



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL –
RESIDUOS PELIGROSOS

DETERMINACIÓN DE RIESGO A LA SALUD Y AL AMBIENTE POR LA PRESENCIA
DE DRENAJE ÁCIDO GENERADO POR JALES MINEROS

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ANA PAOLA CHANGO CAÑOLA

TUTOR PRINCIPAL:

DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ, FI – UNAM

COMITÉ TUTORAL:

Dra. María Teresa Alarcón Herrera, CIMAV – Durango
M en A.I. Landy Ramírez Burgos, Facultad de Química, UNAM

Ciudad Universitaria, CDMX., septiembre 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Dra. González Sandoval María del Refugio
(Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo)

SECRETARIO: Dr. García Villanueva Luis Antonio (Facultad de Ingeniería)

1ER. VOCAL: Dra. Alarcón Herrera María Teresa
(Centro de Investigación en Materiales Avanzados, SC.)

2DO. VOCAL: M.A.I. Ramírez Burgos Landy Irene (Facultad de Química)

3ER. VOCAL: Dra. Fernández Villagómez Georgina (Facultad de Ingeniería)

Lugares donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de Hidalgo.

Laboratorio de Tecnología de Materiales del Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Tutora de la Tesis

Dra. Georgina Fernández Villagómez

Firma

DEDICATORIA:

A mi familia:

A mi mamá Gady F. Cañola Zambrano, mi papá Miguel A. Chango Heredia, mis hermanas María Isabel, y Michelle Berenice, por acompañarme en esta etapa. A John J. Guaña Morales, por motivarme a convertir mis sueños en metas cumplidas y brindarme el apoyo necesario para llevarlo a cabo.

“Gracias por todo”

A mis amigos:

Nancy E. Nacimba Loachamin, Maribel Manzo Garrido, Diana I. Guerrero Campos, Hamilton G. Mosquera Toscano, Mauro Cortez Huerta, Jessica M., Laura Chávez, Sra. Luz Mery Morales, Lorena Duarte Peña, Karla J. Avilés Plaza, Carina Ayala Manangon, Daniel Sandoval, Silvia E. Herrera Montaluisa,

AGRADECIMIENTOS:

A la Universidad Nacional Autónoma de México:

Por darme la oportunidad de formar parte de esta gran institución llena de conocimiento, deporte, arte y cultura.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología:

Por el apoyo económico otorgado durante el estudio de la Maestría, bajo el CVU No. 1104283

A la tutora principal:

La Dra. Georgina Fernández Villagómez, por todo el apoyo y confianza otorgada durante la Maestría, por compartir sus conocimientos y experiencia profesional y académica.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo:

Al Dr. Iván Erick Castañeda Robles del Laboratorio de Laboratorio de Tecnología de Materiales del Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Al Dr. Emiliano Moreno Pérez profesor de la Licenciatura en Ingeniería Civil del Área Académica de Ingeniería y Arquitectura

Dr, Francisco Raúl Barrientos Hernández en el laboratorio de Difracción de Rayos X del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales (AACT y M)

Dr. Juan Hernández Ávila Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales (AACT y M)

Al Comité Tutoral y Jurado Ampliado:

A la Dra. María del Refugio González Sandoval, al Dr. Luis Antonio Villanueva, a la Dra. María Teresa Alarcón, a la M.A.I Landy I. Ramírez Burgos por la revisión y asesoría de este trabajo de investigación.

Al Departamento de Manufactura y Materiales:

Al M.C. Jorge L. Romero Hernández
M.I. Efraín Ramos Trejo

Al Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental:

A la Maestra Natasha Carime Villaseñor Hernández

Al Laboratorio de Geoquímica Ambiental Molecular:

Al Maestro Ulises Laredo Jaso

Al grupo de investigación:

Al Dr. Jesús Fidel González Sánchez, Juana Fernanda González Contreras, Mario Alberto Minor Varela, Sandra Desentis Peña, Deyanira Quiroz Rodríguez.

A mis profesores:

A la Dra. Ana Elisa Silva Martínez, al Dr. Daniel de los Cobos Vasconcelos, al Dr. Enrique César Valdez, a la M.I. Alba Beatriz Vázquez Gonzales, al M.C. Vicente Fuentes Gea, Dr. Luis Antonio García Villanueva, a la Maestra Patricia Romero, por darme confianza y enseñanza en esta etapa

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	JUSTIFICACIÓN	3
1.2	OBJETIVOS	4
1.2.1	<i>Objetivo General</i>	4
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	4
1.3	HIPÓTESIS	5
1.1	ALCANCE Y LIMITACIONES	5
CAPÍTULO 2	MARCO TEÓRICO	6
2.1	ZONA DE ESTUDIO	6
2.1.1	<i>Información general</i>	6
2.1.2	<i>Uso de suelo</i>	7
2.1.1	<i>Geología</i>	7
2.1.2	<i>Mineralogía</i>	8
2.1.3	<i>Edafología</i>	8
2.1.4	<i>Clima</i>	9
2.1.5	<i>Información demográfica</i>	10
2.1.6	<i>Fauna y flora</i>	11
2.1.7	<i>Hidrografía</i>	12
2.2	PROCESO DE EXPLOTACIÓN MINERA	13
2.3	DRENAJE ÁCIDO DE MINA	16
2.4	CARACTERÍSTICAS DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA	17
2.4.1	<i>Concentración de minerales sulfuros y arseniatos</i>	18
2.5	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM)	18
2.6	NEUTRALIZACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA	19
2.7	FACTOR DE DETERMINACIÓN DE DAM (POTENCIAL ÁCIDO/ POTENCIAL NEUTRALIZADOR)	21
2.7.1	<i>Prueba estática de balance ácido – base</i>	21
2.8	EFFECTOS DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN LA SALUD	25
2.9	IMPACTO AMBIENTAL DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA	27
2.1	LEGISLACIÓN AMBIENTAL	31
2.1.1	<i>Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos</i>	34
2.1.2	<i>Ley Orgánica de la Administración Pública Federal</i>	34
2.1.1	<i>Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)</i>	34
2.1.2	<i>Ley Minera</i>	35
2.1.3	<i>Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)</i>	35
2.1.1	<i>Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003</i>	35
2.1.1	<i>Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004</i>	35
2.1.2	<i>Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005</i>	36
2.1.3	<i>Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009</i>	36

2.1.4	<i>Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental</i>	36
2.2	METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DEL RIESGO DESARROLLADA POR LA AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL.....	37
2.2.1	<i>Evaluación de la exposición</i>	39
2.2.2	<i>Caracterización del riesgo</i>	39
2.3	EVALUACIÓN DEL RIESGO ECOLÓGICO.....	40
2.4	SOFTWARE PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO	41
2.4.1	SADA	41
2.5	RIESGO ECOLÓGICO Y A LA SALUD POR EXPOSICIÓN A ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS	44
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA		46
3.1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	47
3.2	SELECCIÓN DE SITIOS DE TRABAJO.....	47
3.3	CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	48
3.3.1	<i>Determinación de la fracción de sólidos</i>	48
3.3.2	<i>Extracción de metales y metaloides en jales con agua en equilibrio con CO₂ según la NOM-141-SEMARNAT-2003</i>	49
3.3.3	<i>Análisis mediante el Espectrómetro de Absorción Atómica</i>	49
3.3.4	<i>Potencial de neutralización</i>	50
3.3.5	<i>Potencial de acidez</i>	51
3.3.6	<i>Microscopio de barrido electrónico</i>	52
3.3.7	<i>Análisis Infrarrojo</i>	52
3.3.8	<i>Análisis difracción de rayos x</i>	52
3.4	SOFTWARE SADA.....	53
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN		58
4.1	RESULTADOS DE OTRAS INVESTIGACIONES CONSIDERADOS PARA ESTE ESTUDIO	58
4.1	CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE JAL ZONA 3.....	59
4.1.1	<i>Resultados del Análisis Infrarrojo</i>	59
4.1.2	<i>Resultados del Potencial de Neutralización Neto</i>	60
4.1.3	<i>Resultados del Microscopio de Barrido Electrónico</i>	61
4.1.4	<i>Resultados de la difracción de rayos X</i>	61
4.2	GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO.....	62
4.3	RESULTADOS DE RIESGO A LA SALUD ZONA 1.....	63
4.4	RESULTADOS DE RIESGO A LA SALUD ZONA 2.....	66
4.1	RESULTADOS DE RIESGO A LA SALUD PARA LA ZONA 3.....	69
4.2	RESULTADO DE RIESGO ECOLÓGICO.....	69
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		70
REFERENCIAS		73
ANEXOS		84

Listado del contenido de tablas

Tabla 2.1 Efectos ambientales potenciales en las etapas de la minería	15
Tabla 2.2 Ejemplos de minerales de sulfuros precursores del DAM.....	16
Tabla 2.3 Clasificación del drenaje ácido de mina con base en los efectos del pH	18
Tabla 2.4 Factores que intervienen en el origen del DAM.....	19
Tabla 2.5 Ejemplos de minerales alcalinos	20
Tabla 2.6 Descripción de la disolución de compuestos alcalinos.	20
Tabla 2.7 Clasificación de carcinogenicidad en sustancias químicas.....	25
Tabla 2.8 Valores límites establecidos para plomo, cadmio y arsénico	26
Tabla 2.9 Valores de dosis de exposición de los EPT seleccionados	27
Tabla 2.10 Ejemplos de problemas ambientales.....	28
Tabla 2.11 Legislación ambiental aplicable a las actividades mineras	31
Tabla 2.12 Factores de exposición utilizados para los receptores.....	39
Tabla 2.13 Concentraciones de EPT en diferentes tipos de roca.....	44
Tabla 2.14 Consecuencias a la salud por EPT.....	45
Tabla 3.1 Volumen de HCl añadido en la muestra de jales.....	51
Tabla 3.2 Volumen añadido de NaOH 0.1 en la titulación para alcanzar pH 8.3	51
Tabla 3.3 Comparación de las especies existentes en la base de datos SADA con las especies que se encuentran en Zimapán.....	55
Tabla 4.1 Concentraciones de los elementos seleccionados para la determinación del riesgo a la salud y riesgo ecológico de la Zona 1 y 2	58
Tabla 4.2 Comparación de las concentraciones disponibles y totales de Pb.....	59
Tabla 4.3 Interpretación/ Caracterización de la muestra	60
Tabla 4.4 Determinación de la fracción de sólidos de los jales de las repeticiones de la muestra.....	60
Tabla 4.5 Cociente de Riesgo (HQ) e Índice de Peligro (HI) por exposición a metales contenidos en jales mineros.....	65
Tabla 4.6 Cociente de Riesgo (HQ) e Índice de Peligro (HI) por exposición a metales contenidos en jales mineros para la Zona 2.	67
Tabla 4.7 Cociente de Riesgo (HQ) e Índice de Peligro (HI) por exposición a metales contenidos en jales mineros para la Zona 3.....	69
Tabla 4.8 Cálculo de la dosis de riesgo para la flora y fauna por exposición a metales contenidos en jales mineros para las áreas de estudio	69

