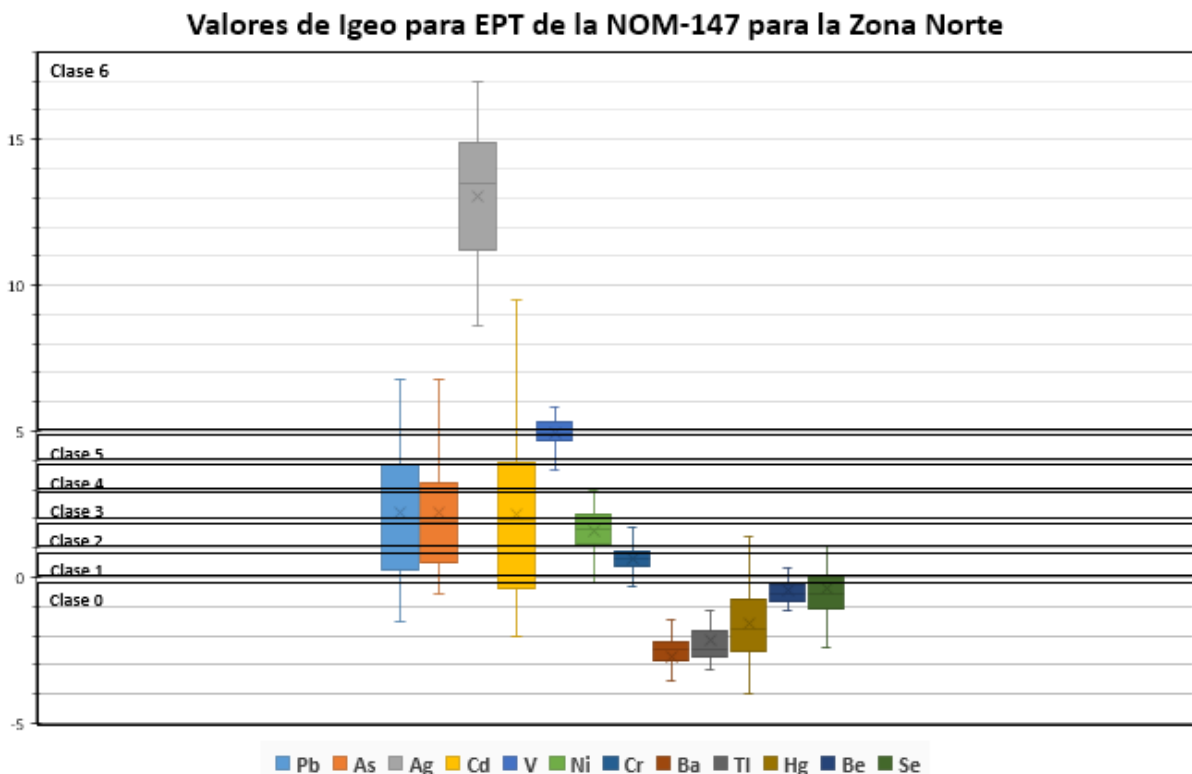


**Figura 22.** Valores de FE de otros EPT para la Zona Sur.

los clasificados como enriquecimiento significativo, que se presenta para el Au en el punto #52

Los valores promedio para toda el área de estudio de FE sugieren de manera general un enriquecimiento mínimo (valores menores que 2) para elementos normados como V, Ni, Cr, Ba, Tl, Hg, Be y Se, así como para Co, Cu, Rb, Mo, Sn, y U para los elementos no normados por lo que la razón principal de la concentración de estos metales se relaciona a fuentes naturales. Por otro lado, los valores promedio de EF para elementos como Pb, As, Zn y Au fueron superiores a 2 (enriquecimiento moderado) por lo que se pueden relacionar con fuentes de enriquecimiento antropogénicas. Por último, los valores muestran que en promedio para Ag, Cd y Sb se presentan los valores más altos de enriquecimiento entrando en la clasificación de enriquecimiento significativo cuya fuente principal son los aportes antropogénicos procedentes de actividades industriales.

### 3.1.2.2 Índice de Geo acumulación (Igeo)



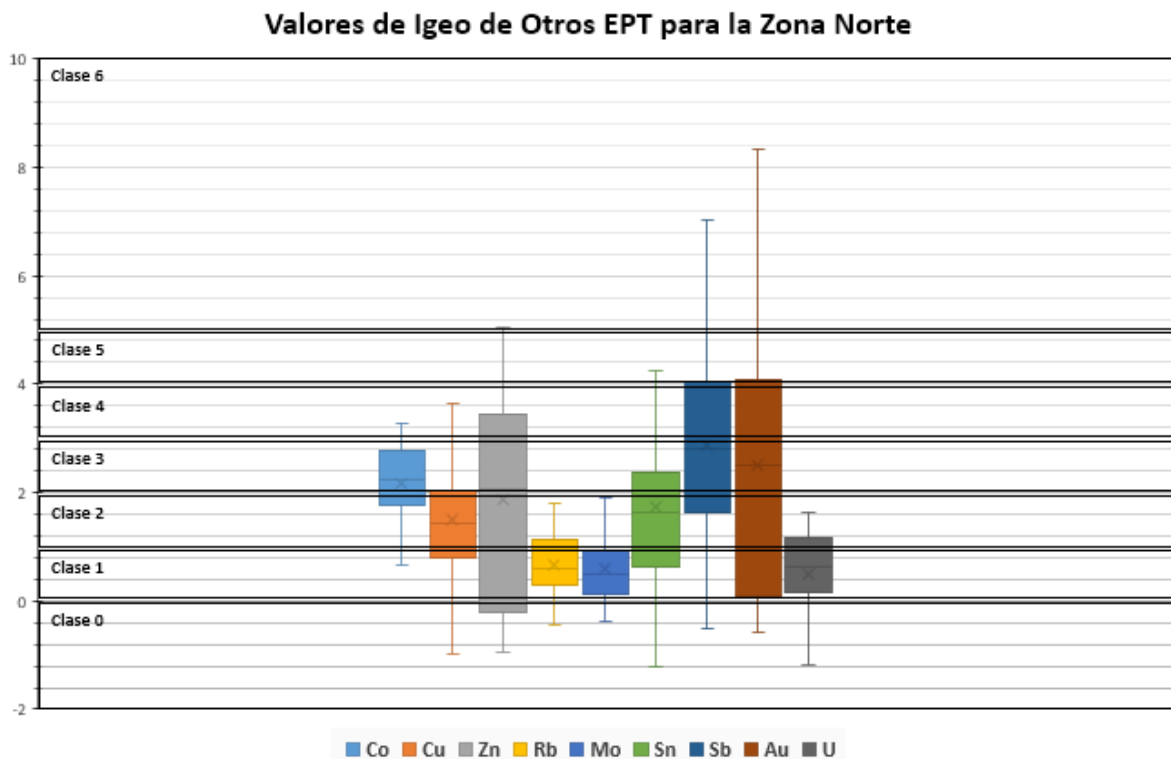
**Figura 23.** Valores de Igeo para EPT de la NOM-147 para la Zona Norte.



Para el índice de Geo-acumulación se presentan muchas más variaciones que para el Factor de enriquecimiento, aunque también se presentan bajas clasificaciones de contaminación para Ba, Tl, Hg, Be, Se.

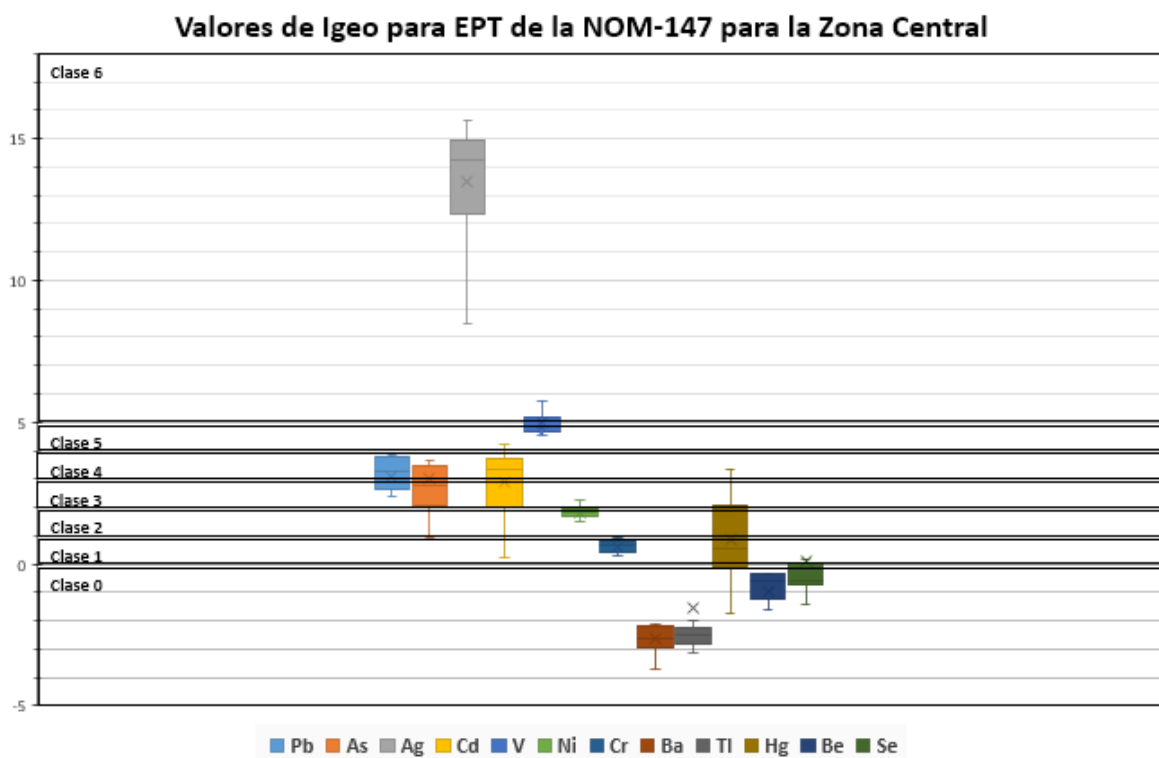
Sin embargo, para los metales como el Pb, As, Cd y V la mayoría de sus puntos se presentan en las clasificaciones que representan un nivel de contaminación importante (de la clase 3 a la clase 6) presentando estos 4 elementos 12%, 5%, 12% y 43% de sus puntos en la Clase 6 (extremadamente contaminado). También resulta importante resaltar que para el caso particular de Ag encontramos que la totalidad de los puntos se encuentran en esta misma clasificación.

Respecto a los elementos potencialmente tóxicos no normados se encuentra que, a diferencia de los valores de FE, elementos como Au, Sn, Zn y Cu cuentan con valores dentro de la máxima clase (extremadamente contaminado), así como para los elementos Rb y Mo algunos de sus puntos alcanzan la clasificación de moderadamente contaminado (Clase 2) o moderadamente a muy contaminado (clase 3)



**Figura 24.** Valores de Igeo de otros EPT para la Zona Norte.

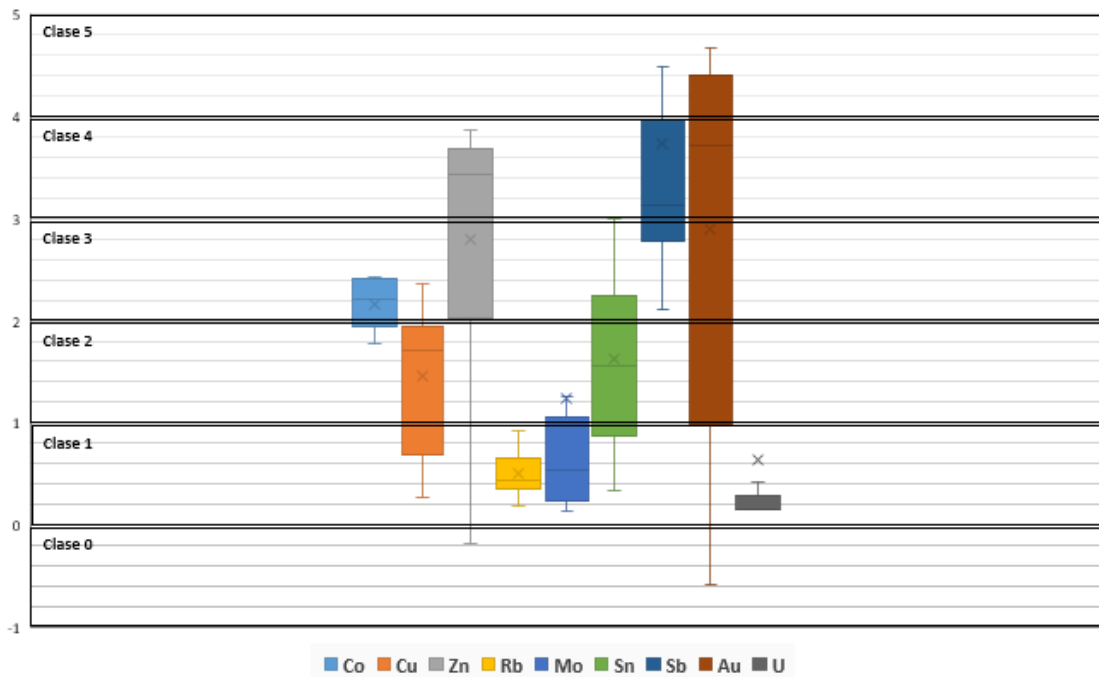
Para la zona central se presentan muchas más variaciones que para la zona norte presentando solo clasificaciones de no contaminación Ba y Be, y clasificaciones de no contaminado a moderadamente contaminado elementos como el Cr y el Hg. También se presenta un notorio incremento en los valores de clases que representan niveles de contaminación significativos para el resto de elementos, presentando el As un valor de 44% en la clasificación de moderadamente a muy contaminado, Pb y Cd con 44% y 55% de sus puntos en la clasificación de muy contaminado y el Tl y el V con 11% y 44% en la clasificación de extremadamente contaminado.



**Figura 25.** Valores de Igeo para EPT de la NOM-147 para la Zona Centro

Respecto a los elementos potencialmente tóxicos no normados se encuentra como único punto con una alta clasificación, el punto #34 en la clase 5 para el U y la clase 6 para Mo Y Sb, siendo este último junto al Au y el Zn los elementos con puntos en las clases superiores a la 3 que representa algún grado de contaminación muy alto.