Listado del contenido de figuras

Figura 2.1 Mapa de ubicación Municipio de Zimapán	6
Figura 2.2 Usos de suelo zona 1 y Zona 2.....	7
Figura 2.3 Mapa de distribución de suelos Zona 1 y Zona 2	9
Figura 2.4 Clasificación de climas en las zonas de estudio.....	10
Figura 2.5 Localidades cercanas a las zonas de estudio.	11
Figura 2.6 Mapa de flora de las zonas de estudios.	12
Figura 2.7 Hidrogeografía de la zona de Zimapán en los sitios de estudio.....	13
Figura 2.8 Diagrama de proceso de extracción de minerales.....	14
Figura 2.9 Diagrama de extracción de metales y metaloides según la NOM-141-SEMARNAT-2003.....	22
Figura 2.10 Diagrama de flujo del “procedimiento de la prueba modificada de Balance Ácido Base” según la NOM-141-SEMARNAT-2003	23
Figura 2.11 Diagrama de flujo del procedimiento de cuantificación de sulfatos por el método turbidimétrico EPA-9038	24
Figura 2.12 Diagrama de evolución de la evaluación y gestión de riesgo desarrollado por la USEPA, (2011)	37
Figura 2.13 Metodología de evaluación de riesgo a la salud.....	38
Figura 2.14 Esquema de la metodología general del manejo de riesgo ecológico, Tomado de Norton et al., (1992)	40
Figura 2.15 Interfaz del programa SADA.	42
Figura 2.16 Interfaz del programa SADA de riesgo a la salud.....	43
Figura 2.17 Interfaz del programa de riesgo ecológico SADA	43
Figura 3.1 Diagrama de flujo general de la metodología de este estudio.	46
Figura 3.2 Ubicación de puntos de estudio Zona 1 Tovar, (2009), zona 2 (García, 2018).....	47
Figura 3.3 Estufa para secar muestras	48
Figura 3.4 Muestras de jales y blanco para determinación de extracto PECT	49
Figura 3.5 Espectrómetro de Absorción Atómica Avanta	50
Figura 3.6 Determinación cualitativa de los carbonatos a) preparación de las muestras para la adición de HCl, b) preparación de la mezcla 1.	50
Figura 3.7 Niveles de energía asociados al contenido de elementos en la muestra....	52
Figura 3.8 Parámetros de exposición para la estimación de riesgo.....	53
Figura 3.9 Parámetros de exposición para los escenarios seleccionados.....	54
Figura 3.10 Valores de estimación de riesgo propuestos	54

Figura 3.11 Representación de los LMP de Pb para uso industrial de la Zona 1 según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	55
Figura 3.12 Interfaz de especies terrestres.	57
Figura 4.1 Imagen del microscopio de barrido electrónico para una distancia de 100µm.....	61
Figura 4.2 Difractograma de la muestra homogenizada.....	62
Figura 4.3 Determinación del PN/PA para Zona 2	63
Figura 4.4 LMP según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para Pb y As según el uso de suelo (elaboración propia).....	64
Figura 4.5 LMP según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para Cd según el uso de suelo (elaboración propia).....	64
Figura 4.6 Interpolación de riesgo total para elementos cancerígenos Zona 1.....	66
Figura 4.7 LMP según los criterios de uso de suelo de la NOM-147-SEMARNAT/SS1-2004 para Pb (elaboración propia).....	67
Figura 4.8 LMP según los criterios de uso de suelo de la NOM-147-SEMARNAT/SS1-2004 para As (elaboración propia).....	68
Figura 4.9 Interpolación de riesgo total para elementos cancerígenos Zona 2.....	68

ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS

USEPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

HCl: ácido clorhídrico

IRIS: Sistema Integrado de Información de Riesgos

SMN: Servicio Meteorológico Nacional

CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua

DOF: Diario Oficial de la Federación

NAS: Academia Nacional de Ciencia

DAM: Drenaje ácido de mina

SADA: Análisis Espacial y Asistencia para la Toma de Decisiones

IRMA: Iniciativa para el Aseguramiento de la Minería Responsable fundada en 2006 por una coalición de organizaciones no gubernamentales (ONG) y empresas compradoras de minerales y metales, comunidades afectadas y mineras.

FeS₂: Pirita

PNN: Potencial de neutralización neto

NOM: Norma Oficial Mexicana

PA: Potencial de acidez

PN: Potencial de neutralización

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

LMP: límites máximos permitidos

DEFINICIONES

Dosis: Magnitud de la sustancia que entra en contacto con los individuos, depende de la ruta, vía y frecuencia. Se expresa en términos de cantidad de la sustancia (mg), por unidad de masa corporal (kg) y por unidad de tiempo (día) (Londoño *et al.*, 2016)

Vías de exposición: Las vías de exposición consideran las formas en que la sustancia entra al cuerpo, estas pueden ser oral – ingestión de comida, agua o suelo, respiratoria – inhalación de aire o polvo, o dérmica al entrar en contacto con la piel. En algunas ocasiones existe otra vía de exposición denominada parenteral que se presenta al entrar en contacto con ftalatos. (Mihelcic y Zimmerman, 2006).

Periodo de exposición: Definido como la duración total del intervalo de tiempo sobre el que se promedia la exposición. En caso de contaminantes sistémicos, el periodo de exposición constituye el tiempo en el que se estima que puedan aparecer los efectos (agudos, subcrónicos o crónicos); para los contaminantes cancerígenos el periodo de exposición coincide con la duración de toda la vida del individuo (Kaifer y Aguilar, 2006).

Carcinógenos: Elementos tratados como si tuvieran un efecto sin umbral, lo que significa que a cualquier exposición a una sustancia causante de cáncer generará un grado de incertidumbre, la aplicación del modelo de dosis – respuesta implica que la probabilidad de contraer cáncer es cero, sólo si la exposición al carcinógeno es cero. (Mihelcic y Zimmerman, 2006).

No carcinógenos: No estimulan el desarrollo de tumores, sin embargo, su efecto en la salud se ve reflejado en el deterioro de órganos o surgimiento de condiciones que disminuyen la calidad de vida del individuo expuesto, la diferencia significativa con los carcinógenos es que estos tienen un efecto umbral, lo que expresa que existe una dosis límite por debajo del cuál se considera que no existe efecto adverso (SEMARNAT y INEC, 2003)

Índice de peligro: Considerado para elementos no carcinógenos, consiste en la suma de todos los cocientes de peligro obtenidos del cociente de la dosis diaria absorbida para la dosis segura establecida. Este parámetro significa que existe un nivel de exposición por debajo que es poco probable incluso para poblaciones a experimentar efectos adversos para la salud cuando el índice de peligrosidad es menor o igual a 1

son considerados seguros, cuando supera la unidad, surge la preocupación por los posibles efectos a la salud (USEPA, 1991).

Estimación del riesgo extra de cáncer de por vida: El riesgo general para los agentes carcinógenos se entiende como la probabilidad de desarrollo de cáncer a lo largo de la vida del individuo. Se determinó como riesgo aceptable de una oportunidad en un 1000.000 (10^{-6}), valores que se encuentren en un rango de uno en 100.000 y de 1 en 10.000 necesitan considerar medidas de prevención y finalmente se considera como riesgo inaceptable una oportunidad en 1000 (10^{-3}) (USEPA, 1991).

Factor de pendiente: Denominado “slope factor” es la medida de la potencia carcinógena de un compuesto cuando entra en contacto con la dosis de ingesta de la sustancia en el individuo (Olmedo, 2016).

Límites Máximos Permisibles: Valores o rangos asignados a un parámetro, cuyos valores no deben ser excedidos (Rivera *et al.*, 2020)

RESUMEN

Las actividades mineras en México aportaron durante el año 2020 - 2022 un 2.3 % del Producto Interno Bruto Nacional, generando fuentes de empleo durante la recesión del año 2020. Los residuos generados de esta actividad registrados a la actualidad por la SEMARNAT describen la existencia de 466 presas de jales, las cuales se encuentran en zonas urbanas, áreas industriales, y zonas naturales.

Por tal razón surge la interrogante de evaluar el riesgo de la exposición a los elementos potencialmente tóxicos como Pb, Cd y As que integran los residuos de esta actividad, seleccionados por los efectos relacionados a la salud según el peso de la evidencia de la base de datos Sistema Integrado de Información del Riesgo (IRIS). Este estudio tiene como finalidad proporcionar información del potencial riesgo de la población expuesta a los residuos mineros, como es el drenaje ácido de mina de la zona de Zimapán mediante el uso de los módulos de la evaluación de riesgo a la salud y evaluación de riesgo ecológico del programa Spatial Analysis of Decision Assistance (SADA) versión 5.0. Se consideraron 3 sitios de estudio, dos obtenidos de base de datos de estudios anteriores y el 3ero es una presa de jales ubicada en la zona urbana de Zimapán a la cual se le realizó estudios de MEB e Infrarrojo para conocer la mineralogía presente y cuantificar el contenido de los EPT como Pb, así como se realizó la determinación del DAM, los resultados obtenidos de la muestra la catalogan dentro de la división V con tendencia a neutro.

Se encontró que los valores de riesgo a la salud para los elementos potencialmente tóxicos catalogados como A con evidencia epidemiológica suficiente para el As, B probable carcinógeno humano para el Pb y Cd para la Zona 1 es de 7.5E-02 por ingestión para uso agrícola, para la zona 2 es de 1.2E-02 y para la zona 3 1.1E-05 superan los valores de gestión innecesaria.

De igual manera para la evaluación de riesgo ecológico para las especies de mamíferos y aves presentes en la zona demostró que existe un potencial riesgo a la fauna expuesta.

ABSTRACT

Mining activities in Mexico will contribute 2.3 % of Mexico's Gross Domestic Product in 2020 - 2022, generating sources of employment during the 2020 recession. The waste generated from this activity currently registered by SEMARNAT describes the existence of 466 tailings dams, which are in urban areas, industrial areas, and natural areas.

For this reason, the question arises of assessing the risk of exposure to potentially toxic elements such as Pb, Cd, and As that make up the wastes from this activity, selected for their health-related effects according to the weight of evidence in the Integrated Risk Information System (IRIS) database. This study provides information on the potential risk to the population exposed to mining waste, such as acid mine drainage in the Zimapán area by using the modules of the health risk assessment and ecological risk assessment of the Spatial Analysis of Decision Assistance (SADA) version 5.0 program. Three study sites were considered, two got from the database of previous studies and the third one is a tailings dam in the urban area of Zimapán, which underwent SEM and infrared studies to determine the mineralogy present and quantify the content of EPTs such as Pb, as well as the determination of the DAM, the results got from the sample cataloged it within division V with a tendency to neutral.

It was found that the health risk values for potentially toxic elements classified as a with sufficient epidemiological evidence for As, B probable human carcinogen for Pb and Cd for Zone 1 are $7.5E-02$ by ingestion for agricultural use, for Zone 2 it is $1.2E-02$ and for Zone 3 $1.1E-05$ exceed the values for unnecessary management.

Similarly, the ecological risk assessment for mammal and bird species present in the zone showed that there is a potential risk to exposed wildlife.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

En México, treinta y una entidades federativas cuentan con yacimientos minerales, según las estadísticas presentadas hasta el 2020. Los minerales con alta tasa de extracción a nivel nacional son: oro, plata, plomo, cobre, zinc, hierro, coque, azufre y fluorita debido a su importancia económica y disponibilidad (SGM, 2021).

Los impactos ambientales generados de las actividades mineras son complejos, ya que dependen de diferentes factores, entre los más importantes se tienen los impactos hidrológicos como la generación de drenaje ácido e impactos a la superficie terrestre como la producción de jales mineros, tanto por la cantidad de residuos generados como por sus características físicas y mecánicas, ya que pueden contener sulfuros metálicos, que son la fuente de elementos potencialmente tóxicos (EPT) (Salas *et al.*, 2020).