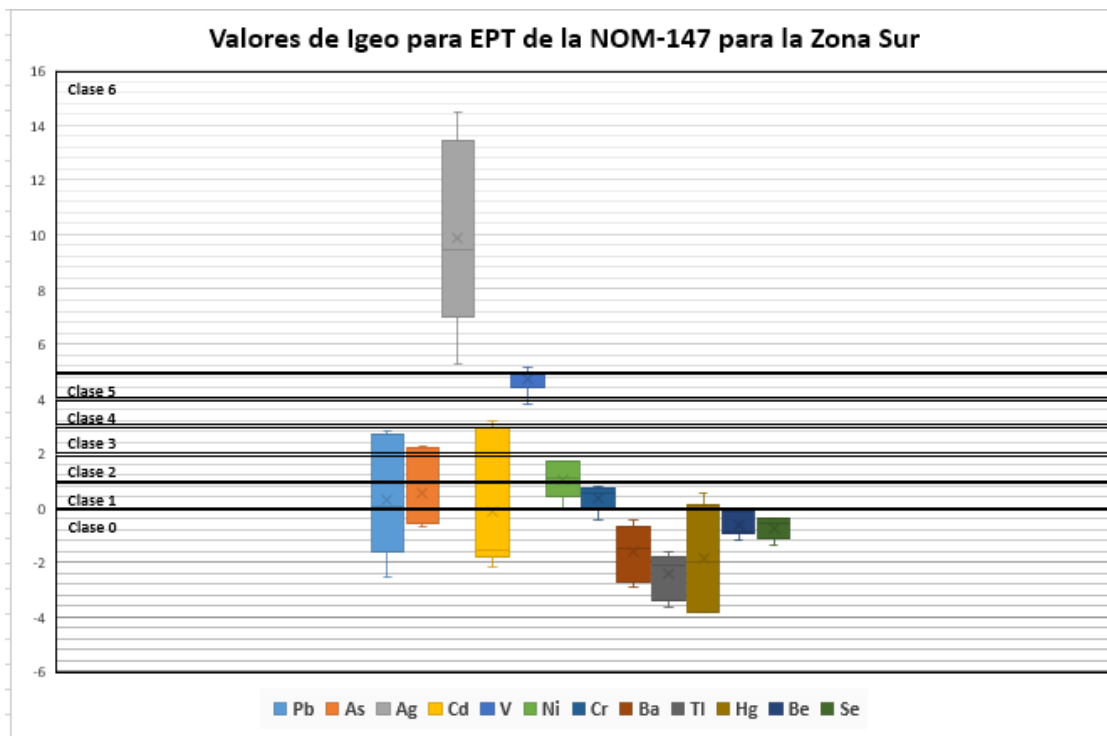
**Valores de Igeo de Otros EPT para la Zona Central**



*Figura 26. Valores de Igeo de otros EPT para la Zona Central.*

por ultimo en la zona sur se presentan valores de no contaminación a moderadamente contaminado para los elementos de Cr, Ba, Tl, Hg, Be y Se. Así como un 33% para Pb y As

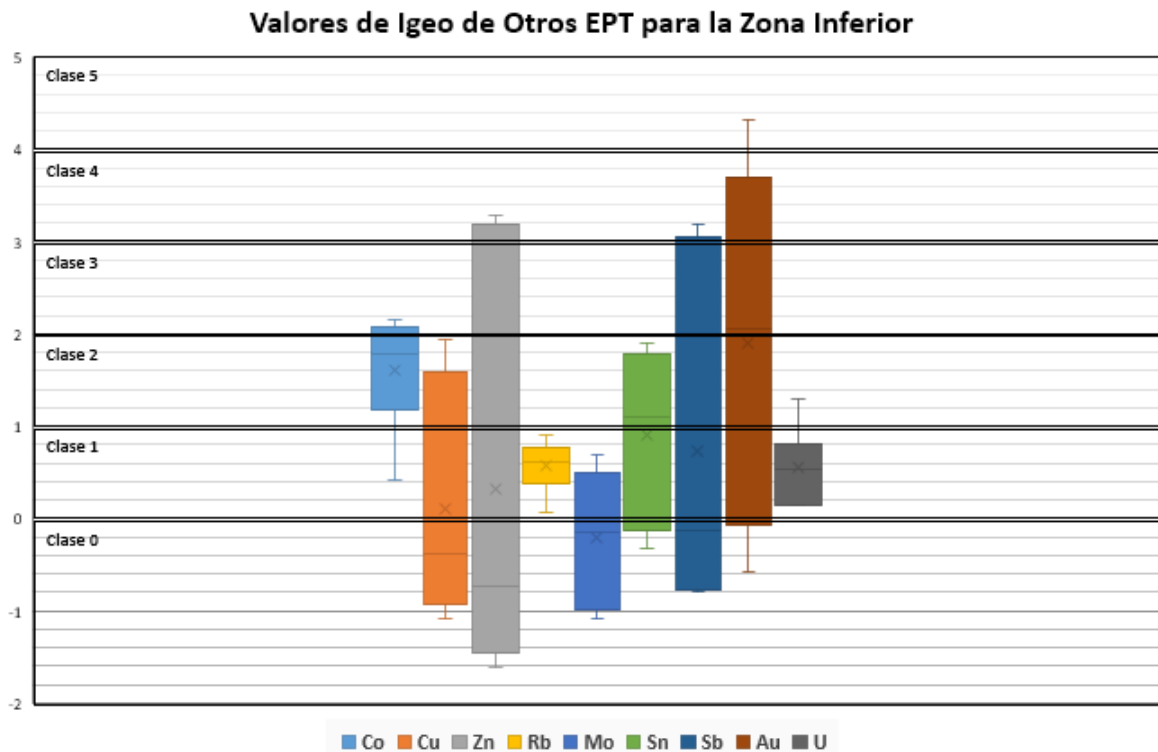
**Valores de Igeo para EPT de la NOM-147 para la Zona Sur**



*Figura 27. Valores de Igeo para EPT de la NOM-147 para la Zona Sur.*

en la clasificación de moderado a muy contaminado y 17% para Cd, presentándose V con un 26% de sus puntos en la clasificación de extremadamente contaminado.

Para los elementos no normados la máxima clasificación encontrada es la clase 5 en el punto #52, para el Au; a pesar de esto se encuentran valores para todos los elementos con la excepción del U y Rb (por completo inferiores a la clase 2) desde la clase 0 hasta la clase 4.



**Figura 28.** Valores de Igeo de otros EPT para la Zona Sur.

Los valores promedio de índice de geo acumulación para la totalidad del área de estudio sugieren de manera general que elementos como Ba, Tl, Hg, Be y Se cómo no contaminados por lo que sus concentraciones son similares al fondo geoquímico para la zona. Para elementos de interés por su potencial toxico como el Cd, As y Pb cuentan con valores de moderado a muy contaminado (clase 3) lo que deja en evidencia la posibilidad de impacto a la salud y el medio ambiente. Para los elementos no normados, el Co, Sn y Au alcanzaron la misma clasificación siendo esta la máxima alcanzada para el grupo de no normados.



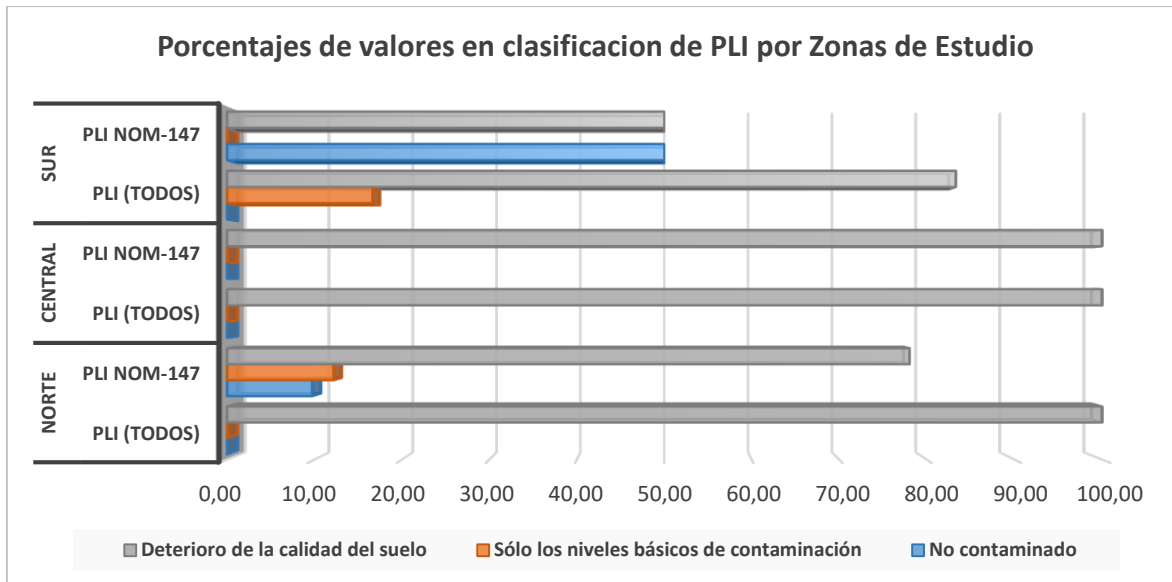
Respecto al caso especial de la Ag que para la totalidad de los puntos evaluados presento una clasificación de extremadamente contaminado, lo que puede deberse a la larga historia de extracción de plata, así como la presencia de depósitos epítomales de Pb-Zn-Ag Cu, en la zona.

En este estudio, los índices integrados de contaminación, índice de carga de contaminación (PLI), el grado de contaminación (Cdeg) y el factor de contaminación modificado (mCdeg) para evaluar la contaminación del suelo por elementos potencialmente Tóxicos.

### ***3.1.2.3 Índice de carga de contaminación***

Para las zonas de estudio se calculó el PLI para los 56 elementos evaluados como para solo los elementos normados en la NOM-147, con máximos y mínimos bastante similares, sin embargo, al evaluar su clasificación de contaminación respecto a su valor encontramos que cuando se evalúan todos los metales el 100% de los puntos evaluados se encuentran en la máxima clasificación, pero al evaluar solo los normados este valor se reduce al 78%. Compartiendo esta tendencia con la zona sur la cual reduce el número de puntos clasificados en la máxima categoría del 100% de los puntos al 50%. Por ultimo al evaluar la zona centro encontramos que sin importar que grupo de elementos se evalué la totalidad de los puntos se encuentran en la máxima clasificación posible.

El valor máximo para la totalidad del área de estudio en la zona norte en el punto #13 con un valor de 9,9 para la totalidad de los metales evaluados, y el punto #38 con un valor de 9,1 para los elementos normados en la NOM-147.



**Figura 29.** Porcentajes de valores de clasificación de PLI por Zonas de Estudio

### 3.1.2.4 Grado de contaminación (Cd) y grado de contaminación modificado (mCdeg)

La media del grado de contaminación (Cd) para toda el área de estudio para todos los metales fue de 320,09 y 151,7 para los metales normados en la NOM-147, para la zona norte es 3391,07 y 171,03; 140,7 y 141,5, para la zona centro y 104.1 y 32.7 para la zona sur. El grado mínimo de contaminación para todos los metales fue de 42,03 (grado de contaminación muy alto) en el punto #32 localizado en la zona central y 10,8 (grado de contaminación moderada) en el punto #38 localizado en la zona norte para los elementos normados en la NOM-147. Los valores máximos fueron de 4135,7 y 2262,4 (grado de contaminación muy alto) en el punto #39 de la zona norte para ambos grupos de elementos.

De manera general los valores encontrados para el grupo de todos los elementos presentan mayores niveles de grado de contaminación, estando el 100% de los puntos evaluados para las zonas superior e intermedia en el grado de contaminación muy alto.

Con los datos calculados de Cd se procedió a calcular el grado de contaminación modificado mCd el cual al tomar en cuenta el número de elementos evaluados normaliza los resultados obtenidos. La media del grado de contaminación modificado (mCd) para toda el área de estudio para todos los metales fue de 10,4 y 12,6 para los metales normados en la NOM-147,

por lo que estarían en la clasificación de grado de contaminación muy alto, sin embargo, vale la pena recalcar que a diferencia del Cd este grado de contaminación no representa la máxima clasificación del mCd. Para la zona norte es 11,5 y 14,2 respectivamente, 10,2 y 11,8 para la zona centro y 3,06 y 2,73 para la zona sur. El grado mínimo de contaminación para todos los metales fue de 1,5 (grado de contaminación bajo) en el punto #B-14 localizado en la zona sur y 0,9 (grado de contaminación muy baja) en el punto #38 localizado en la zona norte para los elementos normados en la NOM-147. El valor máximo fue de 121,6 y 188,5 (grado de contaminación ultra alto) en el punto #39 de la zona norte para ambos grupos de elementos.

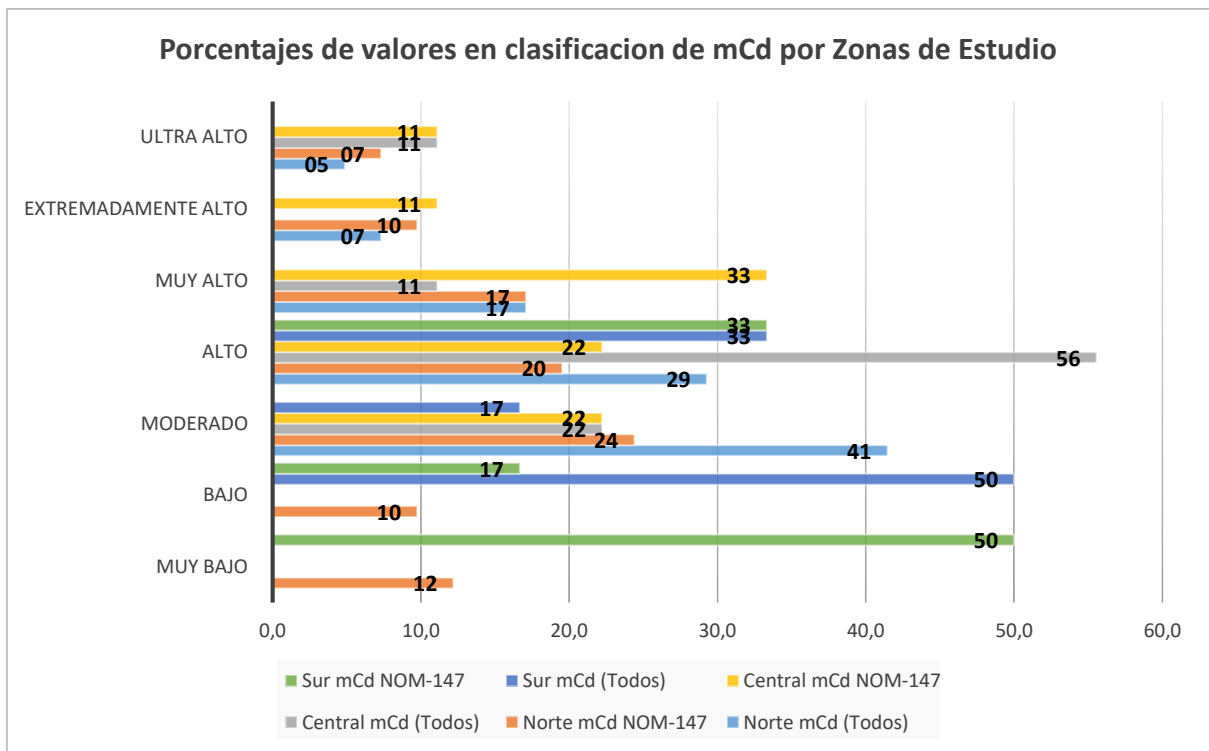


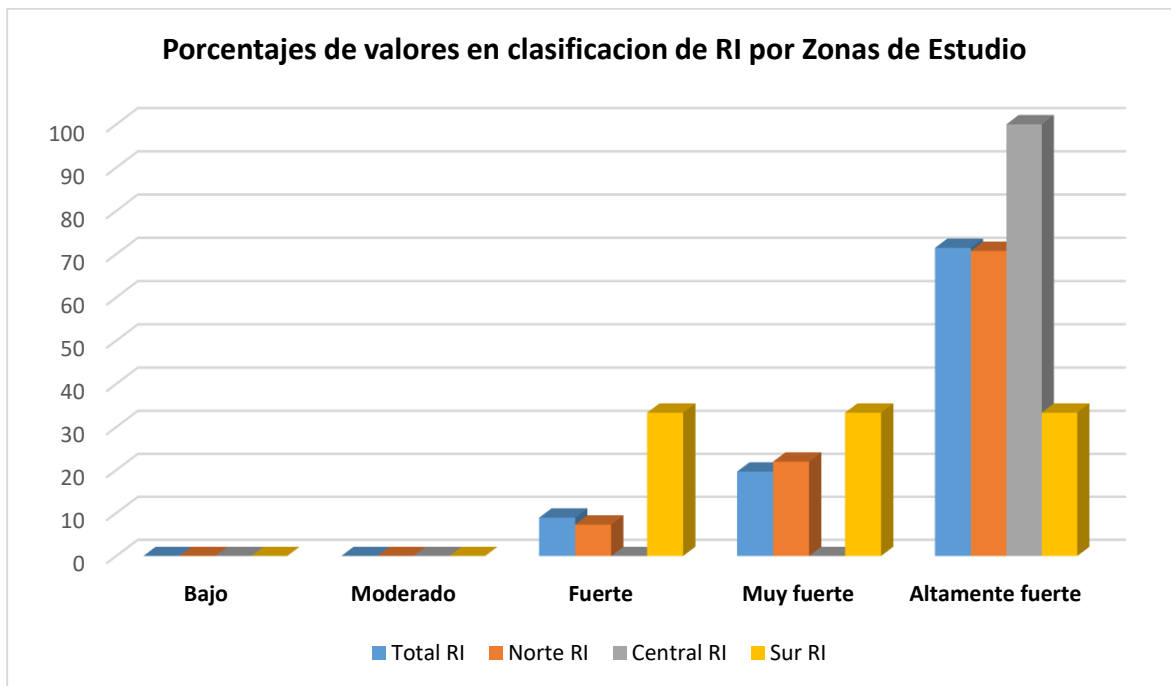
Figura 30. Porcentajes de valores de clasificación de mCdeg por Zonas de Estudio.

### 3.1.2.5 Grados de riesgo ecológico potencial (RI)

El riesgo ecológico potencial (RI), dada su fórmula y las variables necesarias se calculó el grado de riesgo ecológico potencial para los elementos Zn, Cr, Cu, Pb, As, Cd, Hg y Ni.

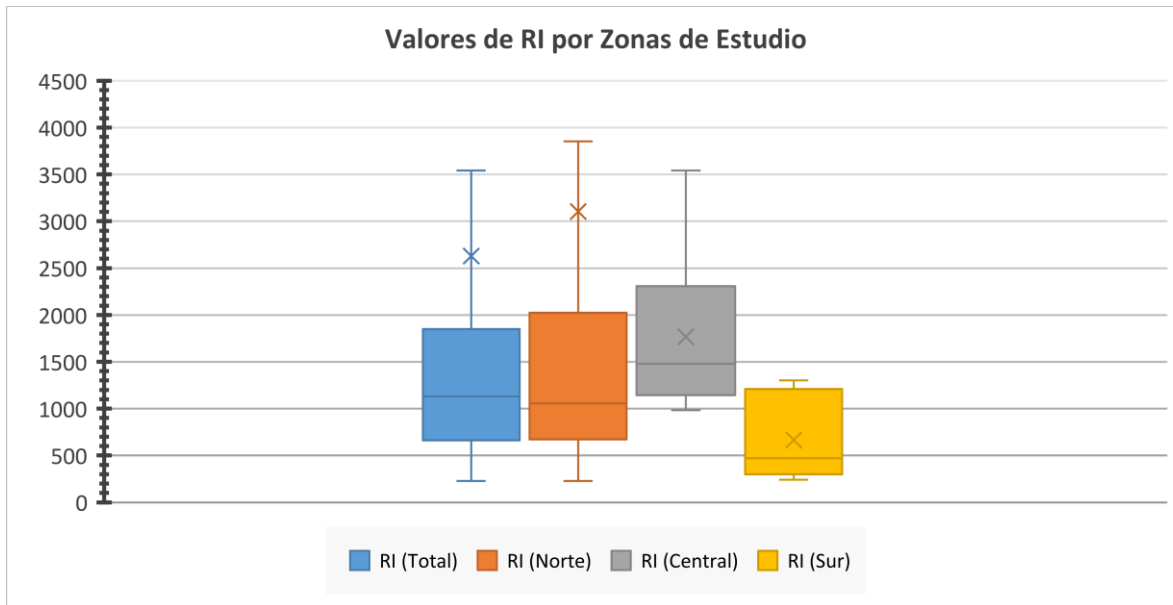
Los valores de RI para la totalidad del área, variaron entre 228,7 y 42267,1 con un promedio de 2627,4 lo que representa un fuerte riesgo ecológico, con aproximadamente el 70% de los

valores de RI en la clasificación de altamente fuerte para el total de la zona de estudio, para la zona norte encontramos valores desde 228,7 hasta 42267,18 con un promedio de 3103,7 y un 70% de los puntos dentro de clasificación altamente fuerte; la zona centro cuenta con un 100% de sus puntos con una clasificación altamente fuerte y valores desde 982,1 y 3542,1 por ultimo la zona sur cuenta con valores desde 242,7 y 1299,7 y contando con el menor porcentaje de puntos dentro de la clasificación altamente fuerte con solo aproximadamente un 30% de sus puntos.



**Figura 31.** *Porcentajes de valores de clasificación de RI por Zonas de Estudio.*



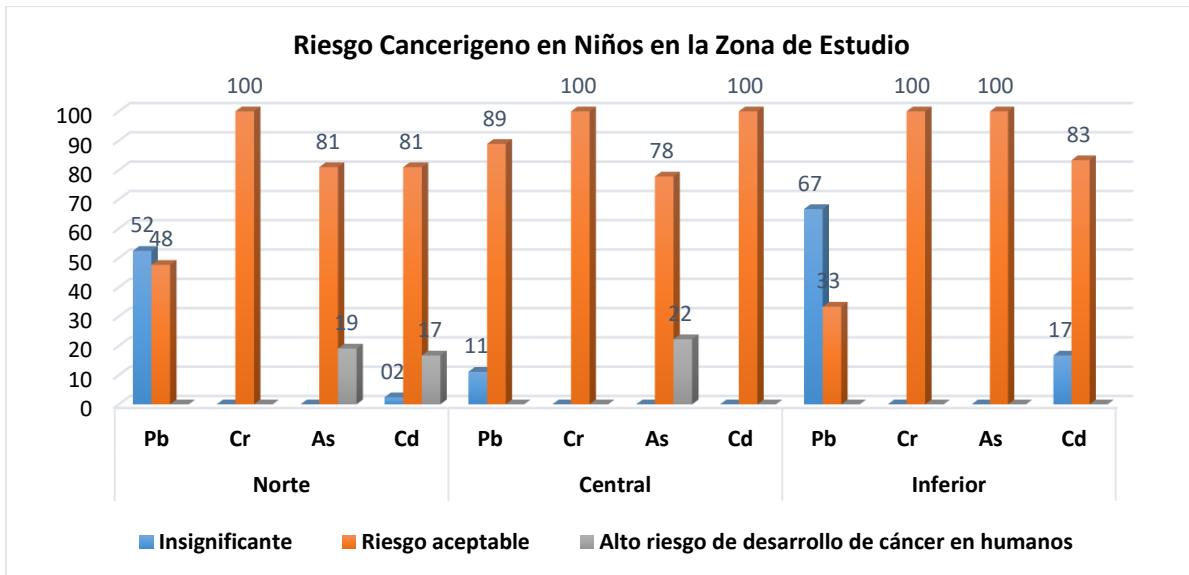


**Figura 32.** Valores de RI por Zonas de Estudio.

### 3.1.2.6 Riesgo Cancerígeno

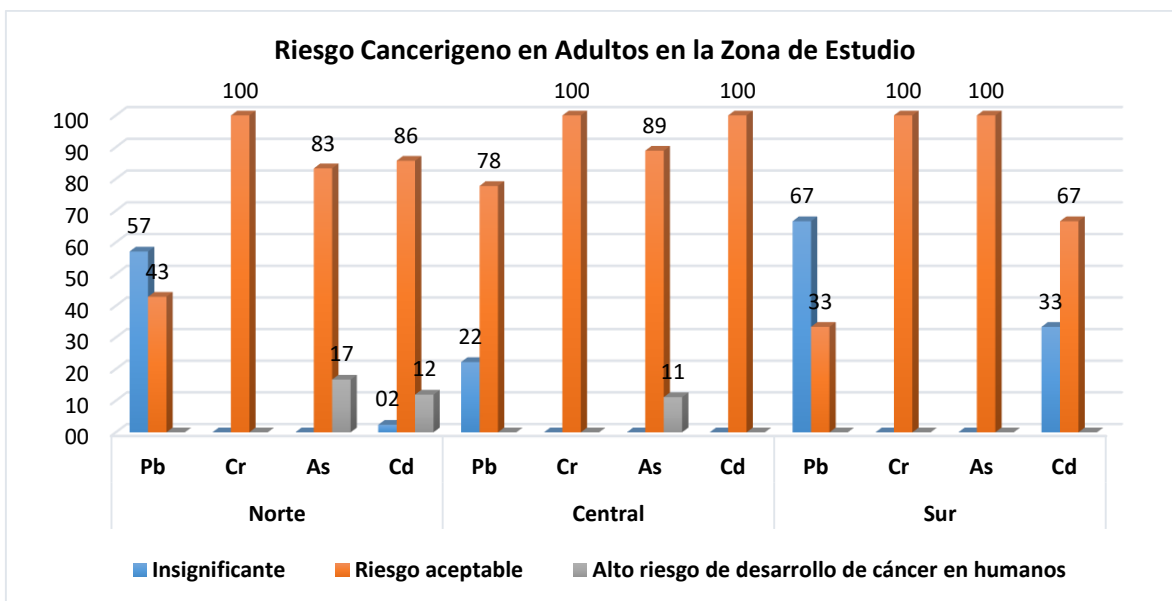
Para el riesgo cancerígeno para niños para la zona norte encontramos que para la mayoría de los puntos de Pb y la totalidad de los puntos de Cr de la zona norte el riesgo de desarrollar cáncer a futuro como producto de a su exposición se encuentran en las categorías de insignificante (52%) y aceptable (100%) respectivamente por lo que no representarían mayores riesgos para la población, sin embargo al evaluar el As y Cd encontramos que para un 19% y un 17% de los puntos se cuenta con un alto riesgo de desarrollo de cáncer a lo largo del tiempo medio de vida.

Para la zona centro encontramos que solo el As representaría un alto riesgo con un 22% de sus puntos dentro en esta zona en esta categoría, mientras para zona sur no se encuentran puntos dentro de la clasificación de riesgo.



**Figura 33.** Valores de Riesgo Cancerígeno en Niños por Zonas de Estudio.

Para el riesgo cancerígeno para la totalidad de la zona de estudio se encontró que para la mayoría de los elementos el riesgo de desarrollar cáncer a futuro como producto de a su exposición se encuentran en las categorías de insignificante y aceptable por lo que no representarían mayores riesgos para la población, solo con pequeños porcentajes para As en las zonas superior e intermedia 17% y 12% respectivamente y un 12 de los puntos para Cd en la zona centro.



**Figura 34.** Valores de Riesgo Cancerígeno en Adultos por Zonas de Estudio.



## 4.1 Mapas geo estadísticos de dispersión de elementos de alto impacto ecotoxicológico en la región minera de Taxco, Guerrero.

### 4.1.1 Análisis Geo-estadístico Elementos traza en Suelos y Sedimentos.

Para visualizar la distribución espacial de los metales pesados seleccionados en los suelos, se utilizó el SIG para realizar el análisis de interpolación Kriging ordinario para predecir las concentraciones de metales pesados en los lugares no muestreados. Y el análisis de errores se llevó a cabo para evaluar la aplicabilidad del análisis de interpolación. Los errores se presentaron en la Tabla 27.

Luego de realizar los análisis de imparcialidad y de cercanía de los valores predichos a los valores reales mediante la evaluación de los valores del Mean Standardized y del Root-Mean-Square Standardized, se presentan los modelos de mejor ajuste para cada uno de los elementos Normados en la NOM-147 y los elementos considerados como tóxicos no presentes en la norma con sus respectivos valores de Mean Standardized y del Root-Mean-Square Standardized. Encontrando que los valores de error para el **Mean Standardized** en un rango desde -0.1428 hasta 0.0728 siendo el Modelo más común el Esférico con 11 elementos. Para **Root-Mean-Square Standardized** se encontró un rango de valores de 0.7425 a 1.5985 siendo el modelo más común el Exponencial con 14 elementos

*Tabla 28.* Modelos definidos para los procedimientos geo-estadísticos y sus valores de Mean standardized y Root-mean-square-standardized

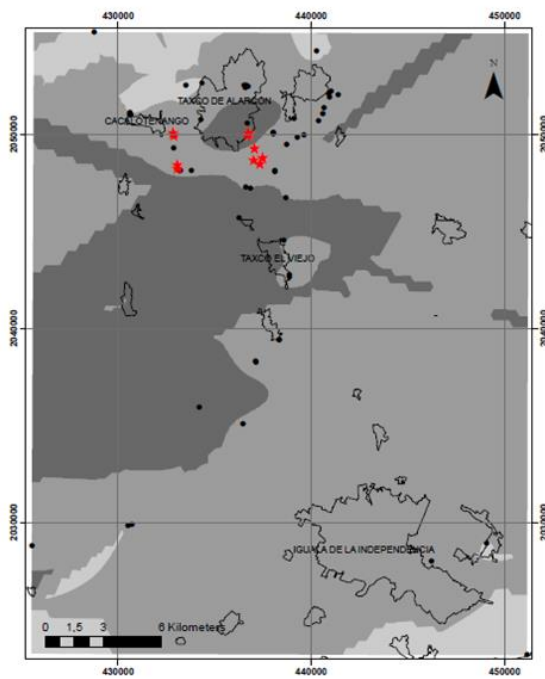
Elementos	Modelo	Mean Standardized	Modelo	Root-Mean-Square Standardized
As	Esférico	0.0053	Exponencial	1.1336
Ba	Exponencial	-0.1428	Gaussiano	1.2561
Be	Esférico	0.0009	Exponencial	1.2212
Cd	Esférico	0.0039	Exponencial	1.168
Cr	Esférico	0.0019	Circular	0.8453
Hg	Esférico	0.0071	Exponencial	1.4268
Ni	Circular	0.0016	Esférico	0.7425



<b>Ag</b>	Esférico	0.0311	Exponencial	1.0671
<b>Pb</b>	Esférico	0.0311	Exponencial	1.0671
<b>Se</b>	Esférico	0.0039	Exponencial	1.168
<b>Tl</b>	Esférico	0.0028	Exponencial	0.9896
<b>V</b>	Esférico	0.0028	Exponencial	0.9896
<b>Cu</b>	Gaussiano	0.0016	Circular	0.9651
<b>Co</b>	Gaussiano	0.0673	Exponencial	1.0706
<b>Zn</b>	Circular	0.0728	Circular	1.0856
<b>Rb</b>	Circular	-0.0024	Gaussiano	1.1419
<b>Mo</b>	Gaussiano	-0.1018	Exponencial	1.5985
<b>Sn</b>	Esférico	-0.0005	Exponencial	0.9245
<b>Sb</b>	Gaussiano	-0.0058	Esférico	1.1228
<b>Au</b>	Exponencial	-0.0126	Exponencial	0.9697
<b>U</b>	Circular	0.0071	Exponencial	0.9595
<b>Máximo</b>		0.0728	<b>Máximo</b>	1.5985
<b>Mínimo</b>		-0.1428	<b>Mínimo</b>	0.7425
<b>Promedio</b>		-0.0012	<b>Promedio</b>	1.0911

Con los análisis anteriormente realizados respecto a las categorías de valores de los elementos normados por la NOM-147 y con la definición de los modelos geo-estadísticos de menor error, se crearon los mapas de distribución de concentraciones con respecto a la norma Nom-147 de As y Pb (los dos metales que superan los valores máximos de la norma), así como su Igeo y FE.

Las distribuciones espaciales de Pb y As tienen la misma tendencia de aumento de la concentración hacia los lugares donde se encuentran las fuentes puntuales potenciales de contaminación que representa los jales. Estas tendencias espaciales sugieren el papel de las actividades mineras y sus desechos como las principales fuentes de metales en los suelos



### Distribución As VS NOM 147

IMPACTO ECOTOXICOLÓGICO DE LA  
DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS MAYORES  
Y TRAZA EN SUELO, SEDIMENTO Y MATERIAL  
VEGETAL EN TAXCO, MÉXICO

#### Leyenda

- Puntos de muestreo de suelos y sedimentos.
  - ★ Jales
  - Localidades
- Clases**
- 6,5 - 22 mg/kg
  - 22 - 260 mg/kg
  - 260 - 5500 mg/kg

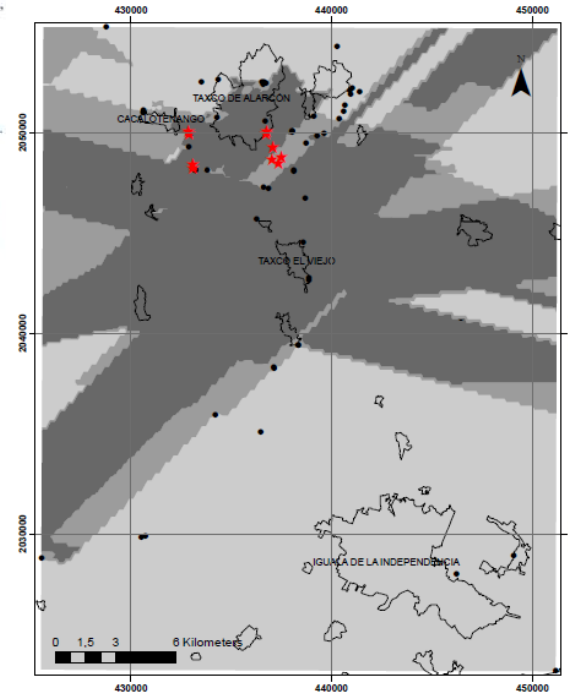
Fuente de información: Cartas E14A67, E14A68, E14A77 y E14A78, INEGI.

Proyección: WGS 1984

Escala de trabajo: 1:50.000.

Realizado por: Andrés Felipe Zúñiga Cabezas.

Fecha de elaboración: 30 de Abril de 2021.



### Distribución Pb VS NOM 147

IMPACTO ECOTOXICOLÓGICO DE LA  
DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS MAYORES  
Y TRAZA EN SUELO, SEDIMENTO Y MATERIAL  
VEGETAL EN TAXCO, MÉXICO

#### Leyenda

- Puntos de muestreo de suelos y sedimentos.
  - ★ Jales
  - Localidades
- Clases**
- 7,9 - 400 mg/kg
  - 400 - 800 mg/kg
  - 800 - 5000 mg/kg

Fuente de información: Cartas E14A67, E14A68, E14A77 y E14A78, INEGI.