Según informes presentados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a los sitios que contienen residuos generados por la minería, se les denomina presas de jales, que consisten en represas de agua con residuos sólidos de minerales que no se aprovecharon. En el año 2003 SEMARNAT reportó la existencia en México 466 presas de jales (SEMARNAT, 2003).

Uno de los problemas más comunes de los jales mineros se presenta, cuando en su composición tienen concentraciones de azufre total o compuestos sulfurados, ya que promueven la generación de drenaje ácido de mina (DAM), que generalmente proviene de la oxidación de los sulfuros metálicos expuestos a la meteorización durante periodos de tiempo prolongados (Rosales, 2019).

Es necesario cuantificar la generación de DAM en zonas de mina abandonadas, sitios cerrados e inclusive lugares que han sido remediados, ya que por su solubilidad y movilidad puede afectar a los cuerpos de agua superficiales o subterráneos, y los ecosistemas acuáticos (Brandão *et al.*, 2020).

Cuando se determina la presencia de DAM en un depósito de jales mineros, se precisa evaluar el grado de exposición a la contaminación del ecosistema y la población cercana. Para establecer el nivel de riesgo asociado a su exposición, se utilizan metodologías desarrolladas con base en modelos matemáticos, estas pueden aplicarse utilizando paquetes computacionales que integran los datos de concentración de elementos químicos, tipo de recurso, entre otros junto con los procesos geoespaciales para que los resultados puedan inferir en la decisión de políticas de restauración (Ilizaliturri *et al.*, 2009).

La aplicación de paquetes computacionales en la determinación de riesgo ecológico y a la salud, facilita el análisis de grandes cantidades de datos, la determinación de la calidad ambiental del sitio contaminado, y permite el análisis geoespacial del sitio, con la finalidad de hallar valores ambientales de interés, para desarrollar programas de protección y apoyo en las decisiones de investigaciones que deben llevarse a cabo, cómo deben invertirse los recursos gubernamentales disponibles y establecer políticas locales (INE y SEMARNAT, 2010).

Debido al impacto ambiental del DAM para el desarrollo del presente trabajo se seleccionaron diferentes áreas de la zona minera de Zimapán, caracterizada por su generación de DAM debido a la presencia de presas de jales por actividades de extracción mineral metálico y no metálico (Labastida *et al.*, 2013).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Llevar a cabo la determinación de riesgo a la salud y al ambiente por la presumible presencia de drenaje ácido generado por jales mineros utilizando el paquete computacional Análisis espacial y asistencia para la toma de decisiones (SADA por sus siglas en inglés).

1.2.2 Objetivos específicos

- Llevar a cabo una revisión exhaustiva de la legislación ambiental vigente para la regulación de ejecución de proyectos mineros en América.
- Realizar la revisión de estudios relacionados con la generación del drenaje ácido de mina (DAM) en México para la selección de un escenario que permita la aplicación del análisis de riesgo utilizando un software de uso libre.
- Seleccionar los elementos potencialmente tóxicos para su utilización como indicadores en el análisis de riesgos, tomando en cuenta los criterios del peso de la evidencia desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.
- Estimar el posible riesgo de los elementos seleccionados que conforman el DAM en la salud de la población cercana y el ambiente, utilizando el paquete computacional Spatial Analysis of Decision Assistance (SADA) versión 5.0.
- Comparar los resultados de los escenarios seleccionados con la NOM-147-SEMARNAT/SS1-2204 aplicable a los criterios de uso de suelo

(residencial, agrícola e industrial) para la determinación del porcentaje de desviación de los límites máximos permisibles.

- Determinar los elementos potencialmente tóxicos y la relación del potencial de neutralización entre el potencial de acidez (PN/PA) presentes en las muestras provenientes de una presa de jales de Zimapán de acuerdo con la caracterización establecida en la NOM-141-SEMARNAT-2003 para la estimación del efecto a la salud y al ambiente.

1.3 Hipótesis

Si al aplicar la prueba modificada de balance ácido base, Potencial de neutralización (PN)/ Potencial ácido (PA) el resultado es menor a 1.2, entonces el jal es un potencial generador de drenaje ácido y existirá un probable riesgo a la población cercana y al ambiente.

Si aplicando el software SADA para el análisis de riesgo a la salud y al ambiente por exposición a EPT, se supera los valores establecidos en ésta, entonces la población aledaña a las zonas de estudio se encontrará en probable riesgo.

1.1 Alcance y limitaciones

- Las zonas de estudio se seleccionaron considerando la naturaleza del material explotado en la mina y que sea potencial generador de drenaje ácido, se seleccionaron tres áreas de la zona minera de Zimapán, Hidalgo, México.
- Inicialmente se consideraron datos de presas de jales obtenidos de otros trabajos y del grupo de investigación, provenientes de la zona de Zimapán.
- Para este estudio se seleccionaron los elementos plomo, cadmio y arsénico, debido a que representan un riesgo a la salud ya que están catalogados como potencialmente cancerígenos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2014).
- Posteriormente se tomaron en cuenta los resultados obtenidos de muestras de jales analizados en el laboratorio de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo que contenían elementos considerados potencialmente tóxicos.
- Finalmente hubo la oportunidad de caracterizar cualitativamente la muestra de jale utilizando el microscopio electrónico de barrido tanto en la UAEH como en la facultad de Ingeniería de la UNAM, el equipo análisis de infrarrojo (ubicado en el laboratorio de geología).

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Zona de estudio

2.1.1 Información general

El Municipio de Zimapán se ubica entre los paralelos 20°44' de latitud norte y 99°23' de longitud oeste, a una elevación de 1,780 metros sobre el nivel del mar. Ocupa el 4.18% de la superficie del estado de Hidalgo y cuenta con 159 localidades. Se encuentra entre los municipios de Pacula y Jacala al norte, al sur con los de Tecozautla y Tasquillo, al este con los de Nicolás Flores e Ixmiquilpan y al oeste con el Estado de Querétaro (Zúñiga, 2019).

En la Figura 2.1 se presenta la ubicación del municipio de Zimapán dentro del estado de Hidalgo, así como se puede observar las zonas de estudio seleccionadas.

Según los registros del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en el año 2017 registra una temperatura máxima de 25 °C y una temperatura mínima de 19.4°C, el rango de precipitación oscila de 1.9 mm a 177 mm siendo septiembre el mes más lluvioso en el periodo 1965 – 2017 (CONAGUA, 2020).

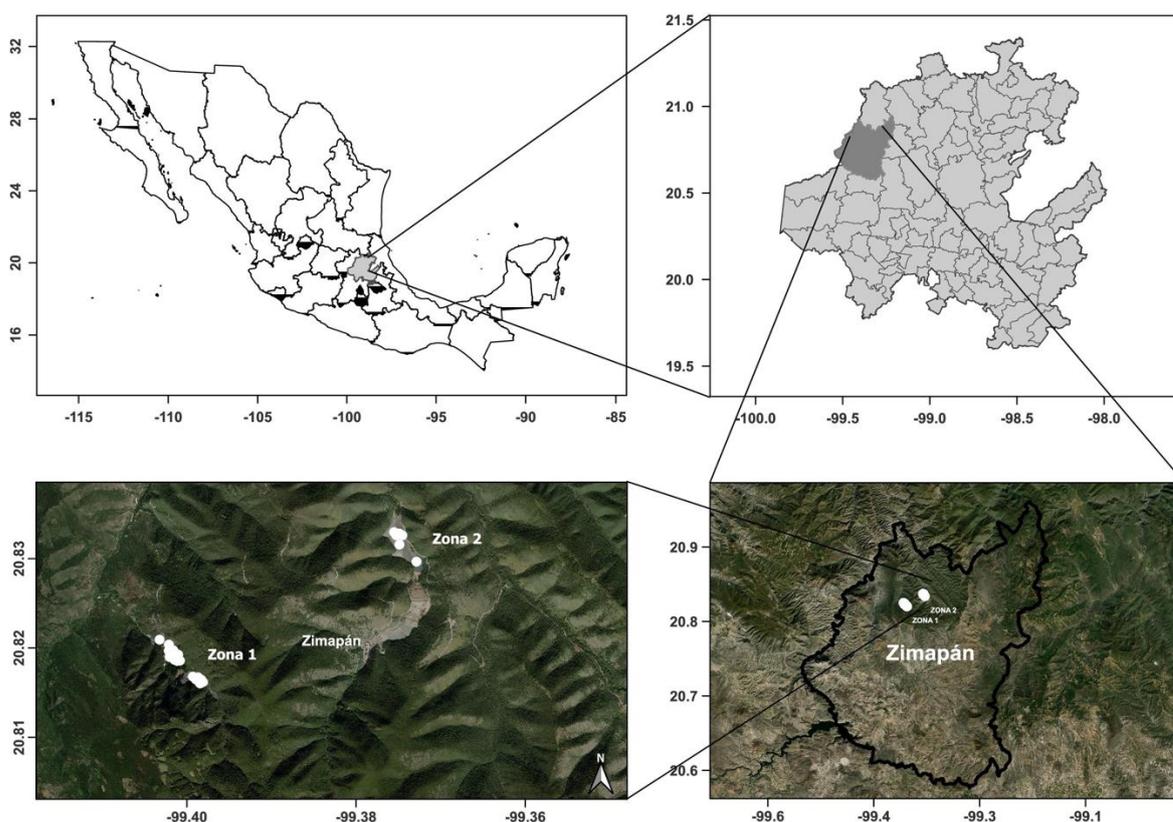


Figura 2.1 Mapa de ubicación Municipio de Zimapán
Elaboración propia mediante datos de INEGI, (2022).

2.1.2 Uso de suelo

El suelo de Zimapán pertenece a la etapa mesozoica, de tipo semidesértico, rico en materia orgánica y nutrientes. El uso de suelo corresponde a agostaderos el 51%, el 8.7% forestal, 3% agrícola y el 37.3% otros usos, con respecto a la tenencia de la tierra el 69% corresponde a superficie ejidal y el 31% corresponde a la pequeña propiedad (GMZ, 2016). Según la información facilitada por el INEGI el área de Zimapán está usada para pastizales como se puede observar en la Figura 2.2.