Proyección: WGS 1984

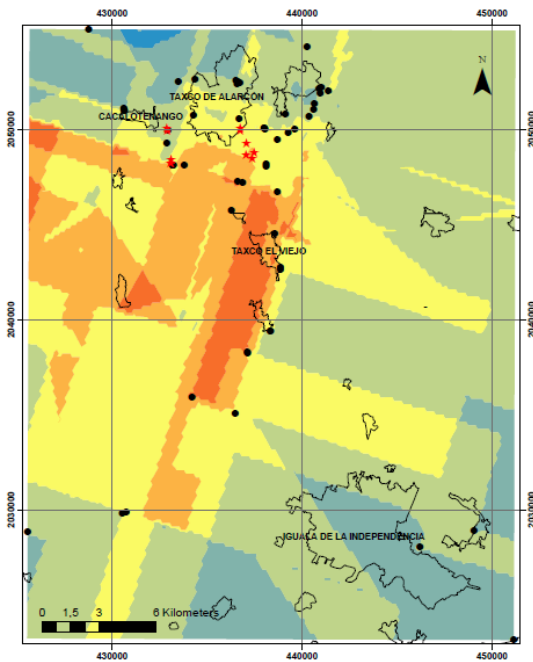
Escala de trabajo: 1:50.000.

Realizado por: Andrés Felipe Zúñiga Cabezas.

Fecha de elaboración: 30 de Abril de 2021.



Figura 35. Mapas de distribución de concentración de As y Pb respecto a la clasificación de la NOM-147



### Índice de Geo-acumulación

As

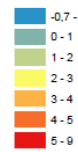
IMPACTO ECOTOXICOLÓGICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS MAYORES Y TRAZA EN SUELO, SEDIMENTO Y MATERIAL VEGETAL EN TAXCO, MÉXICO

#### Leyenda

● Puntos de muestreo de suelos y sedimentos.

★ Jales

#### Clases



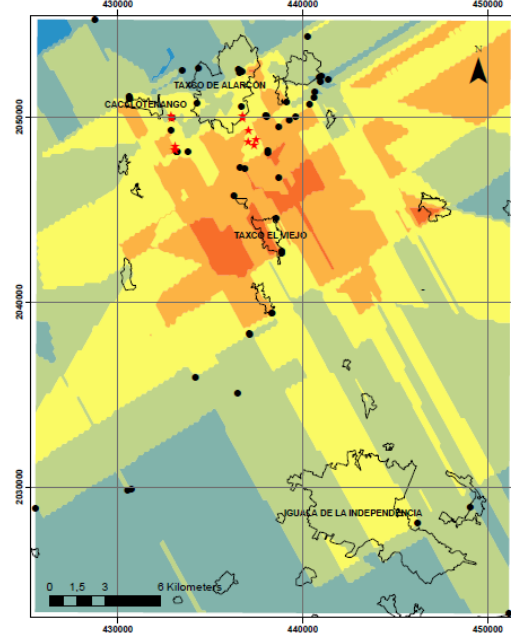
Fuente de información: Cartas E14A67, E14A68, E14A77 y E14A78, INEGI.

Proyección: WGS 1984

Escala de trabajo: 1:50.000.

Realizado por: Andrés Felipe Zúñiga Cabezas.

Fecha de elaboración: 30 de Abril de 2021.



### Índice de Geo-acumulación

Pb

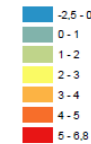
IMPACTO ECOTOXICOLÓGICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS MAYORES Y TRAZA EN SUELO, SEDIMENTO Y MATERIAL VEGETAL EN TAXCO, MÉXICO

#### Leyenda

● Puntos de muestreo de suelos y sedimentos.

★ Jales

#### Clases



Fuente de información: Cartas E14A67, E14A68, E14A77 y E14A78, INEGI.

Proyección: WGS 1984

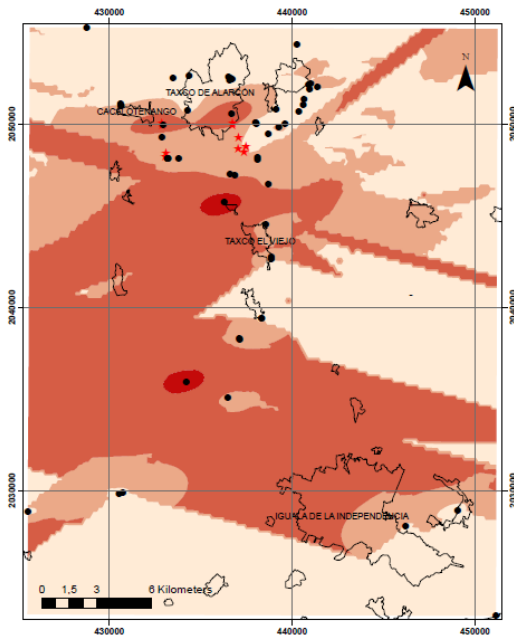
Escala de trabajo: 1:50.000.

Realizado por: Andrés Felipe Zúñiga Cabezas.

Fecha de elaboración: 30 de Abril de 2021.



Figura 36. Mapas de distribución de Índice de Geo-acumulación de As y Pb



### Factor de Enriquecimiento As

IMPACTO ECOTOXICOLÓGICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS MAYORES Y TRAZA EN SUELO, SEDIMENTO Y MATERIAL VEGETAL EN TAXCO, MÉXICO

#### Leyenda

● Puntos de muestreo de suelos y sedimentos.

★ Jales

#### Clases



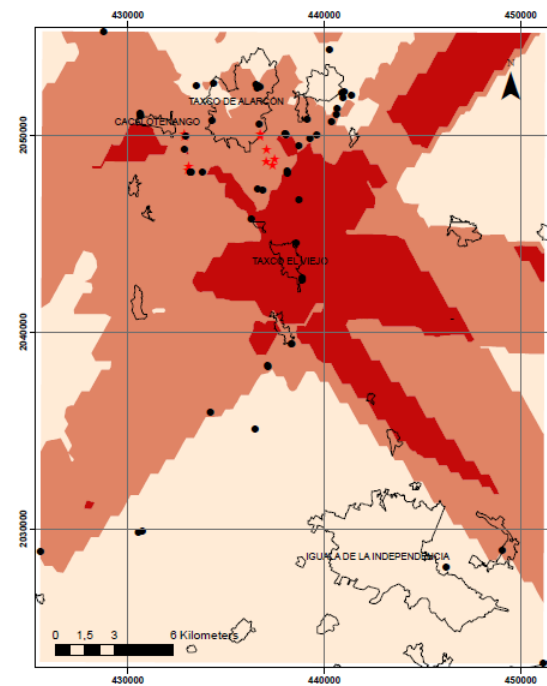
Fuente de información: Cartas E14A67, E14A68, E14A77 y E14A78, INEGI.

Proyección: WGS 1984

Escala de trabajo: 1:50.000.

Realizado por: Andrés Felipe Zúñiga Cabezas.

Fecha de elaboración: 30 de Abril de 2021.



### Factor de Enriquecimiento Pb

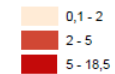
IMPACTO ECOTOXICOLÓGICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS MAYORES Y TRAZA EN SUELO, SEDIMENTO Y MATERIAL VEGETAL EN TAXCO, MÉXICO

#### Leyenda

● Puntos de muestreo de suelos y sedimentos.

★ Jales

#### Clases



Fuente de información: Cartas E14A67, E14A68, E14A77 y E14A78, INEGI.

Proyección: WGS 1984

Escala de trabajo: 1:50.000.

Realizado por: Andrés Felipe Zúñiga Cabezas.

Fecha de elaboración: 30 de Abril de 2021.



Figura 37. Mapas de distribución de Factor de enriquecimiento de As y Pb.



# Capítulo

# 4





## Capítulo 4. Análisis de resultados

### 1.1 Concentración de elementos potencialmente tóxicos

Luego de la revisión bibliográfica realizada se encontraron diferentes concentraciones para la zona minera de Taxco presentadas en la Tabla 30, con un especial énfasis en las concentraciones de los jales presentes en la zona destacando (el Fraile, la Concha y Guerrero). Cabe destacar, que hay muy pocas referencias relacionadas con la evaluación de la concentración de metales relacionados con la actividad minera que pongan evidencia sobre los problemas de contaminación en zonas ubicadas a una distancia media a los jales y prácticamente no hay investigación que analice la potencial difusión de contaminantes para sitios alejados de proyectos mineros, y de los jales activos y abandonados. En este sentido, esta investigación busca complementar el estado del arte actual realizando un análisis más comprensivo de la presencia de estos contaminantes en la Región Minera de Taxco.

La mineralogía primaria presentada en la tabla 29 reconocida en los jales es típica de los depósitos epitermales de Pb-Zn-Ag Cu, con pirita como fase de sulfuro dominante, acompañada de esfalerita, galena, calcopirita, pirrotina, sulfosales de Ag, arsenopirita y óxidos de Fe cristalinos.(Talavera Mendoza et al., 2005)

Aunque en este estudio no se ha realizado una cuantificación de los sulfuros (en particular de la pirita) como fuente de ácido y de los carbonatos (en particular de la calcita) como fases de neutralización, las observaciones de campo junto con las observaciones de otros estudios en la zona indican que la oxidación de las fases de sulfuro es fuerte y se ha producido en todas partes en los jales.

Todos los depósitos de jales de Taxco se caracterizan por presentar altas concentraciones totales de Ag, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, V, Zn y As por encima de los niveles regionales de fondo de los suelos, aunque los contenidos totales son variables incluso dentro de una mismo jale, lo que indica que los jales y los residuos rocosos son un medio muy heterogéneo. También los contenidos de metales solubles en agua indican que los jales son muy heterogéneos y liberan cantidades importantes de metales tóxicos.(Talavera Mendoza et al., 2005)

La oxidación de los sulfuros residuales, principalmente la pirita, libera Fe, y otros metales y metaloides de los jales como As, Pb, Cd, Cu, Zn y V. Además, en Taxco, la interacción de los jales oxidados con el agua meteórica produce AMD y lixiviados ricos en metales, que drenan a los ríos Cacalotenango y Taxco. (Talavera Mendoza et al., 2005)

La dispersión aérea de las partículas ha trasladado los contaminantes a los suelos urbanos y a los cultivos, incrementando sus contenidos de metales muy por encima de los niveles de fondo y existen evidencias de afectación de los jales en plantas autóctonas y de cultivo.

El Pb, el Cd y el As, considerados de alta preocupación ambiental y toxicológica, se encuentran entre los metales con índices de contaminación más elevados y representan una importante fuente de contaminación por metales para el medio ambiente y constituyen un riesgo para los recursos cercanos. Lo que, sugiere un mayor peligro para el medio abiótico circundante, si se toma en cuenta que los jales están oxidados y sujetos a erosión hídrica y

**Tabla 29.** Propiedades y mineralogía principal (primaria y secundaria) registradas en los jales de Taxco, Guerrero.

Mineralogía	El Fraile	La Concha	El Solar	Guerrero I	Guerrero II
<b>Primarios</b>					
Cuarzo	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx
Feldespato	xxxx	xxxx	xxxx	xxx	xxx
Calcita	x	xx	x	xxx	x
Dolomita		x			
Barita	x	x	x	xx	
Pirita	xx	xxx	xx	xxxx	xx
Pirrotita	x				
Galena	x	x		xxx	
Calcopirita	xx	xx	xx	xxx	x
Esfalerita	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Magnetita	x	x	x	x	x
Sulfosales de plata		x			
Arsenopirita		x			
<b>Secundarios</b>					
Saponita	xx				
Montmorillonita	xx				

Calcosina	x	x	x	x	
Yeso	xxxx	xxx	xxx	xxx	xxxx
Hexaedrito	xx				
Basanita	xx				
Epsomita	xxx				xx
Bernalito	xxx				
Hemetita	xxx				
Smithsonita	x	xxx			
Keoheite	xx	xx		x	
Nimite				x	
Hetaerolita				x	
Jarosita	xxxx	xxxx	xxxx		xxxx
Boyleite					x
Starkeyite					x
Escorodita		x			
Pickeringita	x			xx	
Rozenita	xx		x	xx	
X Escasa; XX Ligeramente abundante; XXX Moderadamente abundante; XXXX Muy abundante					

**Fuente:** (Talavera Mendoza et al., 2005)

eólica, debido a que fueron depositados sin considerar controles ambientales para evitar su dispersión al entorno. Esto aunado a su presencia de manera natural en los diferentes yacimientos presentes en la región minera de Taxco, y la acumulación histórica de la actividad minera realizada desde la época de la colonia, la cual se ha acumulado a lo largo del tiempo.

Esto es de suma importancia en los sitios de El Fraile y La Concha, donde los relaves se encuentran dentro de las comunidades y la gente está en permanente interacción con ellos. Algunos habitantes de los alrededores de estos relaves utilizan los lixiviados para uso doméstico o para el riego de cultivos, según lo reportado por (Talavera Mendoza et al., 2005) y lo visto en el trabajo de campo.

El análisis de las concentraciones totales de EPT reportadas por los autores citados en la tabla 30, dejan claro que los jales son bastante heterogéneos entre sí, variando también contra las concentraciones totales resultantes de EPT determinadas incluso en puntos de muestreo similares.

Los jales de Taxco fueron generados a partir de la extracción y beneficio de metales bases y particularmente plata. Los yacimientos de donde se extrajeron los metales son formados por



mineralizaciones polimetálicas en profundidad con predominio de Zn y Pb. (Corrales-Pérez & Romero, 2013)

También se encontró en un estudio realizado por (Armienta et al., 2004), que las concentraciones de Zn, Pb y Fe en las muestras de sedimentos del río Taxco alcanzaron niveles elevados en la zona estudiada. Estas tendencias de concentración muestran la entrada de contaminantes por la acción de la lluvia. Los contenidos de Fe, Pb y Zn son hasta 5, 100 y 390 veces superiores a las concentraciones de fondo del suelo en la zona. Este comportamiento indica que los relaves están siendo arrastrados por la acción de la lluvia hacia el lecho del río. Así como (Espinosa & Armienta, 2007) encontró que el Zn y el Pb en los sedimentos del río Xochula proceden principalmente de los relaves de la mina al río durante la temporada de lluvias. Este proceso aumentó la concentración de metales a pesar de una menor proporción de limos y arcillas con respecto a la estación seca, indicando que los sedimentos de los ríos están fuertemente contaminados en Zn y Pb.

Finalmente, la afectación en humanos ha sido demostrada por (Moreno et al., 2010), quienes encontraron que los niños que vivían cerca de los relaves en Taxco estaban expuestos a varios metales y que un alto porcentaje de ellos tenía niveles de Ni, Ba, Cr, Co, Cd, As, Hg y Pb en orina y sangre por encima de los valores de referencia, explicando estos altos niveles por los metales presentes en los jales de Región Minera Taxco, ya que se han reportado niveles elevados de metales como Mn, Pb, Cd, Cu, As, Zn y Fe en esta zona.

El impacto de los jales en los recursos naturales y la biota cercanos ha sido evaluado en la zona; pero el conocimiento sobre cómo los minerales de sulfuro y qué procesos fisicoquímicos están involucrados en la transformación de los metales en una forma química más disponible, es todavía limitado.

### *Arsénico*

El arsénico se presenta como uno de los metales más evaluados en los estudios realizados en la zona debido a su comprobada presencia y alto potencial tóxico. En la tabla 30 se observa que para los valores de concentración de As encontrados de manera general estos se encuentran en rangos similares a los encontrados dentro de la bibliografía, siendo los únicos



valores por fuera del rango establecido para todos los puntos en el área de estudio (6.5-5500 mg/kg), el valor máximo registrado por (Talavera Mendoza et al., 2005) para le jale la concha con un valor de 11800 mg/kg y el valor mínimo encontrado por (F. M. Romero et al., 2011) en los muestreos de roca realizados por el en la zona de estudio.

Respecto a los estudios realizados en otros lugares a nivel mundial solo uno de los valores registrados es superior a los encontrados en la zona de Taxco siendo este el valor de 6183 mg/kg encontrado por (Arslan & Çelik, 2015) en una zona minera de extracción de plata en las cercanía de las presas de jales presentes en esa zona.

La aparición de pirita sugiere que su oxidación y posterior disolución es la principal fuente de As en los lixiviados de los jales oxidados.

### *Cadmio*

En la tabla 30 se observa que, para los valores de concentración de Cd la totalidad de los valores encontrados dentro de la zona de estudio se encuentra en un rango similar a lo encontrado en la bibliografía para la zona de Taxco, teniendo un valor mínimo encontrado por (Talavera Mendoza et al., 2005) de nuevo en las muestras de roca inferior al 1.0 mg/kg, bastante similar al 0.24 mg/kg encontrado en el presente estudio en el punto 53 y un valor máximo de 780 mg/kg de nuevo encontrado por (Talavera Mendoza et al., 2005) en el jale la Concha similar al valor máximo de 781 mg/kg encontrado en el punto 38.

Sin embargo, al comparar los resultados de concentración con los resultados encontrados a nivel mundial para otras zonas mineras encontramos valores mucho menores a los encontrados en la zona de Taxco, presentado como valor máximo el valor promedio encontrado por (Cheng et al., 2018) para la mina de Zn-Pb de Jinding (el mayor yacimiento de Zn-Pb de China), con un valor de 452 mg/kg, el cual fue suficiente para sobrepasar las normas locales, incluso para una zona naturalmente rica en Tl, Cd, Ag.

**Tabla 30.** Concentraciones de EPT reportadas para la zona minera de Taxco, Guerrero.

Punto de Muestreo		Elemento									Fuente
		As	Ag	Cd	Cu	Fe	Pb	V	Zn	Ni	
		mg/kg				%	mg/kg				
Jales	Prom.	1868			29	12949	1006		358		(Armienta et al., 2004)
	Max	3525			36	18400	2750		688		
	Min	780			17	7250	375		154		
El fraile	Prom.	1324	30.5	39.5	225	5.5	3677	16.3	3118		(Talavera Mendoza et al., 2005)
	Max	2970	44.7	181	420	8.4	6620	49	>10000		
	Min	420	18.9	2	107	3.4	1070	<2	380		
La Concha	Prom.	3035	50.1	432	763	10.3	21700	4.5	8178		
	Max	11800	66.3	780	1320	12.3	43700	13	10000		
	Min	1140	34.1	8	71.8	6	10100	2	780		
El Solar	Prom.	1369	34.8	56.6	200	8.6	1850	22	4830		
	Max	2360	63.5	171	460	16.1	5850	51	>10000		
	Min	440	18	8	118	4.3	840	5	1200		
Guerrero 1	Prom.	494	27.5	9	316	10.6	6258	23	5292		
	Max	700	52.1	22	440	6.41	>10000	34	8290		
	Min	220	9.5	1	76.8	19.4	3150	7	2380		
Guerrero 2	Prom.	1882	40.7	20.2	113	8.5	1413	6.3	2198		
	Max	3800	55.4	78	180	10.6	2280	110	7830		
	Min	800	29.8	1	72.3	7	780	2	600		
Jales	Mediana	585			72	9.4	1479		460		(Francisco Martín Romero et al., 2008)
	Max	800			122	14	4932		58		
	Min	190			25	3	378		2949		
Jales	Prom.										(Francisco Martín Romero & Ruíz, 2010)
	Max	3627	48.4	338	0.031	35,71	1931	40	3,109	29	
	Min	140	4.8	0.5	0.002	6727	148	10	0,125	10	
Roca	Prom.	8		<1.0	35	2.89	29		72		(F. M. Romero et al., 2011)
	Max	12		<1.0	42	2.29	47		89		
	Min	2		<1.0	20	3.61	20		46		
Jale	Prom.	2383		49	162	814	3695		814		
	Max	2950		61	209	10.65	4230		946		

	<b>Min</b>	1560		31	138	8.66	3080		620		
						<b>%</b>					
<b>Suelos</b>	<b>Prom.</b>	1070.3		4.125	170.05	7.475	1864.5		4602.7		(Huerta & Hernández, 2012)
	<b>Max</b>	3744.3		152.2	418.3	17.4	6166		16193		
	<b>Min</b>	28.9		3	56.2	3.4	66.5		175.2		
<b>Fraile N</b>	<b>Med</b>	2027	49	13	126	10.5	3622		964	111	(Corrales-Pérez & Romero, 2013)
	<b>Max</b>	2746	70	50	204	15.9	5248		5,559	133	
	<b>Min</b>	1262	41	16	97	7	3049		664	114	
<b>Fraile S</b>	<b>Med</b>	1738	48		159	9.4	4582		674		
	<b>Max</b>	2000	58		200	11.1	5144		761		
	<b>Min</b>	1176	41		144	9	4456		474		
<b>Rocas</b>	<b>Promedio</b>				13.87	2.42	17.75		63.21		(Dótor-Almazán et al., 2017)
	<b>Max</b>				43.8	4.56	35.4		129		
	<b>Min</b>				2.33	0.07	6.83		9.98		
<b>Jales</b>	<b>Prom.</b>				380	17.6	11004		6343		
	<b>Max</b>				1319	28.5	27239		39145		
	<b>Min</b>				76	11.6	926		440		
<b>Suelos</b>	<b>Prom.</b>				38	3.7	156		377		
	<b>Max</b>				73	5	457		1204		
	<b>Min</b>				5	2.72	25		80		
<b>Humedal</b>	<b>Prom.</b>			5	5	565	224		606		(Gómez-Bernal, Ruiz-Huerta, Armienta-Hernández, & Luna-Pabello, 2017)
	<b>Max</b>			9	11	1200	526		983		
	<b>Min</b>			2	1	194	27		267		
<b>Jales</b>	<b>Prom.</b>	2455	40	33	136		4112		2438		(Corrales-Pérez & Martín-Romero, 2018)
	<b>Max</b>	3412	55.7	49.7	204.5		4930.1		5558.7		
	<b>Min</b>	1719	27.8	15.6	89.7		3084.9		449		

## Zinc

Para el Zn se encontraron valores muy superiores de concentración dentro de la revisión bibliográfica, el máximo encontrado en este estudio (5000 mg/kg) en los puntos 12, 19, 38 y



43. (Talavera Mendoza et al., 2005) encontró valores de 10000 mg/kg para muestras en los jales El fraile, la Concha y el Solar y 8290 y 7830 mg/kg en los jales guerrero 1 y 2. También para el jale el Fraile se encontraron valores de 16193 mg/kg, 5559 mg/kg, 5558.7 mg/kg y 39145 mg/kg por (Huerta & Hernández, 2012), (Corrales-Pérez & Romero, 2013), (Corrales-Pérez & Martín-Romero, 2018) y (Dótor-Almazán et al., 2017) respectivamente.

Para los valores a nivel mundial para la zona de Yunnan en China como zona de explotación de Zn y Pb se reportaron valores de 36350 mg/kg los cuales, incluso al ser comparados con otros estudios de zonas también afectadas por la minería de Zn y Pb, resultan relativamente altos lo que podría explicar por qué superan con tanta magnitud a la concentración máxima de este estudio para la zona de Taxco. (5000 mg/kg.)

El zinc se libera en los lixiviados por oxidación y disolución de la esfalerita que también puede contener trazas de Cd. La presencia simultánea de Cd y Zn sugiere que la oxidación y posterior disolución de la esfalerita es la principal fuente de Cd en los lixiviados de jales oxidados. No obstante, parte del Zn puede provenir del uso de sulfatos de Zn en el proceso de extracción, atribuido a la disolución de sulfatos de Zn solubles del proceso de flotación.

El Zn y el Cd liberados de la presa de jales oxidados cerca de la superficie, han migrado parcialmente hacia abajo a través de los depósitos de residuos y se han absorbido en las superficies de los oxihidróxidos de Fe.

### ***Plomo***

Para el Pb a diferencia de los elementos anteriormente evaluados pero al igual que al Zn encontramos valores bastante superiores en la revisión bibliográfica al máximo encontrado dentro del área de estudio de 5000 mg/kg en el punto 12 (cercano a los jales el Solar) y el punto 38, siendo la mayoría de los valores encontrados pertenecientes a puntos de muestreo en jales como los encontrados por (Talavera Mendoza et al., 2005) de 6620 mg/kg en el jale el fraile, 43700 mg/kg en el jale la concha, 5850 mg/kg en el jale el solar, 10000 mg/kg en el jale guerrero I. 5248 y 5144 mg/kg encontrados por (Corrales-Pérez & Romero, 2013) para los jales el fraile Norte y sur respectivamente y 6166 mg/kg encontrado para suelos muy cercanos al jale encontrado por (Huerta & Hernández, 2012).





Al tomar en cuenta los estudios de las otras zonas a nivel mundial para zonas mineras la concentración de Pb de 30635 mg/kg reportada para las zonas mineras de Vietnam es mayor a las encontradas en la zona de Taxco. Esto se debe a que las operaciones mineras a largo plazo en Vietnam han generado cantidades considerables de contaminación por metales pesados (Z. Li, Ma, van der Kuijp, Yuan, & Huang, 2014). También las concentraciones de Pb en el estudio de (Francisco Martín Romero & Ruíz, 2010) resultan superiores (10900 mg/kg), aunque se reporta que este valor es congruentes con la composición mineralógica reportada en los yacimientos minerales de los que provienen.

**Tabla 31.** Concentraciones de EPT reportadas para otras zonas de México y el mundo.

Lugar	Valor	Elemento																		Fuente
		As	Ag	Co	Cd	Cr	Hg	Cu	Fe %	Mn	Pb	V	Zn	Ba	Ni	Al %	Tl	Mo	Sb	
		mg/kg																		
China	Prom	11.63			0.24	72.0	0.1	53.4		307.2	47		87.9				5429.9			(Wu, Teng, Lu, Wang, & Jiao, 2014)
China	Prom	275			452	27.9	0.15	34.9			3800		36350		12.88					(Cheng et al., 2018)
China	Prom	195.5			11	84.2	3.82	211.9			641.3		1163		106.6					(Z. Li et al., 2014)
Irán	Prom	146.2			1.49		3.13	88.4			1002		363.4							
España	Prom	191.9			6.59	63.2	52.9	120.8			881.8		465.8		28.35					
Corea del Sur	Prom	70.08			1.99		1.12	79.09			111.1		183.2		22					
Vietnam	Prom	3144			135	1501		271.4			30635		41094		2254					
India	Prom	18.62			3.8	1509		63.49			304.7		338.8		1069					
Chile	Prom	13		15	0.9	25	1.6	477		1127	17	61	73		23			2.8	2.8	(Reyes et al., 2021)
	Prom	411		17	1.6	17	5.4	175		1050	39	112	108		15			2.2	12	
	Prom	92		30	1.4	20	0.98	1940		917	293	139	216		40			12	9.4	
Eslovaquia	Prom	52.1		21.5	4.12	81.8	13.3	556.7			207.9		628.3		97.4					(Demková, Jezný, & Bobulská, 2017)
	Prom	48.4		17.1	1.57	36.98	11.5	303.2			96.7		482.4		31.77					
Turquía	Prom	1193.17	12.1	18.5	19.21	66.33		44.25	2.63	1640.7	844.25		1536.3		116	2.19	23.8		66.3	(Arslan & Çelik, 2015)
	Max	6183	41.4	23	89.2	116		119	3.11	3414	4183		9949		250	3.47	62		407	
	Min	11	0.4	10	0.7	28		25	2.18	687	20		49		56	1.47	8		1	
Marruecos	Prom	21.8			0.4			26.2			1935.7		47							(El Azhari, Rhoujjati, El Hachimi, & Ambrosi, 2017)
	Prom	6.7			0.3			29			94.4		73.5							
Irán	Prom	26	10.6	11.9	15.4	71.9		42.3	2.45	677.9	4950.2		2076.7		63.7			4.1	1.6	(Moore, Sheykhi, Salari, & Bagheri, 2016)
México	Prom	150.6		20.71		164.9			5.09	1264		184.5		572.7	51.3	6.17				



	<b>Prom</b>	<b>511.5</b>		<b>19.35</b>		<b>148.3</b>			<b>7.527</b>	<b>4378</b>		<b>1322.8</b>		<b>173</b>	<b>0</b>	<b>3.981</b>				(Mireles et al., 2012)
<b>México</b>	<b>Min</b>	<b>160</b>	<b>&lt;4</b>		<b>25</b>	<b>&lt;5</b>	<b>&lt;5</b>	<b>200</b>	<b>2.36</b>		<b>300</b>		<b>210</b>	<b>7.7</b>	<b>&lt;4.2</b>		<b>7.2</b>			(Francisco Martín Romero & Ruíz, 2010)
	<b>Max</b>	<b>643</b>	<b>109</b>		<b>434</b>	<b>16</b>	<b>&lt;5</b>	<b>15530</b>	<b>5.16</b>		<b>10900</b>		<b>38600</b>	<b>29</b>	<b>8.8</b>		<b>30</b>			



## Cobre

Para los resultados de la concentración de Cu y su comparación con los datos de la bibliografía se encontró que el rango de los datos obtenidos es bastante similar a los encontrados en otros estudios, aunque vale la pena resaltar el punto 12 (cercano al jale el Solar) que presenta una concentración de 2600 mg/kg lo que representa casi el doble del valor máximo encontrado en la revisión bibliográfica, en donde se encontró que el máximo valor es de 1320 mg/kg para un punto de muestreo dentro del jale la concha (Talavera Mendoza et al., 2005). Al igual que para el plomo las concentraciones en el estudio de (Francisco Martín Romero & Ruíz, 2010) resultan superiores (15530 mg/kg), aunque se reporta que este valor es congruente con la composición mineralógica reportada en los yacimientos minerales de los que provienen. La oxidación y disolución de la calcopirita es la principal fuente de concentración de Cu disuelto. Sin embargo, pequeñas cantidades de Cu también serían aportadas por el lodo inicial, debido al uso de sulfato de Cu en el proceso de extracción de plata.

### 2.1 Análisis estadístico

#### 2.1.1 Coeficiente de correlación

*Para los elementos en la NOM-147 se encontró  $As-Fe$  (0.83) >  $Pb-Fe$  (0.82) >  $Ag-Fe$  (0.77) >  $Cd-Fe$  (0.71).* Los altos coeficientes de correlación entre los metales pesados indican el origen similar de estos de una misma fuente de contaminación mientras que los coeficientes de correlación muy bajos o negativos podrían reflejar fuentes diferentes, y probablemente relación con procesos naturales o geogénicos. La alta correlación entre los metales pesados podría indicar que los metales provienen de una fuente de contaminación común y podrían caracterizarse con una migración y transformación similares a través de las condiciones físico-químicas en el medio ambiente, al igual que refleja significativamente el efecto antropogénico de las actividades mineras. (Weissmannová et al., 2019)



## *Análisis de Factores*

Se aplicaron análisis de factores para la valoración y evaluación de la identificación del origen de los metales en los suelos. Se extrajeron los tres factores principales con valores propios superiores a 0.7. Los resultados obtenidos del análisis de factores para los metales en los suelos mostraron que componente principal (F1) describió el 25,1% de la varianza total con altas cargas positivas para Fe (0.91), Pb (0.86), As (0.77), Cu (0.85), Cd (0.74) y Ag (0.80) entre otros.

En este sentido y de acuerdo al análisis SEM-EDS realizado por (F. M. Romero et al., 2011) se encontraron pequeñas ( $\leq 10$  nm) partículas densas dispersas por los residuos mineros para la zona minera de Taxco que contienen elementos ligados a sulfuros, de los cuales se identificaron tres tipos distintos de partículas que contienen estos elementos: (a) Fe-S-As, (b) Fe-S-Pb-Cu, y (c) Fe-S-Pb-Cu-As. Los cuales se podrían relacionar directamente con el Factor 1, lo que, a su vez, confirmaría a los jales como la fuente de los elementos potencialmente tóxicos para la zona minera de Taxco. Las partículas (a) y (b) pueden estar asociadas a los minerales secundarios de Fe y a trazas de As, Pb y Cu, mientras que las partículas (c) pueden corresponder a la beundantita, que ha sido identificada previamente en estos estériles estudiados

### **3.1 Índices de contaminación**

#### **3.1.1 Material Vegetal.**

La bibliografía consultada presenta que los valores más altos de TF corresponden a las especies acumuladoras y los valores más bajos a las especies que excluyen los metales pesados. Estos valores superiores a 1 indican una capacidad de transporte de metales pesados desde la raíz a la hoja y probablemente al secuestro de metales en las vacuolas de la hoja y el apoplasto. También es importante mencionar que muchos factores pueden influir en los valores de TF en las plantas, como la especie vegetal, los factores fisiológicos y las



características de los metales.(Gómez-Bernal, Ruiz-Huerta, Armienta-Hernández, & Luna-Pabello, 2017)

En estudio realizado por (Gómez-Bernal et al., 2017), se calcularon valores elevados del factor de translocación en *E. ovata* para el Cd (1,97), el Cu (1,10), el Fe (1,79), el Mn (2,01), el Pb (1,52), el Cu (1,02) y el Zn (3,49). También observaron la disminución de metales pesados en suelos, agua y especies vegetales desde los puntos de muestreo más cercanos a los jales a los más lejanos, estando los valores para el punto más cercano a los jales superiores a 1 para todos los metales pesados analizados, siendo el más alto el de Mn (2,01) y Zn (3,49), lo que demuestra que las primeras plantas del humedal natural que reciben las aguas residuales de la mina son las que tienen un mayor impacto en la acumulación de metales pesados.