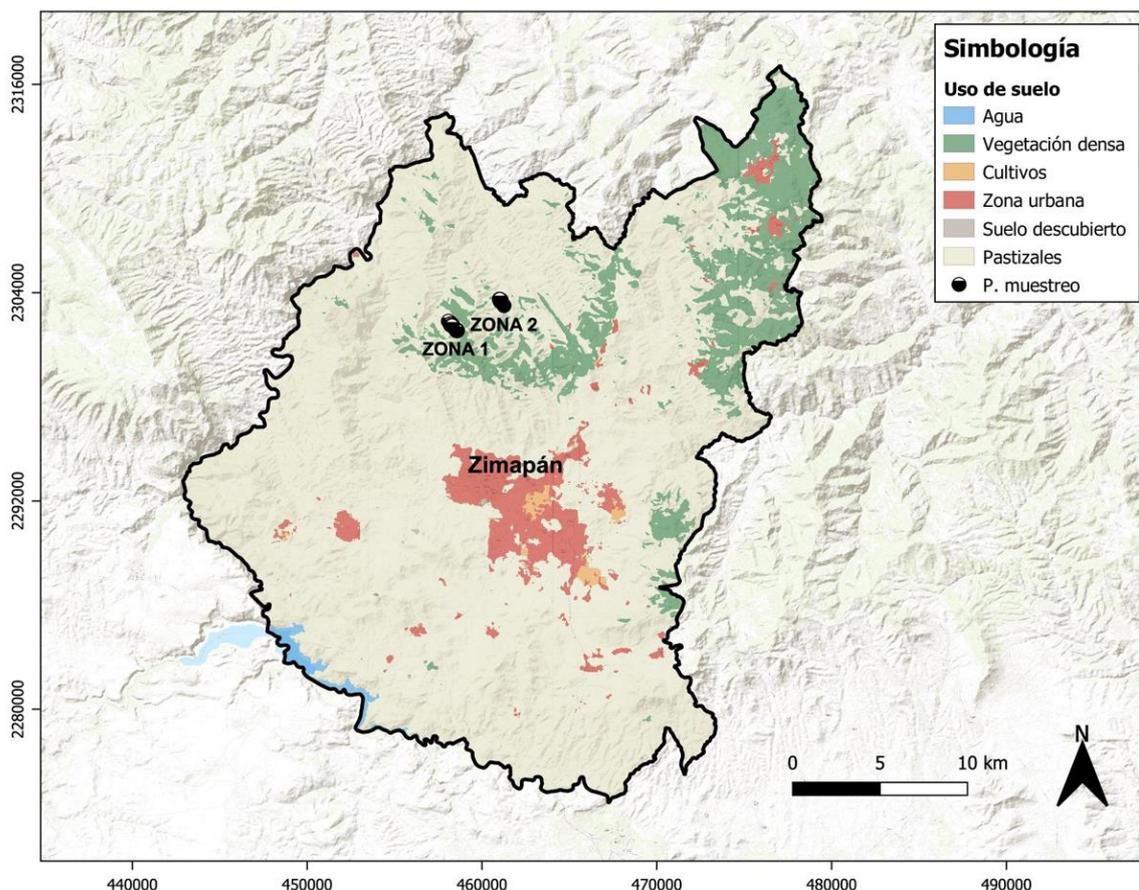


Figura 2.2 Usos de suelo zona 1 y Zona 2
Elaboración propia mediante datos de INEGI, (2022).

2.1.1 Geología

El distrito Zimapán comprende el límite de la Mesa Central y Sierra Madre Oriental aproximadamente a unos 150 km al norte de la Ciudad de México, en la parte noroccidental del Estado de Hidalgo. Las columnas estratigráficas de origen marino están formadas por paquetes litológicos reconocidos como formaciones, de edades que van del Jurásico Superior hasta el Cretácico Superior, según se explica a continuación (Azpeitia, 2007).

Formación San Juan de la Rosa

Esta afloración está constituida por rocas epiclásticas y piroclásticas de composición probablemente riolítica o riodacítica, con cristales de cuarzo, feldespato alcalino, plagioclasa y micas (Morales-Arredondo, 2022).

Formación el Doctor

Este nombre se asignó a las rocas carbonatadas de la parte superior del Cretácico Inferior que afloran en las inmediaciones del Macizo El Ángel – El Espolón. El término se sugirió para designar los depósitos de plataforma constituidos por calizas micrítica beige y gris claro en estratos gruesos >0.7m (Armienta y Rodríguez, 2004).

Formación El Morro

Esta secuencia está caracterizada por una litología rica en clastos de diferentes tamaños, de caliza, marga y lutita en una matriz arenosa de composición carbonatada y silícea. Existe una capa delgada de andesita intercalada en el conglomerado al oeste de Zimapán, exhibiendo parcialmente clastos de rocas volcánicas y, hacia la cima, la brecha se interdigitan con tobas andesíticas (Carrillo y Suter, 1982).

2.1.2 Mineralogía

La mineralogía de Zimapán está representada por mantos, chimeneas y diseminaciones, comprendidas por las minas el Carrizal y el Monte los minerales que se pueden encontrar son muy diverso, constituidos principalmente por galena (PbS), esfalerita (ZnS), pirita (FeS₂), calcopirita (CuFeS₂), arsenopirita (FeAsS), pirrotita (Fe_{1-x}S), bornita (Cu₅FeS₄), estibina (Sb₂S₃) y boulangerita (Pb₅Sb₄S₁₁) entre otros, la textura cataclástica es común en la mineralización y se refleja en la fracturación de la pirrotita y en el relleno de calcopirita entre los minerales no metálicos se tienen la calcita, cuarzo, wollastonita, tremolita, actinolita, augita, granates, hedenbergita, etc., (Azpeitia, 2007).

La producción minera en este distrito según el Servicio Geológico Mexicano en el año 2019, de minerales como plomo fue de 6,913.51 toneladas y se tuvo una producción de 952 toneladas de cadmio para este mismo año (SGM, 2020).

2.1.3 Edafología

La zona de estudio, según los datos obtenidos de la plataforma CONABIO del metadato del 2008 el suelo de las zonas de trabajo está representado por Luviosol Crómico y Rendzina los cuales se describen a continuación. Los luvisoles se caracterizan por contener una gran cantidad de arcilla en la superficie con una alta retención de agua.

El material parental de este suelo está compuesto por una amplia variedad de compuestos no consolidados, incluyendo till glacial y depósitos eólicos, aluviales y coluviales por lo que dificulta la aireación de las raíces. Este tipo de suelo llevan periodos largos de formación, contienen una alta concentración de hematita lo que provoca su color rojizo, con alta capacidad de retención de agua (Jordanova *et al.*, 2013).

Las Rendzinas son suelos desarrollados sobre calizas duras, mármoles y otras rocas madres ricas en carbonatos, el principal proceso que se da en el suelo es la disolución de los carbonatos y su lixiviación fuera del suelo (Jordanova *et al.*, 2013).

En el mapa de la Figura 2.3 se puede observar que para la zona de Zimapán existe presencia de Rendzinas, como Luvisol y Regosol.

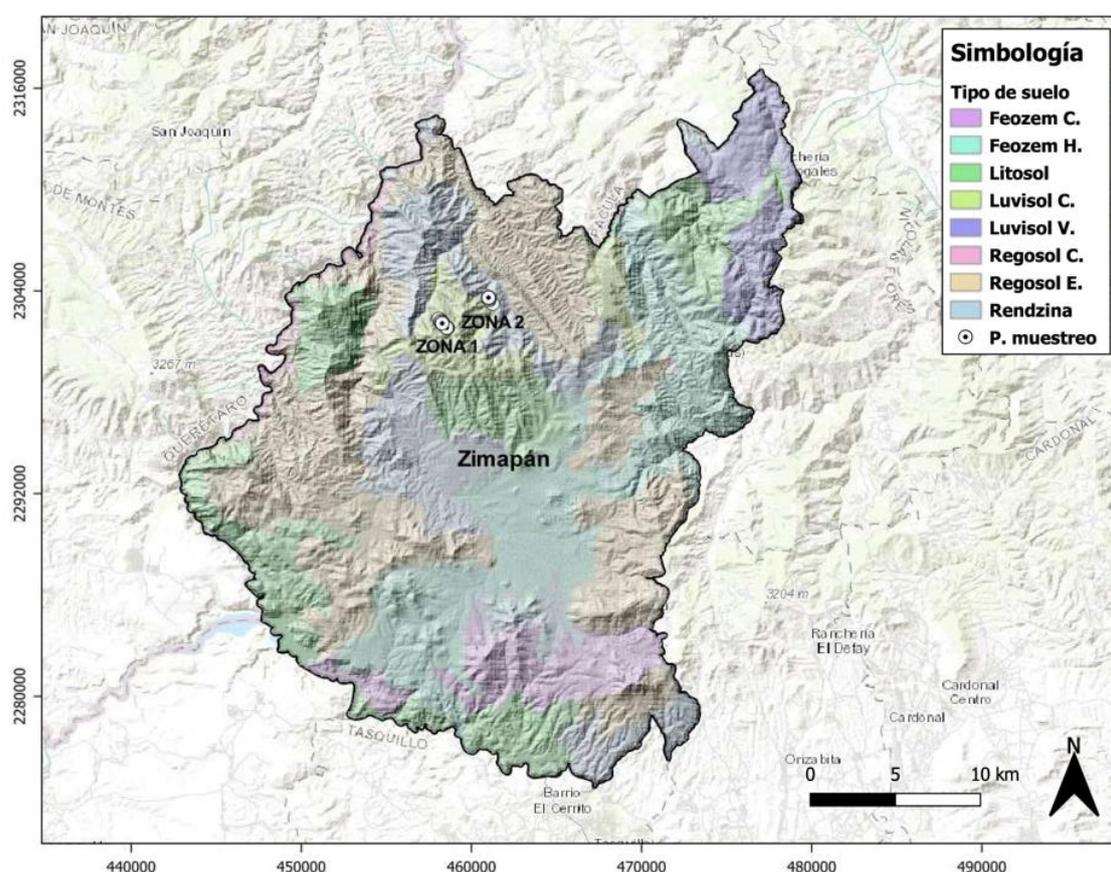


Figura 2.3 Mapa de distribución de suelos Zona 1 y Zona 2

Elaboración propia mediante datos de INEGI, (2022).

2.1.4 Clima

El clima predominante en el área es templado subhúmedo a templado según los datos obtenidos de INEGI representados en el siguiente mapa climatológico de la Figura 2.4. Existe una temperatura promedio anual de 18.3 °C, y una estación de lluvias en verano

(mayo a junio) con un promedio de precipitaciones de entre 391 y 458 mm³ (IRMA, 2020).

El clima templado de la Sierra Madre Oriental está caracterizado por las cantidades de humedad y su concentración de lluvias asociado con las comunidades de pino – encino en las partes elevadas. El clima templado subhúmedo se desarrolla en las elevaciones de la Sierra Madre Oriental, formando una franja que va desde el municipio de Acaxochitlán hasta el municipio de Mezquititlán – Hacia el centro del estado, abarcando una parte del Municipio de Zimapán. El clima semiseco templado presenta temperaturas de 10°C -24°C (Cortés, 2018).

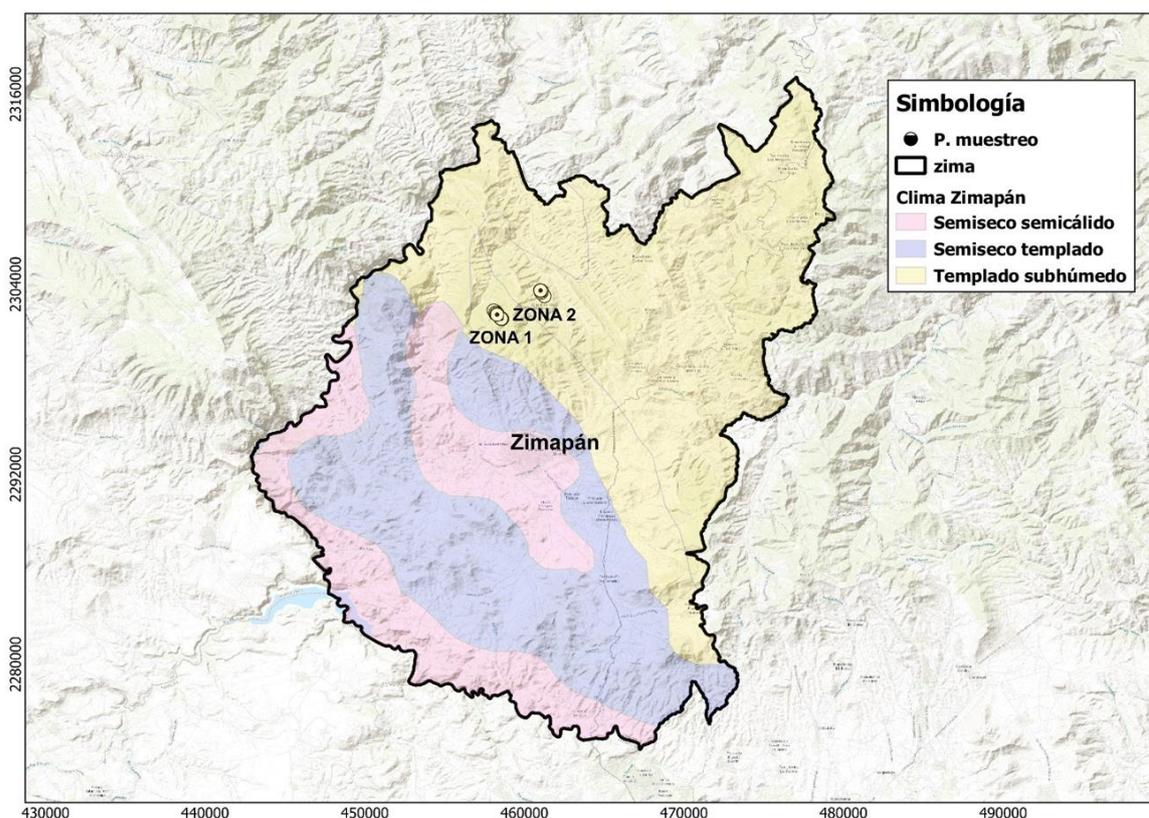


Figura 2.4 Clasificación de climas en las zonas de estudio.