La alta densidad de población de *E. ovata* también puede ser un factor de la concentración de metales pesados en los puntos de muestreo 3-5. Las características morfológicas y fisiológicas de *E. ovata* han desarrollado una estrategia única para reducir los daños causados por los metales pesados, y esto puede ser parcialmente responsable de las diferencias de los valores de TF en este estudio. Cabe destacar que *E. ovata* puede ser utilizada como un importante filtro para la eliminación de metales pesados por las siguientes consideraciones (1) no mostraron daños visibles y no hubo diferencias de altura entre las distintas muestras de *E. ovata*; (2) el FT y el Factor de bioacumulacion tuvieron valores superiores a 1; (3) tiene un rápido crecimiento al ser herbácea; (4) amplia distribución geográfica; (5) facilidad de cultivo por semillas o estolones; y 5) facilidad para ser recolectada. Esto se basa en su forma y ciclo de vida, así como en los datos obtenidos durante esta investigación.(Gómez-Bernal et al., 2017)

Para evaluar la habilidad de las plantas para translocar los metales desde la raíz hacia la parte aérea fue calculado el FT para plantas de maíz a los 70 días de desarrollo en suelo colectado en la zona minera de Taxco por (Huerta & Hernández, 2012) se observa que el FT más elevado correspondió al arsénico con valores entre 1.08 y 2.29, en todos los sitios que indican que es un elemento transferible en las plantas de maíz, seguido por Cd de 0.07 y 0.86 y Zn de 0.12 y 0.82. Los demás elementos analizados presentaron FT muy bajos. Sin embargo,



con FT del Cd y Zn muy cercanos a 1 en la zona más cercana a los jales, indicando que estos elementos podrían ser transferibles en el maíz para la zona de estudio.

Por último vale la pena recordar que la bioacumulación y la translocación dependen de la eficiencia de cada especie, indicando que hay especies que toleran las concentraciones elevadas de metales en el suelo al restringir su absorción y translocación hacia las hojas, mientras otras los absorben y acumulan activamente en su biomasa, con una fisiología muy especializada. (Huerta & Hernández, 2012)

### **3.1.2 Suelos y Sedimentos.**

De acuerdo a (Kowalska et al., 2018) los índices de contaminación pueden dividirse en seis grupos basados en los diferentes propósitos de cálculo, es decir, para proporcionar información sobre: (1) los niveles individuales de contaminación de cada uno de los metales pesados analizados (Igeo, Cf); (2) la escala de contaminación total (PLI, mCd, Cdeg); (3) la fuente de metales pesados (EF y MEC); (4) el riesgo ecológico potencial (RI); (5) la zona con mayor riesgo potencial de acumulación de metales pesados de metales pesados; y (6) la capacidad del horizonte de acumular metales pesados. En este estudio se utilizaron índices de las primeras 4 categorías.

#### ***3.1.2.1 Índice de Geo-acumulación***

Para la zona de estudio las concentraciones totales de elementos encontrados en este estudio, los elementos en la máxima clasificación del Igeo (clase 5 o extremadamente contaminado) son los mismos que se encontraron en altas concentraciones; con el Pb en el 10.5% de los puntos de muestreo, el As en el 5.2%, para el Cd 8.7%, el Zn con el 7,01% y el 3.5 % para el Cu, estando la mayoría de estos puntos en la zona norte de la zona de estudio, en donde se encuentran los jales de la zona minera, con lo que resulta lógico relacionar la cercanía a los jales con valores altos de Igeo. Las concentraciones de los metales analizados están asociadas a los principales sulfuros del distrito: esfalerita (ZnS), calcopirita (CuS), pirita (FeS) y galena (PbS) que a su vez están relacionados con la mineralización de la zona.



Po otro lado la presencia de altas concentraciones de estos elementos, así como de altos valores de clasificación del índice de geo acumulación para los elementos de interés en la zona centro aguas abajo de los jales de la zona norte podría explicarse por el transporte de partículas o escorrentía transportada a los ríos con un alta carga de elementos potencialmente tóxicos liberados por los jales.

Sin embargo, dado que el Igeo debe calcularse con respecto a valores de fondo geoquímico adecuados para cada zona de estudio, aunque en este estudio se usó un valor real de una zona prístina presente en la zona al ser esta una zona con una geología variada puede que este punto no represente las características prístinas de la toda la zona de estudio dada la fluctuación natural de los valores del fondo geoquímico

De entre los índices de contaminación individuales, Igeo ha sido de los más utilizados (tabla 31) durante décadas para evaluar el grado de contaminación, caracterizado por una escala muy precisa, además de permitir minimizar el grado de acumulación resultante de las huellas artificiales de la actividad humana (por eso el factor 1,5 en su fórmula), lo que ofrece una ventaja significativa sobre otros índices individuales. Pero presenta debilidades como que omite la capacidad disponible natural de los suelos que evalúa (Kowalska et al., 2018), lo que podría explicar porque para la zona de minera de Taxco, con una larga historia de explotación de Ag presenta para la totalidad de los puntos de muestreo la clase 5 del Igeo.

### ***3.1.2.2 Factor de enriquecimiento***

El factor de enriquecimiento es un índice basado en la diferenciación entre fuentes de contaminación antropogénicas y las fuentes naturales de contaminación para el que su cálculo está relacionado con la estandarización de las medidas de los elementos. Siendo el único de los índices de contaminación que incluye el uso elementos de baja variabilidad para su normalización. Esta medida se utiliza para normalizar la influencia geoquímica y diferenciar entre los metales pesados originados de las actividades humanas y los de fuentes naturales (Kowalska et al., 2018). Esta diferenciación entre los elementos de origen natural y antropogénica podría ser la razón por la cual a diferencia del Igeo, solo algunos de todos los puntos de muestreo se presentan con algún tipo de enriquecimiento para la plata, en el sentido que las altas concentraciones encontradas en la zona puedan ser de origen natural.



También dado que la elección y determinación del elemento que demuestra bajos niveles de variabilidad (Fe, Al, Ca, Mn) para la normalización el Factor de Enriquecimiento debe estar relacionada con el tipo y las propiedades del suelo estudiado, por lo que queda a elección de cada investigador es la principal fuente de incertidumbre en el cálculo de este índice; se redujo esta incertidumbre al utilizar como elemento normalizador el Fe, que en el análisis estadístico presentó la mayor correlación con los elementos de interés.

**Tabla 32.** Usos de diferentes índices de contaminación en otros estudios

Tipo de Suelos	Elementos	Índices						País
		Igeo	EF	CF	PLI	Cdeg	RI	
Urbano	As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn							China
	Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, As, Hg, Cd	+						China
	Cd, Cu, Pb, Zn	+						China
	Zn, Pb, Cu, Mn, Cr, Cd, Ni, Sn, Ag	+	+				+	Polonia
	As, Cd, Cr, Hg, Pb,						+	China
	Pb, Cd, Cu, Zn, Cr	+	+		+		+	Irán
	Cu, Zn, Pb	+	+	+		+		Nueva Zelanda
	Cu, Pb, Zn	+	+	+			+	China
Industrial	Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn	+		+				Nigeria
	Cu, Ni, V, Co, Cd, Zn, Mo, Pb	+						Irán
	Cd, Cu, Pb, Zn	+	+		+			Egipto
	Pb, Cu, Cd, Cr, Zn						+	Nigeria
	Cd, Pb, Cu, Cr, Zn						+	China
	Cu, Cd, Fe, Zn, Pb	+	+					Nigeria
	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Zn	+	+	+				Polonia
	Cr, Cd, Pb, Zn, Cu, Ni	+					+	China
As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg	+					+	China	

	Ni, Cu, Fe, Cr, Cd	+	+	+	+			Nigeria
	Cu, Cr, Ni, Cd, Pb							Malasia
	Fe, Ni, Cd, Cr, Zn, Cu, Pb	+	+	+		+	+	Nigeria
	Cd, Cr, Cu, Zn, Pb, Ni	+	+				+	China
	Pb, Cd, Cr, As, Hg							China
	Co, Cr, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb		+				+	China
	Zn, Pb, Cu, Mn, Cr, Cd, Ni, Sn, Ag	+	+				+	Republica checa/Polonia
<b>Parque</b>	Cd, Pb, Cr, Ni, Cu, Zn, Fe, Mn		+					China
	Cu, Ni, Pb, Zn		+					China
<b>Sedimentos</b>	Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	+	+				+	China
	Fe, Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Cd, V				+	+	+	Iran
	As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn	+	+	+	+			Turquia
	Cd, Pb, Zn, As, Cu, Cr, Hg				+			Portugal

Fuente:(Weissmannová & Pavlovský, 2017)

### 3.1.2.3 Índice de carga Contaminante y Gado de contaminación modificado

El índice de carga contaminante proporciona medios comparativos sencillos para evaluar la calidad de una zona (0 indica perfección, 1 indica que sólo niveles básicos de contaminantes y >1 indica un deterioro progresivo); en este estudio los valores de PLI calculados para todos los metales evaluados y solo para los metales evaluados dentro de la NOM-147 variaron de manera considerable en cuanto, cuando se calculó para todos los metales evaluados para la totalidad de los puntos se encontraron valores que indicarían deterioro progresivo, mientras que cuando se evaluó solo para los elementos normados a pesar de presentar también una mayor proporción de puntos en la categoría de deterioro, se encuentran puntos en la categoría de no contaminado.(Kowalska et al., 2018)



Respecto al mCd, se eligió este a diferencia del Cd normal dado que la gama ampliada de posibles contaminantes puede incluir tanto metales pesados como se necesite sin un límite superior, con una característica intrínseca del cálculo de producir un valor medio global para una serie de contaminantes y que como ocurre con cualquier procedimiento que genere un promedio, hay que tener cuidado al evaluar los resultados finales ya que el efecto de los picos de enriquecimiento metálico para muestras individuales puede quedar oculto en el resultado medio global.(Kowalska et al., 2018) Un ejemplo de esto es la diferencia de los niveles encontrados entre el mCd para todos los metales evaluados y solo para los normados en la NOM-147, en cuanto los niveles de contaminación encontrado solo para los elementos normados son superiores a los encontrados cuando se evalúan todos, por lo que al sumar mayor cantidad de elementos con concentraciones bajas podría ocultar los altos niveles alcanzados por elementos de interés como el As y el Pb.(Kowalska et al., 2018)

#### ***3.1.2.4 Riesgo ecológico Potencial***

El RI es uno de los índices de contaminación más conocidos y su interpretación es esencial para los procesos de toma de decisiones y la gestión, incluyendo protección de los recursos naturales ya que tiene en cuenta los niveles tóxicos, la sensibilidad ecológica y las sinergias entre metales pesados. Este índice requiere un coeficiente de respuesta a la toxicidad, el coeficiente de respuesta a la toxicidad equivale a los diferentes valores de toxicidad de determinados elementos. Por lo que en este estudio solo se calculó para Zn, Cr, Cu, Pb, As, Cd, Hg, Ni., con el 71.4% de los puntos en la clasificación de riesgo altamente fuerte. Resulta importante resaltar que para la zona centro se presenta la totalidad de sus puntos dentro de la máxima clasificación, a pesar de no ser la zona más cercana a los jales, lo que se podría deber a que se registraron algunas concentraciones importantes de mercurio en esta zona que dado su alto nivel de toxicidad son suficiente para aumentar el nivel de riesgo eco-toxicológico para la zona; esta presencia de mercurio en la zona podría explicarse por la presencia de la zona mineralizada de huahuaxtla que está constituida por una mena de mercurio que corresponden a depósitos de tipo epitelmal. En la bibliografía se reportan valores de hasta 100 kg/t de mercurio, y en un estudio realizado por el servicio geológico mexicano se visitaron minas en esta donde las muestras colectadas arrojan valores de hasta 369 g/t de Hg.(Servicio Geológico Mexicano, 2018)



El RI se caracteriza por un alto nivel de precisión debido a su escala. Una pequeña desventaja del RI es el hecho de que el coeficiente de respuesta de toxicidad no se ha determinado para una amplia gama de metales pesados, así como la falta de vínculos claros entre el RI y otros índices.(Kowalska et al., 2018).

### ***3.1.2.5 Riesgo carcinogénico***

La evaluación del riesgo para la salud humana se realizó utilizando el riesgo carcinogénico a lo largo de la vida para adultos y niños de acuerdo a la metodología propuesta por la EPA. en el cual el organismo individual está expuesto a través de tres vías (ingestión oral, inhalación y contacto dérmico).

Se calculó el riesgo cancerígeno de Pb, As, Cd y Cr; encontrando que el rango de valores tolerables ( $1,0 \times 10^{-6}$  a  $1,0 \times 10^{-4}$ ) se obtuvo para Cr para adultos y niños en toda la zona de estudio. Los resultados del estudio también indican que no existe un riesgo cancerígeno significativo de por vida por Pb y solo se encontraron riesgo de desarrollo de cáncer para el Cd para la zona norte cercana a los jales y para As en la zona norte (19%) y central (22.2%).

Aunque la probabilidad de riesgo cancerígeno debido a la exposición a suelos contaminados con metales es menor, la situación puede volverse grave en el futuro, por lo que es necesario prevenir la contaminación por metales en los suelos urbanos de Taxco. Respecto a los elementos con riesgo de desarrollo cancerígeno se tiene:

#### ***Cadmio***

El cadmio es un metal pesado de considerable interés medioambiental y laboral. Está ampliamente distribuido en la corteza terrestre con una concentración media de unos 0,1 mg/kg. El mayor nivel de compuestos de cadmio en el medio ambiente se acumula en las rocas sedimentarias, y los fosfatos marinos contienen unos 15 mg de cadmio/kg.(Tchounwou, Yedjou, Patlolla, & Sutton, 2012)



La exposición humana al cadmio es posible a través de varias fuentes, como el empleo en industrias de metales primarios, el consumo de alimentos contaminados, el consumo de cigarrillos y el trabajo en lugares de trabajo contaminados con cadmio. Otras fuentes de cadmio son las emisiones de actividades industriales, como la minería, la fundición y la fabricación de baterías, pigmentos, estabilizadores y aleaciones. La exposición crónica por inhalación a partículas de cadmio se asocia a cambios en la función pulmonar y a una disminución de la función olfativa. Varios estudios epidemiológicos han documentado una asociación de la exposición crónica a bajos niveles de cadmio con la disminución de la densidad mineral ósea y la osteoporosis.

### ***Arsénico***

Se estima que varios millones de personas están expuestas al arsénico de forma crónica en todo el mundo, especialmente en países como Bangladesh, India, Chile, Uruguay, México y Taiwán, donde el agua subterránea está contaminada con altas concentraciones de arsénico. La exposición al arsénico se produce por vía oral (ingestión), por inhalación, por contacto dérmico y por vía parenteral en cierta medida. La ingesta a través del aire, el agua y el suelo suele ser mucho menor que a través de la dieta, pero la exposición a través de estos medios puede llegar a ser significativa en zonas contaminadas con arsénico. Los trabajadores que producen o utilizan compuestos de arsénico en ocupaciones como el refinado de minerales metálicos, pueden estar expuestos a niveles de arsénico sustancialmente superiores. (Tchounwou et al., 2012)

La contaminación con altos niveles de arsénico es preocupante porque el arsénico puede causar una serie de efectos en la salud humana. La exposición al arsénico afecta prácticamente a todos los sistemas orgánicos, incluidos los sistemas cardiovascular, dermatológico, nervioso, hepatobiliar, renal, gastrointestinal y respiratorio con tasas de mortalidad estandarizadas significativamente más altas para los cánceres de vejiga, riñón, piel e hígado en áreas de contaminación por arsénico. La gravedad de los efectos adversos para la salud está relacionada con la forma química del arsénico, y también depende del tiempo y de la dosis. (Tchounwou et al., 2012)



## 4.1 Guías de calidad del Suelo

Los jales estudiados de la zona de estudio tienen concentraciones elementales elevadas para algunos de los EPT regulados en la NOM-147 (As, Cd y Pb) y de los elementos propios de la mineralogía los jales estudiados (Cu, Fe, Zn). mientras que las concentraciones de otros EPT como Ba, Cr, Hg, Be, Se, Ni y Tl son bajas e inferiores a las concentraciones definidas por la NOM-147 como de riesgo para el ambiente y la salud.

Al comparar las concentraciones encontradas en las muestras de suelo y sedimento para la zona minera de Taxco, solo para los elementos de As y Pb se supera lo estipulado por la NOM-147 de la SEMARANAT, sin embargo, al evaluar estas mismas concentraciones con diferentes normas a nivel mundial para 17 países como Alemania, Canadá, Estados Unidos, Francia entre otros (tabla 31) para los valores máximos permitidos en zonas residenciales queda claro que la zona está altamente contaminada, donde encontramos de nuevo que los metales evaluados que superan las normas establecidas a nivel mundial son el Pb, As y Cd, sin embargo, vale la pena resaltar que elementos no normados por la norma mexicana como el Sb o el Tl presentan valores por encima de los propuestos por países como Francia y Países Bajos como seguros para la salud humana (tabla 32).