Elaboración propia mediante datos de INEGI, (2022).

2.1.5 Información demográfica

El estado de Hidalgo cuenta con 3'082,841 habitantes ocupando el nivel número 16 de a nivel nacional, estos valores se conforman de residentes en viviendas particulares y colectivas, así como la población del Servicio Exterior Mexicano que realiza actividades en otro país y, finalmente, se consideró la población que carece de vivienda. En Hidalgo existe un total de población de 54,015 en edad de 30 años, 53,431 en edad de 40 años,

en el mapa de la Figura 2.5, se encuentran las localidades cercanas a las áreas de estudio en el cual se puede observar que no se encuentran poblaciones cercanas a los sitios (INEGI, 2020).

En Hidalgo, la tasa bruta de mortalidad alcanzó 4.7 defunciones para cada mil habitantes para el año 2001, la esperanza de vida de las personas residentes de Hidalgo sufrió fluctuaciones positivas de 1970 a 2005 pasando de 59.1 en 75.1 años. Las fluctuaciones del indicador son el reflejo del gradual incremento de las tasas brutas de mortalidad, aplicables a un mayor número de defunciones por enfermedades crónico-degenerativas y a las muertes por causas violentas, principalmente en los hombres jóvenes. Este indicador es utilizado para observar la causa de defunción en las localidades cercanas a los sitios de estudio como se puede ver en el mapa de la Figura 2.5 (INEGI, 2020).

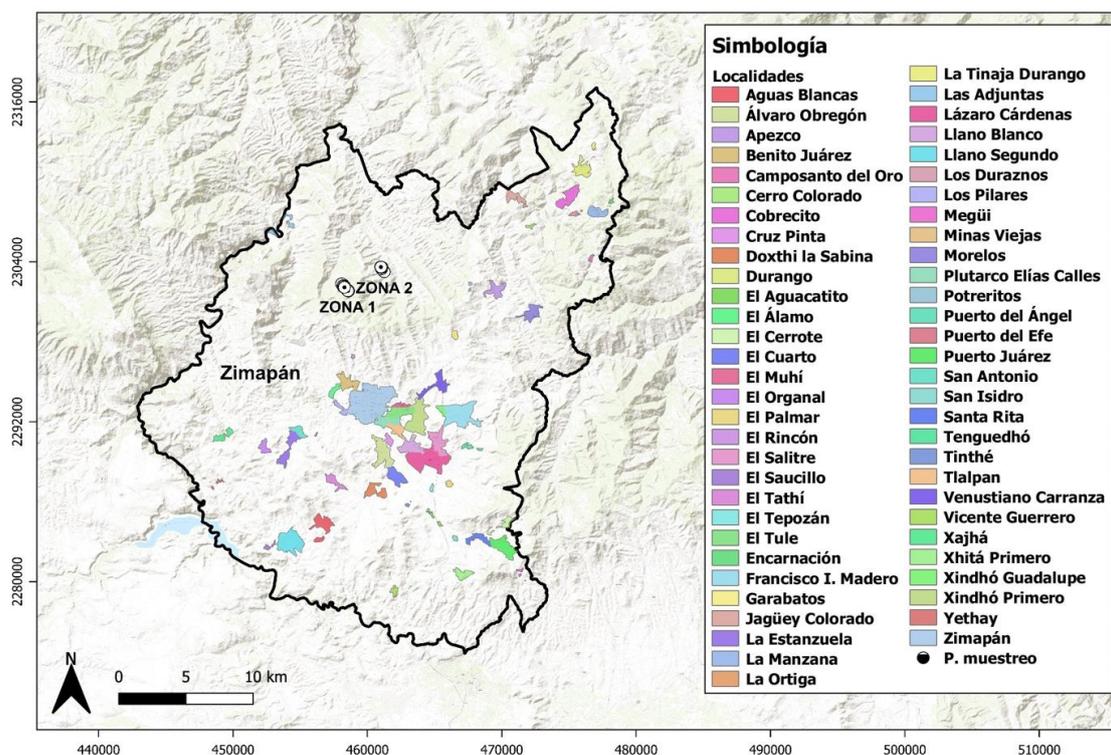


Figura 2.5 Localidades cercanas a las zonas de estudio.
Elaboración propia mediante datos de INEGI, (2022).

2.1.6 Fauna y flora

La fauna está integrada por una diversidad de mamíferos como lobos, coyotes, tigrillos, tlacuaches, liebre, zorras, zorrillos. También se tienen reptiles como víboras y lagartijas. Entre las aves se pueden encontrar gavilanes, cuervos, tejones, lechuzas, así como codornices. La flora de está caracterizada por contar con poca vegetación ya

que está incrustada en una zona desértica. Se puede encontrar grandes extensiones de nopaleras, arbustos bajos, matorral alto, maguey, cardones, biznagas, ortigas y mezquites, debido a sus características no se dedican a la agricultura intensiva. En el siguiente mapa se encuentra el uso de suelo en Zimapán, en el cual se observa que existe pastizal inducido y bosque de pino – encino (GMZ, 2016).

Con respecto a las actividades ganaderas son escasas debido a las condiciones áridas del terreno, se puede apreciar crianza minoritaria de caprinos, ovinos y equinos (GMZ, 2016).

En el mapa de la Figura 2.6 se puede observar el tipo de vegetación disponible en la zona de Zimapán como son bosque de pino encino, vegetación arbustiva de pino – encino y bosque introducido.

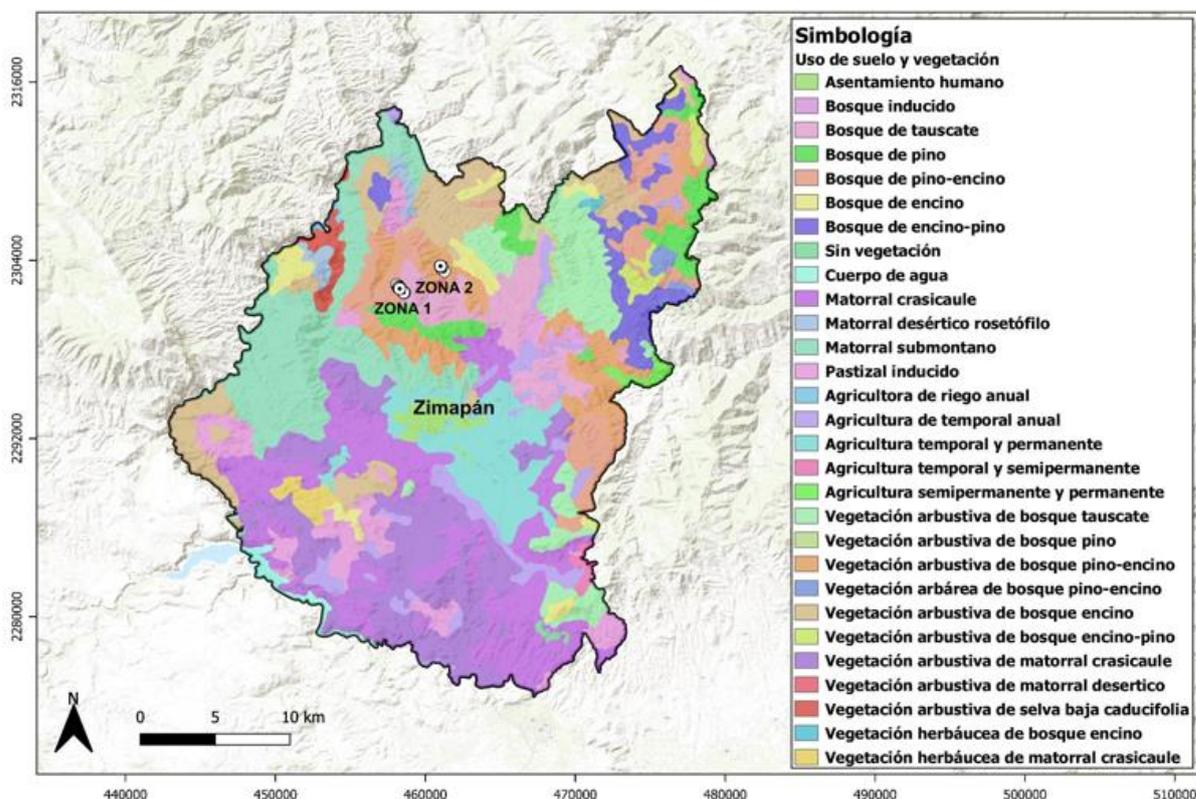


Figura 2.6 Mapa de flora de las zonas de estudios.

Elaboración propia mediante datos de INEGI, (2022).

2.1.7 Hidrografía

Las corrientes pluviales más importantes en Zimapán están delimitadas por un parteaguas que divide las corrientes superficiales, separando las que integran al arroyo Chepinque, que drena con dirección poniente cambiando al norte hasta aportar sus caudales con el nombre del río Tolimán, al margen derecho del río Moctezuma 20 km aguas debajo de la cortina del Proyecto Hidroeléctrico Zimapán, se puede observar la

hidrografía correspondiente según los datos proporcionados por el INEGI de la década de 2000 en el mapa de la Figura 2.7 (Cortés, 2018).