Estos valores umbral se consideran a menudo como los criterios para determinar si es necesaria una investigación profunda o una rehabilitación. En la tabla 30 se observa que Noruega establece los valores más bajos, lo que podría explicarse por el hecho de que se incluyen las vías de exposición no sólo del suelo, sino también de las aguas subterráneas, el consumo de peces y crustáceos u otros puntos finales eco-toxicológicos seleccionados. Los valores entre los países muestran diferencias debido a factores políticos, normativos y socioculturales. Las razones históricas (incidentales) parecen haber desempeñado también un papel importante. (CHEN et al., 2018)

Todos los países aplican sus normas para la protección de la salud humana, mientras que algunos países como los Países Bajos, Suecia, Noruega y Canadá, incluyen la protección del ecosistema o incluso incluyen explícitamente la filtración a aguas subterráneas y la transferencia a las masas de agua superficiales como Noruega, Suecia y Canadá.



Por lo general, se utilizan modelos de exposición multi-ruta a escala local para derivar los valores que protegen la salud humana. Los modelos relacionan la concentración única de contaminantes en el suelo y/o en las aguas subterráneas con la exposición humana total para escenarios de exposición dentro de determinados tipos de uso del suelo (es decir, residencial, recreativo o industrial). La elección de los valores de los parámetros, el número de rutas de exposición incluidas, la división temporal y el receptor de riesgo (niño, adulto, subpoblación) son una fuente importante de variación entre países.(Provoost et al., 2006)

Otro factor que contribuye a las diferencias entre los valores es la exposición de fondo o la exposición que no está relacionada con la contaminación del suelo. Países como Gran Bretaña, Canadá, Alemania y Bélgica calculan a partir de la exposición de fondo a través de la dieta y la inhalación. Esto puede dar lugar a un valor muy bajo si la exposición de fondo a través de los alimentos y el aire (mg/kg de peso corporal (pc) por día) es alta en relación con el consumo tolerable diario (mg/kg de pc por día). La exposición de fondo difiere por país y está relacionada con el consumo (cantidad y tipo de productos consumidos) y el nivel de contaminación en los alimentos.(Provoost et al., 2006)

De acuerdo a la NOM-147 los elementos que definen a un modelo conceptual y que deben ser desarrollados para la determinación del grado de contaminación de un sitio son: 1. Caracterización del sitio. 2. Identificación de los contaminantes. 3. Identificación de los mecanismos de liberación y transporte de contaminantes. 4. Identificación de posibles receptores y rutas de exposición. 5. Identificación de vías de exposición. 6. Integración y representación del modelo; los cuales a pesar de dejar claro que para la definición de la norma se tuvieron en cuenta factores como la ruta de exposición (medio contaminado, mecanismos de liberación, mecanismos de transporte y puntos de contacto), vías de exposición (ingestión, inhalación y contacto), carece de consideraciones como los valores de fondo de las zonas evaluadas.

La tabla 33 presenta los valores propuestos para el uso del suelo industrial en varios países. Para países como Noruega, Suiza y los Países Bajos no encontraron valores comparables para el tipo de uso del suelo industrial. Canadá muestra el valor más bajo para casi todos los elementos como resultado de los puntos finales eco-toxicológicos seleccionados, seguido de Suecia (que evalúa también el efecto de la industria en aguas subterráneas). Obviamente, el



uso de aguas subterráneas como agua potable o de proceso reduce los valores estando los más elevados se encuentran en EE.UU, Reino Unido, Francia y Bélgica relacionados con el número limitado de rutas de exposición que se incluyen en la derivación de sus valores para este tipo de uso del suelo en particular Los SCS difieren en un factor de 100 a 1.000, con la excepción del plomo, cuya variación se sitúa en un factor de 10. Si se excluyen los países que incluyen la ecotoxicología en la elaboración de los SCS, es decir, Canadá y Suecia, la variación disminuye en un factor de 10 a 100.

La necesidad de una investigación adicional del suelo o de medidas correctoras no sólo está relacionada con la superación de un valor para suelos, sino también con la superación de valores de calidad de agua subterránea entre otros.

**Tabla 33.** Porcentajes de clasificación de concentraciones de EPTs para la zona de estudio respecto a las normas internacionales para zonas residenciales

Clasificación	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Pb	Mo	Ni	Sb	Se	Sn	Tl	V	Zn
Menor que el mínimo valor	0.0	94.7	98.2	8.8	98.2	0.0	0.0	40.4	19.3	96.5	0.0	29.8	93.0	17.5	93.0	100.0	0.0
Entre el mínimo valor y el percentil 25	26.3	5.3	1.8	28.1	1.8	100.0	78.9	57.9	15.8	1.8	96.5	31.6	0.0	45.6	5.3	0.0	35.1
Entre el percentil 25 y el 50	7.0	0.0	0.0	21.1	0.0	0.0	8.8	1.8	19.3	0.0	1.8	0.0	5.3	31.6	0.0	0.0	8.8
Entre el percentil 50 y el 75	21.1	0.0	0.0	26.3	0.0	0.0	8.8	0.0	14.0	1.8	1.8	29.8	1.8	5.3	0.0	0.0	8.8
Entre el percentil 75 y el máximo valor	31.6	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	3.5	0.0	19.3	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	47.4
Mayor que el máximo valor	14.0	0.0	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	12.3	0.0	0.0	5.3	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0



**Tabla 34.** Compendio de valores propuestos por normas internacionales como valores máximos permisibles para EPTs en Zonas Residenciales

Elem.	Países																						
	Ale	Aus	Atl	Bél	Bra	Bul	Can	Dnc	Evq	EE.U U	Fin	Fra	Ita	Jap	Lit	Nor	PB	Pol	RU	RC z	Rus	Sue	Sui
<b>As</b>	50	50	20	110	55	15	12	20	50	22	50	37	20	150	10	2	55	22.5	20	70	4.5	15	
<b>Ba</b>					500				2000			625			600		625	285		1000			
<b>Be</b>							4		30			500	2		10		30			20			
<b>Cd</b>	20	10	2	6	8	0.6	10	5	20	37	10	20	2	150	3	3	12	5.5	2	20	0.76	0.4	20
<b>Co</b>					65		50		300		100	240	20		30		240	45		300		30	
<b>Cr</b>	400	250	50(total )		300	90	64(total )	1000	800	100000	200	130 (total)	150( total)	250 (VI)	100	25	380	170	130	500	3.8	5(VI )	
<b>Cu</b>		600	100	400	400	50	63	1000	500	3100	150	190	120		100	100	190	100		600	3.5	100	1000
<b>Hg</b>	20	10	2	15	36	0.05	6.6	3	10	23	2	7	1	15	1.5	1	10	4	8	10	1.9	1	
<b>Pb</b>	400	500	100	700	300	40	140	400	600	400	200	400	100		100	60	530	150	450	300	55	80	1000
<b>Mo</b>					100				200			200			5		200	25		100			
<b>Ni</b>	140	140	70	470	100	6	50	30	500	1600	100	140	120		75	50	210	75	50	250	2.6	35	
<b>Sb</b>		5			10						10	100	10		10		15			40			
<b>Se</b>									20				3		5		100		35				
<b>Sn</b>							50		300			1	1		10		900	40		300			
<b>Tl</b>		10										10	1				15						
<b>V</b>							130		500		150		90		150		250			450		120	
<b>Zn</b>			200	1000	1000	110	200	1000	300	23000	250	9000	150		300	100	720	325		2500	16	350	2000

Ale=Alemania, Aus=Austria, Atl=Australia, Bel=Bélgica, Bra=Brasil, Bul=Bulgaria, Can=Canadá, Dnc=Dinamarca, Fra=Francia, Fin=Finlandia, Ita=Italia, Jap=Japón, Lit=Lituania, Nor=Noruega, PB=Países Bajos, Pol=Polonia, RU=Reino Unido, RCz =República Checa, Rus=Rusia, Sue=Suecia, Sui=Suiza.

**Fuente:** (Provoost et al., 2006)

**Tabla 35** Compendio de valores propuestos por normas internacionales como valores máximos permisibles para EPTs en Zonas Industriales

Elemento	Países										
	Ale	Bél	Bra	Can	EE.UU.	Fin	Fra	Ita	Pol	RCz	Sue
As	140	300	150	12	260	100	120	50	62.5	140	40
Be				8				10		2800	
Cd	60	30	20	22	450	20	60	15	13	30	12
Co			90	300		250		250	175	450	60
Cr	1000	800	400	87	100000 (III)	300	7000	800	475	800	250 (III)
Cu		800	600	91	41000	200	950	600	600	1500	200
Hg	80	30	70	50	310	5	600	5	27	20	7
Pb	2000	2500	900	600	750	750	2000	1000	600	800	300
Mo			120						115	240	
Ni	900	700	130	50	20000	150	900	500	285	500	200
Sb			25			50		30			
Sn				300				10	170		
V				130		250		250		550	200
Zn	140	3000	2000	360	100000	400	120	1500	1650	5000	700

Ale=Alemania,, Bel=Bélgica, Bra=Brasil, Can=Canadá, Fra=Francia, Fin=Finlandia, Ita=Italia, Pol=Polonia, RU=Reino Unido, Rcz=República Checa, Sue=Suecia.

**Fuente:** (Provoost et al., 2006)

**Tabla 36** Porcentajes de clasificación de concentraciones EPTs para la zona de estudio respecto a las normas internacionales para zonas industriales.

Clasificación	As	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Pb	Mo	Ni	Sb	Sn	V	Zn
Menor que el mínimo valor	17.5	100.0	66.7	100.0	98.2	75.4	100.0	54.4	98.2	96.5	80.7	89.5	100.0	21.1
Entre el mínimo valor y el percentil 25	35.1	0.0	10.5	0.0	1.8	17.5	0.0	19.3	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	22.8
Entre el percentil 25 y el 50	29.8	0.0	10.5	0.0	0.0	3.5	0.0	8.8	0.0	0.0	10.5	5.3	0.0	26.3
Entre el percentil 50 y el 75	3.5	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.8	1.8	0.0	0.0	1.8	0.0	21.1
Entre el percentil 75 y el máximo valor	7.0	0.0	1.8	0.0	0.0	3.5	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	8.8

Mayor que el máximo valor	7.0	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	0.0	0.0	8.8	0.0	0.0	0.0
---------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

## 5.1 Análisis geo-estadístico

Se realizó un kriging ordinario para cartografiar los elementos con concentraciones superiores, siendo este el método más utilizado para el estudio de distribuciones de elementos en el suelo.

Los parámetros de los modelos de variograma y las estadísticas de validación cruzada se resumen en la Tabla 27 y las distribuciones espaciales de los metales traza se muestran en la Fig. 391. 40 y 41. Las distribuciones espaciales de Pb y As tienen la misma tendencia de aumento de la concentración hacia los lugares donde se encuentran los jales. Estas tendencias espaciales sugieren el papel dominante de las actividades mineras como las principales fuentes de elementos en los suelos lo que concuerda con los resultados de las evaluaciones cuantitativas de los elementos procedentes de jales en la zona.

Para el cálculo del error de los modelos a utilizar las características de los modelos para la interpolación se calcularon el Mean standardized error (MSE) y Root-Mean-Square Standardized Error (RMSSE) encontrando que los valores de error para el MSE en un rango desde -0.1428 hasta 0.0728 siendo el Modelo más común el Esférico con 11 elementos. Para RMSSE se encontró un rango de valores de 0.7425 a 1.5985 siendo el modelo más común el Exponencial con 14 elementos. Los cual al compararlo con los errores encontrados en otros estudios de la evaluación de la distribución espacial de elementos se encontró que (Xiang, Liu, Jiang, & Chen, 2019) para una zona minera de uranio, con 44 muestras, encontraron rangos de MSE de -0.077 a -0.079 y para RMSSE de 1.23 a 1.25. En otros estudios realizados, (F. Li, Li, Hou, & Shao, 2018) encontró para una zona recuperada de carbón en Huainan (China) con 90 muestras de suelo, encontraron rangos de MS de -0.084 a 0.0067 y para RMSSE de 0.94 a 1.26 y (Z. Zhang et al., 2019) encontró para la provincia en la cuenca del río Zijiang, con 235 puntos de muestras de suelo de arrozal, rangos de MS de -0.013 a 0.003 y para RMSS de 0.98 a 1.18.

Con estos resultados queda claro que los errores obtenidos para los modelos utilizados para la distribución de los elementos mapeados se encuentran dentro de los rangos utilizados en otros estudios con éxitos, sin embargo, de acuerdo con el criterio de evaluación, el análisis de error para la interpolación Kriging ordinario de las concentraciones de elementos, (MS lo más cercano a 0 posible y RMSS lo más cercano a 1 posible) resultan más precisos que los encontrados para la zona de Taxco, lo que podría deberse a una mayor cantidad de puntos de muestreo como en los estudios realizados por (Z. Zhang et al., 2019) o (F. Li et al., 2018) además de una menor separación entre los puntos de muestreo, para la zona de Taxco a pesar de que para la zona norte se cuenta con una buen cantidad de puntos (41) para la zona centro y sur que son aproximadamente de la misma área una cantidad de puntos mucho menor (9 y 6) lo que podría inducir a un error mayor en la interpolación para la totalidad del área.

**Tabla 37** Errores de predicción de interpolación Kriging ordinaria de las concentraciones de metales pesados.

Elemento	Modelo	Error Promedio	Mean standardized error	Root mean square standardized error
As	Esférico	-0.062	-0.013	1.014
Cd	Gaussiano	-0.014	-0.017	1.188
Cr	Gaussiano	-0.045	-0.005	1.097
Cu	Gaussiano	-0.037	-0.015	1.098
Mn	Esférico	-1.120	-0.007	1.055
Ni	Esférico	-0.057	-0.004	0.985
Pb	Esférico	-0.002	-0.002	1.018
Sb	Esférico	0.066	-0.002	1.054
V	Gaussiano	-0.067	0.003	1.090
Zn	Esférico	0.021	0.000	1.045

**Fuente:**(S. Zhang et al., 2018)



## 5. Conclusiones

- De manera general se tiene que para la totalidad del área de estudio los elementos normados por la NOM-147 presenta el siguiente comportamiento Pb>As>Ba>V>Cd>Cr>Ni>Ag>Tl>Se>Hg>Be con respecto a sus valores promedios.
- Elementos potencialmente tóxicos evaluados como Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, V, Zn y As están de manera general por encima a los valores establecidos como de fondo geoquímico de los suelos, en especial en zonas cercanas a los jales, sin embargo, los contenidos totales son resultaron variables incluso dentro de zonas cercanas lo que indica que los jales y los residuos rocosos son un medio muy heterogéneo, por lo que para una correcta validación de las concentraciones encontradas en diferentes estaciones para un mismo punto deberían estar ligadas a su ubicación geo-referenciada para disminuir la incertidumbre, entre tomas.
- El plomo, el cadmio y el arsénico, considerados de alta preocupación ambiental y toxicológica, se encuentran entre los metales con los valores más altos de concentración y de clasificación en los índices de contaminación evaluados (Igeo, FE) por lo que constituyen un importante riesgo para las comunidades. A partir de la evaluación de otros elementos como la plata también queda claro que dadas las características de la zona de estudio como zona minera para la correcta utilización y evaluación de índices de contaminación individuales se debe tener en cuenta las características de fondo geoquímico de la zona, como la riqueza natural de elementos como la plata o el oro.
- Los resultados del análisis de correlación y de factores reafirman los jales como principal fuente de contención en cuanto se encontraron fuertes relaciones entre elementos como el As y el Pb con el Fe, lo que podría explicarse por la liberación de



los mismos, resultado de la oxidación de minerales presentes en los jales de la zona, ricos en sulfúreos.