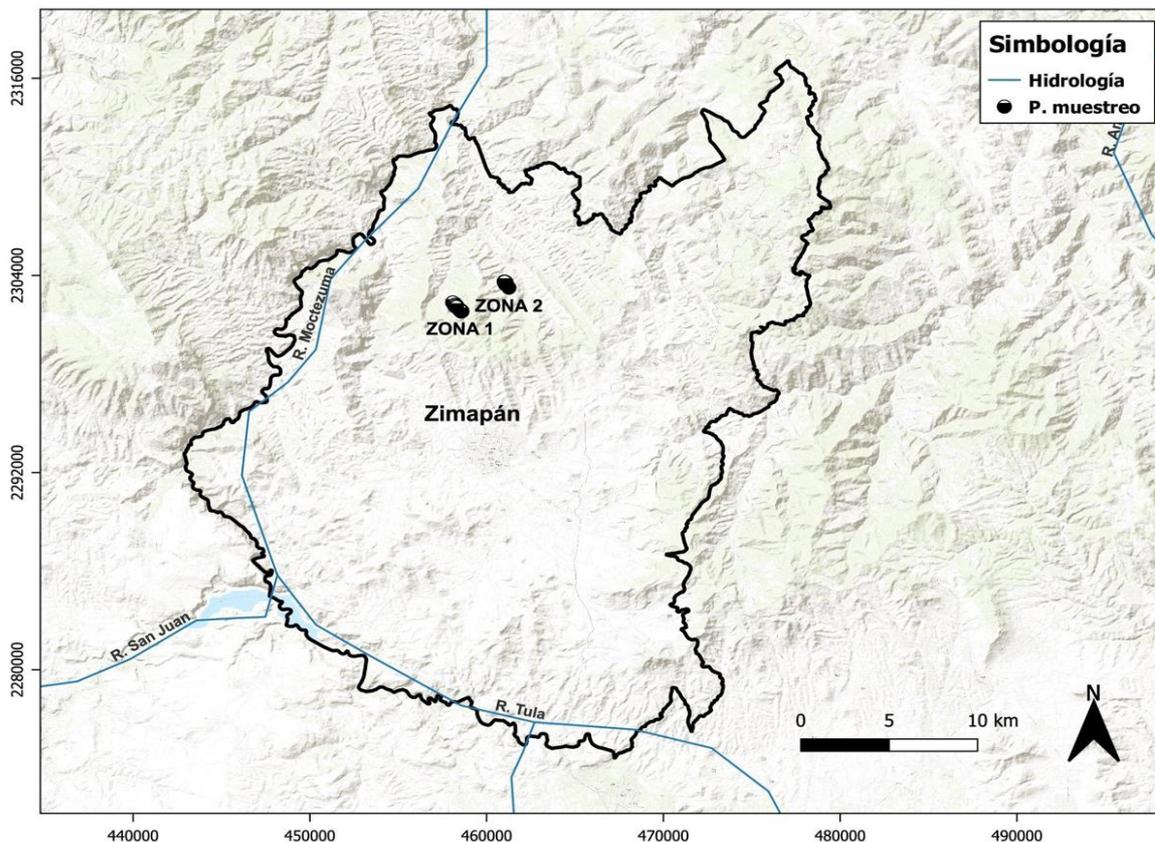


Figura 2.7 Hidrogeografía de la zona de Zimapán en los sitios de estudio
Elaboración propia mediante datos de INEGI, (2022).

2.2 Proceso de explotación minera

En el ambiente, destacan los efectos negativos provenientes de los diferentes procesos de la minería. En el gráfico de la Figura 2.8 se puede observar el desarrollo de la extracción de los minerales, siendo de interés para este estudio, la presa de jales o relavera los cuales son sitios donde se almacenan los residuos del proceso minero (Galvez *et al.*, 2018).

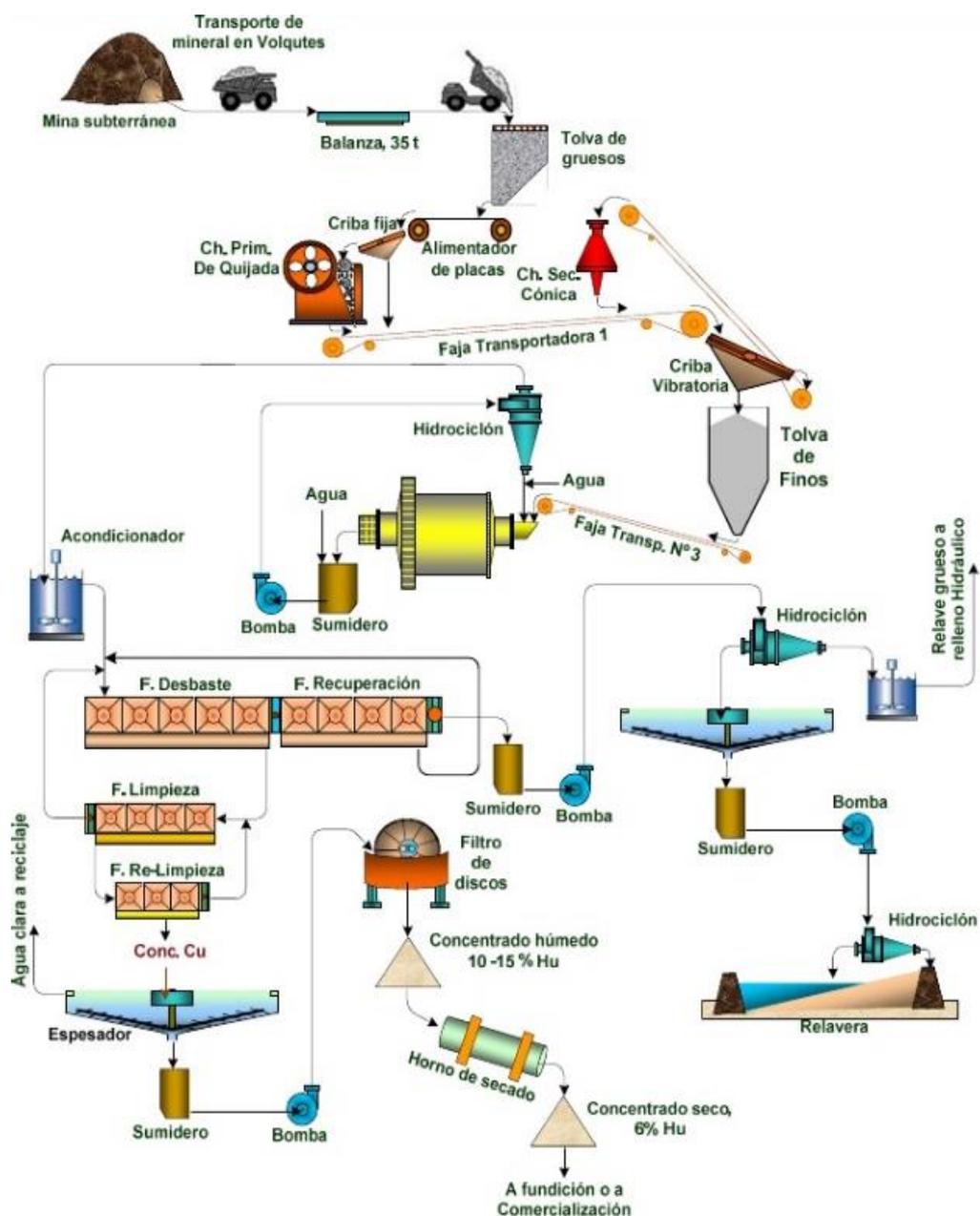


Figura 2.8 Diagrama de proceso de extracción de minerales.

Tomado de (García, 2018)

Existen dos rutas de impacto ambiental de los residuos mineros, dispersión (eólica e hídrica) y lixiviación de contaminantes. Si existen elementos potencialmente tóxicos (partículas menores de $2.5 \mu\text{m}$) la primera es muy peligrosa ya que pueden permanecer en el aire, en forma de partículas suspendidas, movilizarse largas distancias y afectar a la biota y suelo donde se depositan. Los impactos ambientales provocados por estas actividades pueden observarse en la Tabla 2.1, donde se describen el tipo de preocupaciones ambientales por las actividades mineras (Reyes, 2009).

Tabla 2.1 Efectos ambientales potenciales en las etapas de la minería

Impactos potenciales	Descripción de los impactos potenciales
Exploración, factibilidad y planeación de construcción	<ul style="list-style-type: none"> • Los impactos ambientales en esta etapa del proyecto no se consideran representativos. • Existe mayor perturbación de los hábitats, así como potencial liberación de contaminantes.
Descarga de drenaje ácido de mina (DAM) a la superficie y agua subterránea.	<ul style="list-style-type: none"> • Metales pesados tóxicos provenientes de los minerales extraídos y residuos vertidos en el ambiente (posible aceleración del proceso natural de generación de drenaje ácido de roca). • Presencia de compuestos orgánicos en los reactivos utilizados durante la extracción mineral. • Compuestos de cianuro utilizados particularmente en el proceso de concentración del oro • Presencia de amonio. • Pérdida y destrucción de hábitat. • Degradación o inestabilidad de suelos ocasionados por la construcción de presas de jales. • Incremento de sedimentos y erosión en lagos y arroyos • Cambios en el curso de ríos y regímenes ecológicos
Impactos en la salud ocupacional	<ul style="list-style-type: none"> • Inhalación de partículas. • Generación de ruido. • Condiciones no aptas de trabajo.
Impactos sociales y económicos	<ul style="list-style-type: none"> • Cambios en la dinámica de la población involucrada • Conflictos con las comunidades involucradas
Impactos en el recurso suelo.	<ul style="list-style-type: none"> • Liberación de contaminantes al aire, incluyendo metales pesados, compuestos orgánicos y dióxido de azufre • Degradación de suelos por la presencia de residuos • Emisión de partículas minerales por los procesos de operación. • Incremento del consumo de energía por los procesos de refinamiento y fundición
Impactos en los recursos hídricos.	<ul style="list-style-type: none"> • Continuas descargas de contaminantes en cuerpos de agua superficiales. • Acumulación de residuos permanentes, cambio de paisaje y forma de suelo.

Fuente: Tomado de Galvez et al., (2018)

2.3 Drenaje ácido de mina

En el trabajo de explotación de yacimientos minerales los sulfuros metálicos, quedan a la intemperie grandes cantidades de roca, que pueden ser meteorizadas por acción de la lluvia y el viento, los cuales al entrar en contacto con suficiente agua y oxígeno permite que se produzca el proceso aerobio de formación de drenaje ácido (Armienta *et al.*, 2012)

De acuerdo con (Dold, 2017), la formación de drenaje ácido generalmente se representa con la oxidación de la pirita (FeS_2), ya que es el mineral más frecuente en la acidificación de aguas superficiales o subterráneas, para llevar a cabo esta reacción requiere oxígeno y agua. Entre otros minerales sulfurados que participan en la formación del DAM se tiene, la esfalerita (ZnS), galena (PbS), calcopirita (CuFeS_2), pirrotita (Fe_7S_8) y arsenopirita (FeAsS) los cuales forman diferentes cantidades de protones de hidrógeno. Como se puede observar en la Tabla 2.2 existen diversos minerales precursores de sulfuros del DAM.

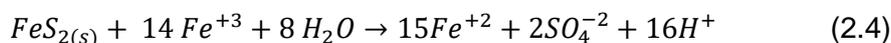
Tabla 2.2 Ejemplos de minerales de sulfuros precursores del DAM

Nombre	Fórmula	Nombre	Fórmula
Cobaltita	CoAsS	Cinabrio	HgS
Calcopirita	CuFeS_2	Violarita	FeNi_2S_4
Calcosina	Cu_2S	Molibdenita	MoS_2
Pirrotita	$\text{Fe}_{(0.8-1.0)}\text{S}$	Millerita	NiS
Rejalgar	AsS	Troilita	FeS
Linneíta	Co_3S_4	Greigita	$(\text{Fe}^{+2} \text{Fe}^{+3})\text{S}_4$
Marcasita	FeS_2	Wurtzita	ZnS
Tennantita	$\text{Cu}_2\text{As}_4\text{S}_{13}$	Estibina	Sb_2S_3

Fuente: Tomado de tomado de Morin y Hutt, (2001)

La disolución de estos elementos está asociada a la cinética y reacciones de equilibrio que puedan producirse según la concentración, tiempo de contacto y tipo de compuesto (Morin y Hutt, 2001).

El proceso de oxidación de la pirita inicia, al estar en contacto con oxígeno y agua produciendo iones de hierro y ácido sulfúrico según la siguiente ecuación, además de la oxidación directa la pirita también puede disolverse y luego oxidarse: (Wang *et al.*, 2021).



Cada mol de pirita oxidada genera dos moles de sulfatos como se muestra en la ecuación (2.1), y dos moles de iones de hidrógeno, la presencia de bacterias de los géneros como *Acidithiobacillus* y *Ferroplasma* y un pH <4.5 aceleran el proceso de oxidación y el hierro contenido precipita como hidróxido de hierro III o en otro mineral de hierro, lo que provoca que se tiña de rojo anaranjado en la superficie, las rocas, los sedimentos y los cuerpos de agua, esta formación de drenaje ácido se definirán según los factores involucrados (Acharya y Kharel, 2020).

Generalmente el oxígeno actúa como oxidante, sin embargo, cuando el drenaje tenga un estado de oxidación avanzada como en la reacción (2.4), el hierro férrico también oxidará a la pirita, siendo ésta más rápido que la reacción con oxígeno, generando más acidez por mol de pirita oxidada. Cabe señalar que su limitante es la cantidad de hierro férrico disuelto producido a condiciones bajas de pH 4.5 o menor (Gilles y Charlene, 2014).

2.4 Características del drenaje ácido de mina

El drenaje ácido de mina está caracterizado por las condiciones geoquímicas del sitio, otras propiedades que definen las características del drenaje ácido son las físicas y químicas (Favas *et al.*, 2016).

Entre las propiedades químicas más importantes destaca el pH, ya que controla la movilidad de los metales y adicionalmente permite clasificar el tipo de DAM, autores como (Aduvire, 1991) proponen la clasificación del drenaje ácido por los valores de pH, que van entre 1 y 4.5 hasta valores neutralizados los cuales contienen altos niveles de sólidos disueltos, así como calcio y magnesio disueltos. Un pH bajo en aguas ácidas, significa generalmente una conductividad eléctrica alta (Acharya y Kharel, 2020).

En la Tabla 2.3 se describen las categorías establecidas de drenaje ácido según el efecto causado por minerales disueltos, revisados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.3 Clasificación del drenaje ácido de mina con base en los efectos del pH

Clasificación	Descripción
Ácido	En esta categoría se encuentran los drenajes tipo I y II caracterizados por tener valores de pH < 6, generados por la oxidación mineral particularmente la oxidación de los sulfuros y metales disueltos. Estos valores están asociados a minas metálicas y de pirita.
Alcalino	Conformados por los drenajes tipo III y IV con pH > 9.0 - 10.0, caracterizados por altos niveles de alcalinidad generados por minerales disueltos como: óxidos, hidróxidos y algunos silicatos. Estos drenajes están asociados a minas de extracción de diamantes, cenizas de combustión de carbón.
Casi neutro	Caracterizados por los drenajes tipo V que se encuentren entre valores de 6.0 < pH < 9.0 - 10.0, cuentan con un bajo a moderado contenido de ión ferroso, caracterizados por tener un bajo contenido de oxígeno.
Otros	Se presenta esta categoría para incluir los drenajes producidos por las actividades productivas en minas de bentonitas, gravas y arcillas.

Fuente: Tomado de Morin y Hutt, (2001).

2.4.1 Concentración de minerales sulfuros y arseniatos

La oxidación de los minerales de sulfuros dependerá de cada tipo de mineral por su estructura cristalina, forma y el estado del mineral en el yacimiento, por ejemplo, la marcasita y pirita framboidal se oxidan más rápido que la pirita cristalina que tenga una menor superficie como la "euhedral" caracterizada por ser de grano grueso. Una elevada concentración de sulfuros se considera una de las características más consistentes en la generación de drenaje ácido durante la oxidación de los minerales de sulfuros, ya que cada mol de pirita produce dos moles de sulfatos (Dold, 2003).

2.5 Factores que influyen en la formación del drenaje ácido de mina (DAM)

Entre los factores que afectan a la formación del DAM se pueden considerar tres categorías: a) factores de generación que incluyen oxígeno, agua y acción bacteriana; b) Factores químicos como la acidez, alcalinidad, tipo de mineral sulfurado y pH. c) Factores físicos como la temperatura, tamaño de partícula, permeabilidad, meteorización hidrológica y condiciones climáticas. En la Tabla 2.4 se describen los factores de interés que intervienen en la generación del DAM (Pat- Espadas, 2018).

Tabla 2.4 Factores que intervienen en el origen del DAM

Factores		Descripción	Referencia
Factores de generación	Agua y oxígeno	El agua, así como el porcentaje de humedad es uno de los factores de formación ya que actúa como medio oxidante y donde pueden desarrollarse las reacciones de transporte.	(Favas <i>et al.</i> , 2012).
		El oxígeno atmosférico es necesario para la oxidación de los sulfuros de hierro y formación de Fe ⁺³ , el DAM en principio se genera en zonas anaerobias y no saturadas de las zonas mineras.	(García, 2013).
Factores de generación	Potencial de óxido – reducción	Las condiciones de óxido reducción afectan a la movilidad y toxicidad de especies como sulfuros y especies de nitrógeno, porque la formación de complejos con ligandos aniónicos y orgánicos puede aumentar la movilidad de ciertas bases y elementos traza.	(Gilles y Charlene, 2014).
Factores físicos	Temperatura	La temperatura puede modificar la actividad metabólica de las bacterias, por ejemplo, la <i>A. ferrooxidans</i> alcanza su punto máximo de actividad en 30 – 35°C	(Downing, 2014).
Factores físicos	Condiciones climáticas	Las variaciones climatológicas, como por ejemplo tormentas estacionales y el tipo de clima pueden influir significativamente en el régimen hidrológico y en el entorno receptor, así también pueden afectar el transporte de los productos de las reacciones de oxidación	(Gilles y Charlene, 2014).

2.6 Neutralización del drenaje ácido de mina

Es un proceso mediante el cual la acidez se amortigua, por el consumo de los protones así el agua resultante tiene un pH cercano al neutro. Cuando los H⁺ liberados por la oxidación de los sulfuros, entran en contacto con los carbonatos, hidróxidos y otros minerales con potencial de neutralización, se propician reacciones que consumen acidez (Cervantes, 2014).

Existen diferentes elementos que promueven la alcalinización del drenaje de mina en la Tabla 2.5 se describen algunos de ellos:

Tabla 2.5 Ejemplos de minerales alcalinos

Compuestos	Fórmula
Carbonatos	Calcita (CaCO_3)
	Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)
	Ankerita Ca (Fe,Mg)
	Magnesita (MgCO_3)
Hidróxidos	Limonita $\text{FeO}(\text{OH})$
Silicatos	Clorita $((\text{MgFe})_3(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{MgFe})_3(\text{OH})_6)$
Arcillas	Montmorillonita $(\text{NaCa})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Fuente: Tomado de Cervantes, (2014).

Cuando las descargas ácidas entran en contacto con el ambiente, están expuestas al tipo de roca del medio provocando una interacción entre ellas. En zonas ricas en rocas que contienen carbonatos se produce una neutralización de pH ácido y se convierte en drenaje alcalino, este proceso es función de la velocidad del contacto en la reacción. En la Tabla 2.6 se describen los compuestos precursores de la neutralización del DAM (Schmiermund y Drozd, 1997).

Tabla 2.6 Descripción de la disolución de compuestos alcalinos.

Proceso	Características	Referencias
Disolución de carbonatos	<ul style="list-style-type: none"> La calcita, dolomita, ankerita o magnesita en condiciones neutras tienden a precipitar y limitar la movilidad de los EPT. La facilidad de neutralización de cada compuesto depende del tamaño de partícula, textura y disposición en la red cristalina. La calcita es el agente neutralizante más común debido a su amplia presencia en ambientes geológicos. 	Lottermoser, (2007).
Disolución de hidróxidos	<ul style="list-style-type: none"> Los hidróxidos, proveen alcalinidad luego del consumo de los carbonatos. Los productos resultantes de la neutralización tienden a precipitar en forma de oxihidróxidos metálicos como ferrihidrita o goethita 	Cervantes, (2014)

Proceso	Características	Referencias
Disolución de silicatos	<ul style="list-style-type: none"> Estos minerales contribuyen a la neutralización del DAM mediante el consumo de iones hidrógeno, y liberación de cationes como Ca, Mg, Fe, Na, K, Si y Al. 	E. Moreno, (2018).

2.7 Factor de determinación de DAM (Potencial ácido/ Potencial neutralizador)

La determinación del potencial de acidez de los residuos mineros se evalúa según el método de cuantificación del potencial de generación ácido base por sus siglas en inglés (ABA) desarrollado por Sobek en 1978 (Karagüzel, Ören, Şahbaz, 2020).

Este método pertenece a los ensayos estáticos que se fundamentan en la evaluación del balance entre el máximo potencial de generación ácida y la capacidad de neutralización (disolución de carbonatos y otros minerales que aportan alcalinidad). Para la ejecución de estos ensayos se consideran los siguientes factores:

- Máximo potencial de producción ácida o potencial de acidez (PA).
- Máxima neutralización potencial o potencial de neutralización (PN).

El objetivo de este procedimiento es determinar si el residuo de mina puede generar acidez y evaluar la calidad de los drenajes (Lin, 2013).

En este estudio se utilizará la prueba estática ya que permite caracterizar la peligrosidad de los jales de acuerdo con su reactividad. Al realizar la determinación, el generador debe registrar el valor del potencial de neutralización (PN) y determinar el potencial de acidez (PA), luego calcular el potencial de neutralización neto (PNN) (SEMARNAT, 2003).

$$PNN = PN/PA$$

En la caracterización de una muestra los sulfatos pueden contribuir a la cuantificación del potencial ácido, sin embargo, éstos sólo generan acidez si se encuentran disueltos (Salas, 2020).

2.7.1 Prueba estática de balance ácido – base

La norma oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 que describe el procedimiento para la caracterización de jales, propone el procedimiento para estimar si los jales son generadores de ácido, a través del método de Prueba Modificada de Balance Ácido Base apoyada en el método de Lawrence (1990). En los diagramas de flujo de las Figuras 2.9, 2.10 y 2.11, se puede observar los diagramas de flujo del procedimiento a seguir para realizar la determinación de la prueba mencionada.