- A pesar de que se identificó un riesgo cancerígeno alto para la salud en las zonas norte y central para As y norte para Cd en la población adulta y en niños para la zona de estudio, este solo representa un primer avance para la estimación real del riesgo a la salud, para una correcta estimación del mismo se requiere un estudio toxicológico detallado y con características como la evaluación de la dieta, como principal vía de exposición a elementos potencialmente tóxicos, para una zona como Taxco en la que se sabe las aguas contaminadas son utilizadas para las labores caseras y de riego, así como análisis de bioaccesibilidad de los elementos potencialmente tóxicos presentes en la zona y análisis de especiación para una correcta identificación de los elementos evaluados y sus características.
- La superficie de distribución espacial generada mediante la interpolación por kriging ordinario de los elementos potencialmente tóxicos resultó con un rango de error aceptable respecto a lo que se encuentra en la bibliografía y representa de manera adecuada la distribución de los EPT alrededor de lo que se cree son las fuentes de contaminación por lo que resulta como una primera herramienta útil para evaluación y toma de decisiones para la zona. Sin embargo, para la determinación de nuevos modelos se deberán añadir factores ambientales como la pendiente y las corrientes de viento.
- Si bien la NOM-147 al igual que las demás normatividades a nivel mundial tiene como objetivo principal la protección de la salud humana, al no tener en cuenta factores como la protección de la función ecológica del suelo. Así como variables toxicológicas (como la dosis diaria) y eco toxicológicas (como la función ecológica del suelo) se queda corta para garantizar una completa protección a la salud y el medio ambiente.



## Referencias Bibliografía

- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13 SPEC. ISS.), 1139–1145.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- Armienta, M. A., Talavera Mendoza, O., Villasenor, G., Espinosa, E., Pérez-Martínez, I., Cruz, O., ... Aguayo, A. (2004). Environmental behaviour of metals from tailings in shallow rivers: Taxco, central Mexico. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Science*, 113(1). <https://doi.org/10.1179/037174504225004510>
- Arslan, Ş., & Çelik, M. (2015). Assessment of the pollutants in soils and surface waters around Gümüşköy Silver Mine (Kütahya, Turkey). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 95(4), 499–506. <https://doi.org/10.1007/s00128-015-1613-6>
- Aznar-Sánchez, J. A., García-Gómez, J. J., Velasco-Muñoz, J. F., & Carretero-Gómez, A. (2018). Mining waste and its sustainable management: Advances in worldwide research. *Minerals*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/min8070284>
- Baltas, H., Sirin, M., Gökbayrak, E., & Ozcelik, A. E. (2020). A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop province, Turkey. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125015>
- Benamghar, A., & Gómez-Hernández, J. J. (2014). Factorial kriging of a geochemical dataset for heavy-metal spatial-variability characterization: The Wallonian region. *Environmental Earth Sciences*, 71(7), 3161–3170. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2704-5>
- Carrera-Hernández, J. J., & Gaskin, S. J. (2007). Spatio temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology*, 336(3–4), 231–249.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.021>
- CHEN, S. bao, WANG, M., LI, S. shan, ZHAO, Z. qiu, & E, W. di. (2018). Overview on current criteria for heavy metals and its hint for the revision of soil environmental quality standards in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(4), 765–774. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61892-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61892-6)
- Cheng, X., Danek, T., Drozdova, J., Huang, Q., Qi, W., Zou, L., ... Xiang, Y. (2018). Soil heavy metal pollution and risk assessment associated with the Zn-Pb mining region in Yunnan, Southwest



- China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6574-x>
- Corrales-Pérez, D., & Martín-Romero, F. (2018). Adecuaciones para mejorar la aplicación del método D3987-85 en la extracción de EPT de los antiguos residuos mineros El Fraile, Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(1), 1–17. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.1.536>
- Corrales-Pérez, D., & Romero, F. M. (2013). Evaluacion de la peligrosidad de jales de zonas mineras de nicaragua y mexico y alternativas de solucion. *Boletin de La Sociedad Geologica Mexicana*, 65(3), 427–446. <https://doi.org/10.18268/BSGM2013v65n3a1>
- Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 33, 7–21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>
- Demková, L., Jezný, T., & Bobulská, L. (2017). Assessment of soil heavy metal pollution in a former mining area-before and after the end of mining activities. *Soil and Water Research*, 12(4), 229–236. <https://doi.org/10.17221/107/2016-SWR>
- Deraisme, J., Bobbia, M., & Fouquet, C. de. (2016). Contribution of Geostatistics to the Study of Risks Related to Air Pollution. *Advanced Air Pollution, i(tourism)*, 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>
- Devanesan, E., Suresh Gandhi, M., Selvapandiyan, M., Senthilkumar, G., & Ravisankar, R. (2017). Heavy metal and potential ecological risk assessment in sediments collected from Poombuhar to Karaikal Coast of Tamilnadu using Energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) technique. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(3), 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.04.011>
- Dótor-Almazán, A., Armienta-Hernández, M. A., Talavera-Mendoza, O., & Ruiz, J. (2017). Geochemical behavior of Cu and sulfur isotopes in the tropical mining region of Taxco, Guerrero (southern Mexico). *Chemical Geology*, 471(September), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.09.005>
- Dótor Almazán, A., Armienta Hernández, M. A., Árcega Cabrera, F., & Talavera Mendoza, O. (2014). Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito





- minero de Taxco, México: Aplicación de isótopos estables. *Hidrobiologica*, 24(3), 245–256.
- Duffus, J. H. (2002). “heavy metals” - A meaningless term? (IUPAC technical report). *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793–807. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>
- Duodu, G. O., Goonetilleke, A., & Ayoko, G. A. (2016). Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metal in Brisbane River sediment. *Environmental Pollution*, 219, 1077–1091. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.008>
- El Azhari, A., Rhoujjati, A., El Hachimi, M. L., & Ambrosi, J. paul. (2017). Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the soil-plant system and the sediment-water column around a former Pb/Zn-mining area in NE Morocco. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 144(March), 464–474. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.051>
- Espinosa, E., & Armienta, M. A. (2007). Mobility and fractionation of Fe, Pb and Zn in river sediments from a silver and base-metals mining area: Taxco, México. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 42(10), 1391–1401. <https://doi.org/10.1080/10934520701480474>
- Giannuzzi, L. (2018). *Toxicología general y aplicada*.
- Gill, R. (2015). Chemical Fundamentals of Geology and Environmental Geoscience. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- Gómez-Bernal, J. M., Ruiz-Huerta, E. A., Armienta-Hernández, M. A., & Luna-Pabello, V. M. (2017). Evaluation of the removal of heavy metals in a natural wetland impacted by mining activities in Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 76(23), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7144-1>
- González, R. C., & González-Chávez, M. C. A. (2006). Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes. *Environmental Pollution*, 144(1), 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.01.006>
- Gromet, L. P., Haskin, L. A., Korotev, R. L., & Dymek, R. F. (1984). The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(12), 2469–2482. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90298-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90298-9)
- Hengl, T., Minasny, B., & Gould, M. (2009). A geostatistical analysis of geostatistics. *Scientometrics*,



80(2), 491–514. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0073-3>

Hu, Z., & Qi, L. (2013). Sample Digestion Methods. *Treatise on Geochemistry: Second Edition*, 15(November), 87–109. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01406-6>

Huerta, E. A. R., & Hernández, M. A. A. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(2), 103–117.

Industrial Minera México, S. A. de C. V. (2016). Trabajos de restauración presas de jales de Taxco de Alarcón, Gro. *XV Taller de Intercambio de Experiencias CAMIMEX – SEMARNAT – PROFEPA - CONAGUA*.

Johnbull, O., Abbassi, B., & Zytner, R. G. (2019). Risk assessment of heavy metals in soil based on the geographic information system-kriging technique in Anka, Nigeria. *Environmental Engineering Research*, 24(1), 150–158. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.130>

Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: A review. *Science of the Total Environment*, 338(1-2 SPEC. ISS.), 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>

Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., & Macklin, M. G. (2014). Mine Tailings Dams : Characteristics , Failure , Environmental Impacts , and Remediation Applied Geochemistry Mine tailings dams : Characteristics , failure , environmental impacts , and remediation. *APPLIED GEOCHEMISTRY*, 51(January 2018), 229–245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>

Kowalska, J. B., Mazurek, R., Gąsiorek, M., & Zaleski, T. (2018). Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination—A review. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(6), 2395–2420. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z>

Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2014). *Using ArcGIS geostatistical analyst*.

Li, F., Li, X., Hou, L., & Shao, A. (2018). Impact of the Coal Mining on the Spatial Distribution of Potentially Toxic Metals in Farmland Tillage Soil. *Scientific Reports*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33132-4>

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. *Science of the Total Environment*, 468–469, 843–853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.090>
- Lozano-Garcia, D. F., Cuellar-Bermudez, S. P., del Rio-Hinojosa, E., Betancourt, F., Aleman-Nava, G. S., & Parra-Saldivar, R. (2019). Potential land microalgae cultivation in Mexico: From food production to biofuels. *Algal Research*, 39(March), 101459. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101459>
- Méndez-Ramírez, M., & Hernández, M. A. A. (2012). Distribución de Fe, Zn, Pb, Cu, Cd y As originada por residuos mineros y aguas residuales en un transecto del Río Taxco en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(2), 450–462.
- Mireles, F., Davila, J. I., Pinedo, J. L., Reyes, E., Speakman, R. J., & Glascock, M. D. (2012). Assessing urban soil pollution in the cities of Zacatecas and Guadalupe, Mexico by instrumental neutron activation analysis. *Microchemical Journal*, 103(January), 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.02.009>
- Moore, F., Sheykhi, V., Salari, M., & Bagheri, A. (2016). Soil quality assessment using GIS-based chemometric approach and pollution indices: Naxhlak mining district, Central Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5152-3>
- Moreno, M. E., Acosta-Saavedra, L. C., Meza-Figueroa, D., Vera, E., Cebrian, M. E., Ostrosky-Wegman, P., & Calderon-Aranda, E. S. (2010). Biomonitoring of metal in children living in a mine tailings zone in Southern Mexico: A pilot study. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 213(4), 252–258. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2010.03.005>
- Navarrete-López, M., Jonathan, M. P., Rodríguez-Espinosa, P. F., & Salgado-Galeana, J. A. (2012). Autoclave decomposition method for metals in soils and sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(4), 2285–2293. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2117-4>
- Nieder, R., Benbi, D. K., & Reichl, F. X. (2018). Soil components and human health. In *Soil Components and Human Health*. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1222-2>
- Orça, K., Usufi, B. J., Itaku, K. Ç., & Uka, V. K. (2019). DETERMINATION OF HEAVY METALS IN WOODEN TREES AND ASH RESIDUES IN KOSOVO. 17(2), 2931–2941.
- Peña-Icart, M., Pereira-Filho, E. R., Lopes Fialho, L., Nóbrega, J. A., Alonso-Hernández, C., Bolaños-



- Alvarez, Y., & Pomares-Alfonso, M. S. (2017). Combining contamination indexes, sediment quality guidelines and multivariate data analysis for metal pollution assessment in marine sediments of Cienfuegos Bay, Cuba. *Chemosphere*, 168, 1267–1276.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.053>
- Provoost, J., Cornelis, C., & Swartjes, F. (2006). Comparison of soil clean-up standards for trace elements between countries: Why do they differ? *Journal of Soils and Sediments*, 6(3), 173–181. <https://doi.org/10.1065/jss2006.07.169>
- Qingjie, G., Jun, D., Yunchuan, X., Qingfei, W., & Liqiang, Y. (2008). Calculating Pollution Indices by Heavy Metals in Ecological Geochemistry Assessment and a Case Study in Parks of Beijing. *Journal of China University of Geosciences*, 19(3), 230–241. [https://doi.org/10.1016/S1002-0705\(08\)60042-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0705(08)60042-4)
- Reyes, A., Cuevas, J., Fuentes, B., Fernández, E., Arce, W., Guerrero, M., & Letelier, M. V. (2021). Distribution of potentially toxic elements in soils surrounding abandoned mining waste located in Taltal, Northern Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 220(January 2020), 106653. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106653>
- Ríos, R. V. (2018). *MINERÍA EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE , UN ENFOQUE SOCIOAMBIENTAL MINING IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN , A SOCIOENVIRONMENTAL APPROACH*. 617–631.
- Robledo Marengo, M. de L., Rojas García, A. E., Medina Díaz, I. M., & Vivianco, Barrón, B. S. (2014). *Fundamentos de Toxicología*.
- Romero, F. M., Armienta, M. A., & González-Hernández, G. (2007). Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico. *Applied Geochemistry*, 22(1), 109–127.  
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.07.017>
- Romero, F. M., Núñez, L., Gutiérrez, M. E., Armienta, M. A., & Cenicerros-Gómez, A. E. (2011). Evaluation of the potential of indigenous calcareous shale for neutralization and removal of arsenic and heavy metals from acid mine drainage in the Taxco mining area, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 60(2), 191–203.  
<https://doi.org/10.1007/s00244-010-9544-z>



- Romero, Francisco Martín, Armienta, M. A., & Eugenia, M. (2008). *FACTORES GEOLÓGICOS Y CLIMÁTICOS QUE DETERMINAN LA PELIGROSIDAD Y EL IMPACTO AMBIENTAL DE JALES MINEROS* Universidad Nacional Autónoma de México , Instituto de Geología , Ciudad Universitaria , México DF 04510 , México . Correo electrónico : fmrch@geologia. 24(2), 43–54.
- Romero, Francisco Martín, & Ruíz, M. G. (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 43–53. <https://doi.org/10.18268/bsgm2010v62n1a3>
- Roque-Álvarez, I., Sosa-Rodríguez, F. S., Vazquez-Arenas, J., Escobedo-Bretado, M. A., Labastida, I., Corral-Rivas, J. J., ... Lara, R. H. (2018). Spatial distribution, mobility and bioavailability of arsenic, lead, copper and zinc in low polluted forest ecosystem in North-western Mexico. *Chemosphere*, 210, 320–333. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.004>
- Roy, D., Singh, G., & Seo, Y. C. (2019). Coal mine fire effects on carcinogenicity and non-carcinogenicity human health risks. *Environmental Pollution*, 254, 113091. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113091>
- Rudnick, R. L., & Gao, S. (2013). Composition of the Continental Crust. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (2nd ed., Vol. 4). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- Semarnat. (2007). NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. *Diario Oficial de La Federación*, 69. Retrieved from <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/147ssa16.html>
- SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, S. D. M. (2018). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana* , 2017.
- SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, S. D. M. (2019). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana* 2018. 544.
- Tafur-Marinos, J. A., Ginepro, M., Pastero, L., & Zelano, V. (2016). Digestion Procedures for the Elemental Analysis of Wood by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry. *Analytical Letters*, 49(11), 1722–1733. <https://doi.org/10.1080/00032719.2015.1120309>
- Talavera Mendoza, O., Yta, M., Moreno Tovar, R., Dótor Almazán, A., Flores Mundo, N., & Duarte



- Gutiérrez, C. (2005). Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, Mexico area to evaluate their potential environmental impact. *Geofísica Internacional*, 44(1), 49–64. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2005.44.1.552>
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy Metals Toxicity and the Environment. In *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology* (Vol. 101). <https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.051>
- Vázquez Bahéna, A. B., Talavera Mendoza, O., Moreno Godínez, M. E., Salgado Souto, S. A., Ruiz, J., & Huerta Beristain, G. (2017). Source apportionment of lead in the blood of women of reproductive age living near tailings in Taxco, Guerrero, Mexico: An isotopic study. *Science of the Total Environment*, 583, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.030>
- Vodyanitskii, Y. N. (2016). Standards for the contents of heavy metals in soils of some states. *Annals of Agrarian Science*, 14(3), 257–263. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.08.011>
- Weissmannová, H. D., Mihočová, S., Chovanec, P., & Pavlovský, J. (2019). Potential ecological risk and human health risk assessment of heavy metal pollution in industrial affected soils by coal mining and metallurgy in Ostrava, Czech Republic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(22). <https://doi.org/10.3390/ijerph16224495>
- Weissmannová, H. D., & Pavlovský, J. (2017). Indices of soil contamination by heavy metals – methodology of calculation for pollution assessment (minireview). *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(12). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6340-5>
- Wu, J., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., & Jiao, X. (2014). Evaluation of soil contamination indices in a mining area of Jiangxi, China. *PLoS ONE*, 9(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112917>
- Xiang, L., Liu, P. hui, Jiang, X. fu, & Chen, P. jia. (2019). Health risk assessment and spatial distribution characteristics of heavy metal pollution in rice samples from a surrounding hydrometallurgy plant area in No. 721 uranium mining, East China. *Journal of Geochemical Exploration*, 207(721), 106360. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106360>



Zhang, S., Liu, H., Luo, M., Zhou, X., Lei, M., Huang, Y., ... Ge, C. (2018). Digital mapping and spatial characteristics analyses of heavy metal content in reclaimed soil of industrial and mining abandoned land. *Scientific Reports*, *8*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35624-9>

Zhang, Z., Zhang, N., Li, H., Lu, Y., Wang, Q., & Yang, Z. (2019). Risk assessment, spatial distribution, and source identification of heavy metal(loid)s in paddy soils along the Zijiang River basin, in Hunan Province, China. *Journal of Soils and Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02352-0>