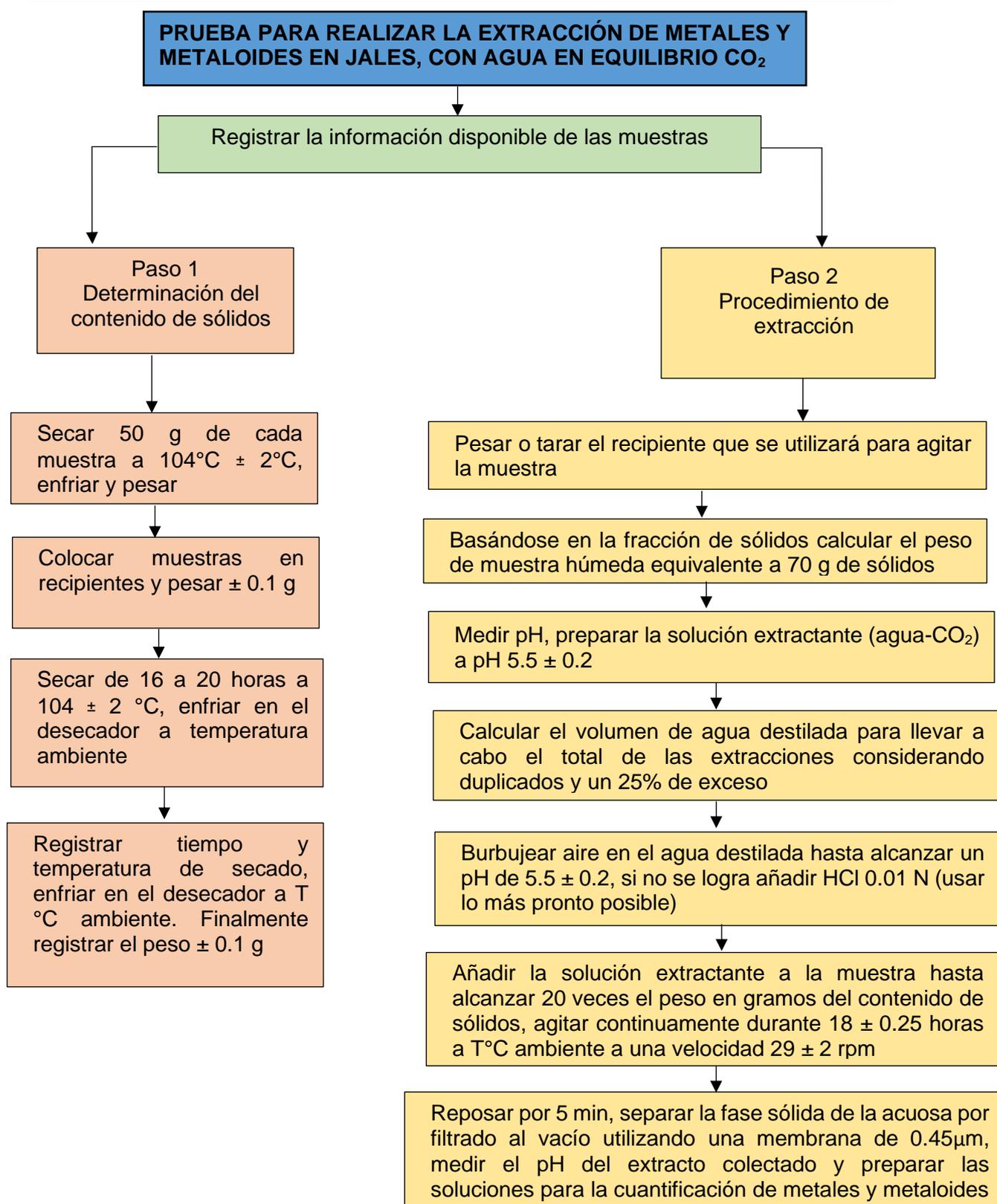


Figura 2.9 Diagrama de extracción de metales y metaloides según la NOM-141-SEMARNAT-2003.

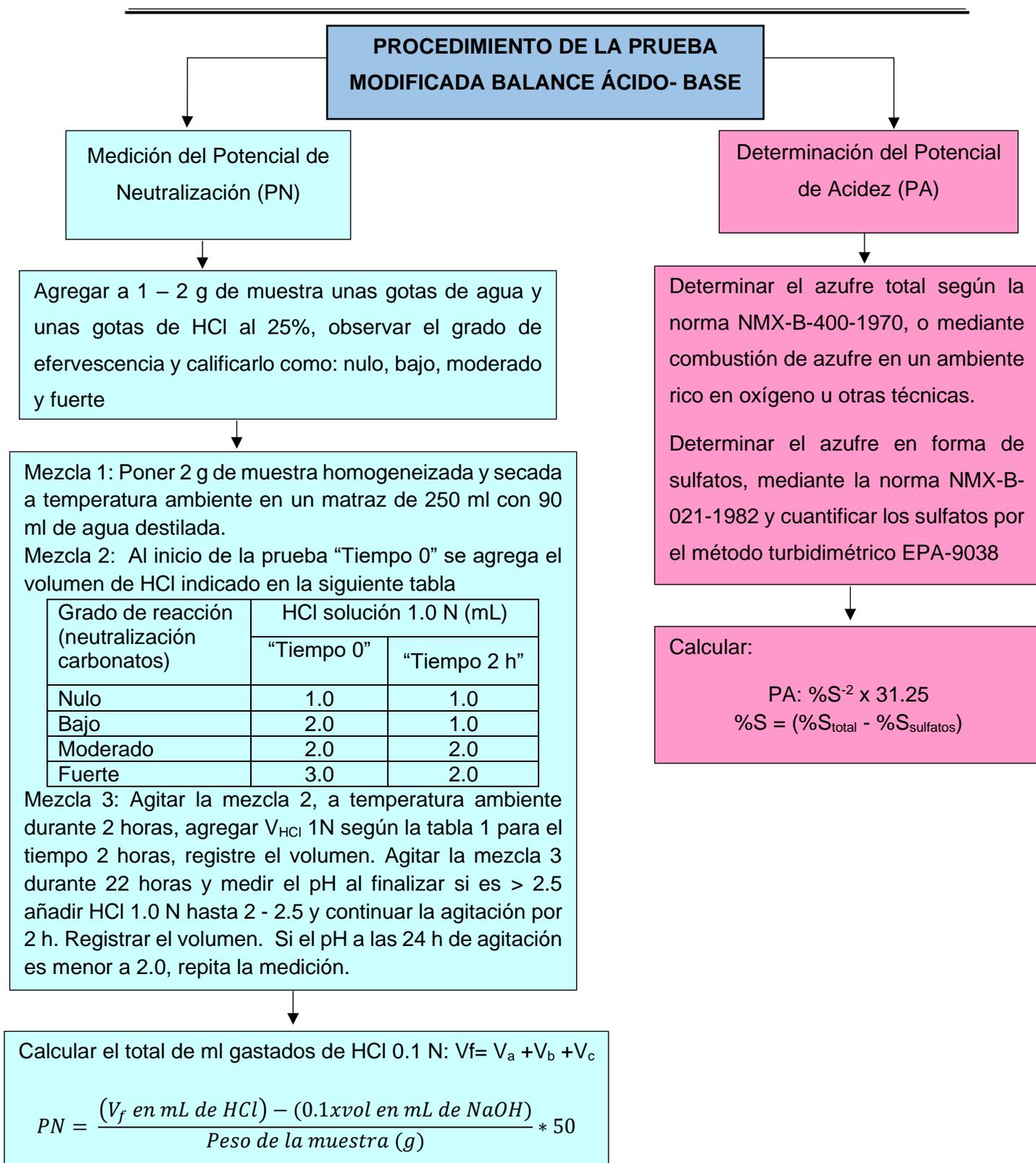


Figura 2.10 Diagrama de flujo del “procedimiento de la prueba modificada de Balance Ácido Base” según la NOM-141-SEMARNAT-2003
Tomado de (SEMARNAT, 2003)

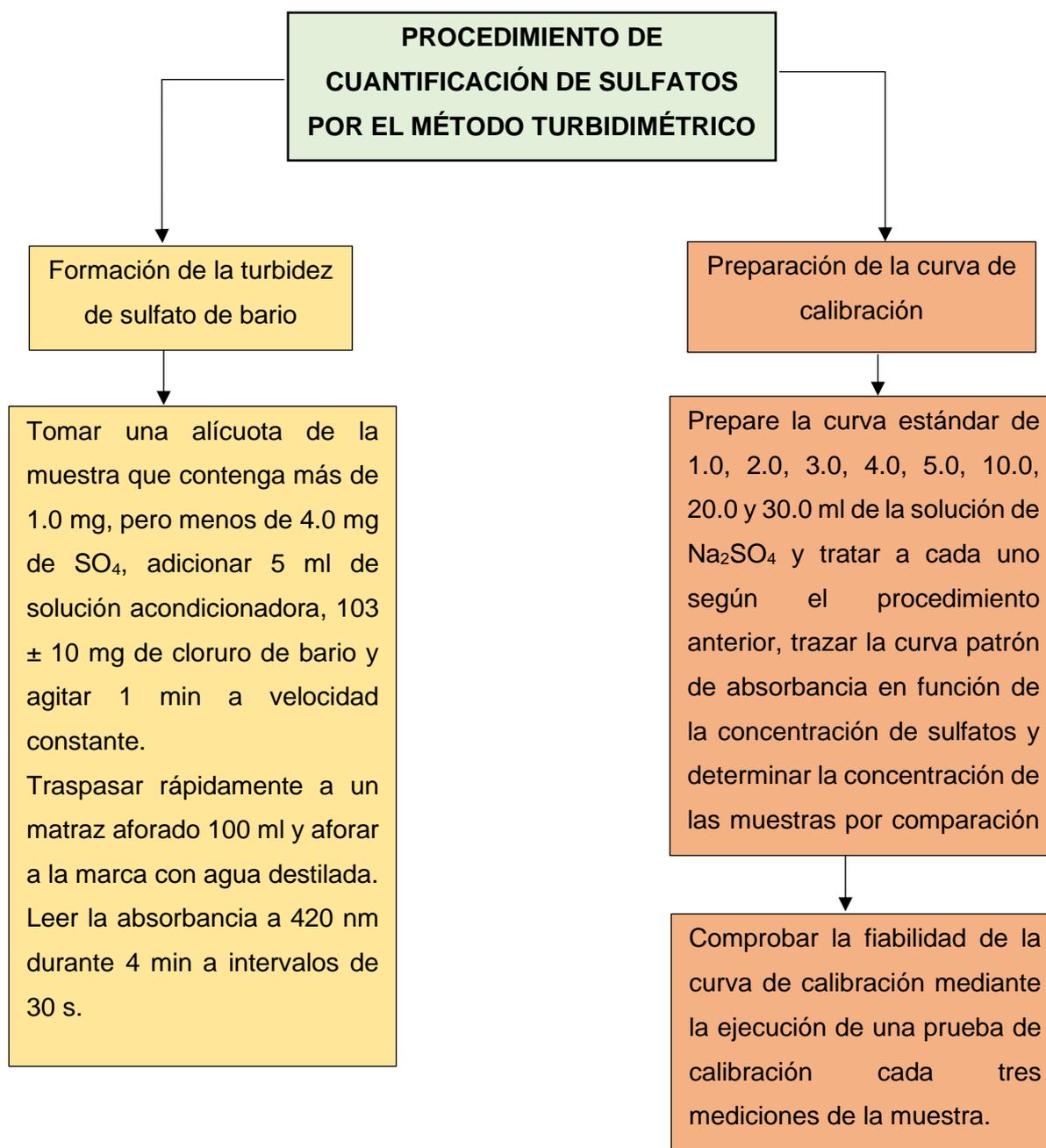


Figura 2.11 Diagrama de flujo del procedimiento de cuantificación de sulfatos por el método turbidimétrico EPA-9038 Modificado de (Galarza, 2017).

2.8 Efectos del drenaje ácido de mina en la salud

El DAM se convierte en un problema, cuando entra en contacto con los ecosistemas y las comunidades cercanas a los sitios mineros abandonados, o no debidamente cerrados. Cuando el DAM caracterizado por valores de pH de 2.9 - 7.8 y valores de conductividad eléctrica de 16.5 – 381 mS cm⁻¹ entra en contacto con el agua subterránea afecta su calidad, y dichas condiciones resultan contraproducentes para la salud (Tomiya *et al.*, 2019).

La exposición a los metales disueltos y biodisponibles en el DAM como As, Cu, Pb y Zn puede darse por la ingesta de alimentos que los contengan, consumir agua con presencia de metales provenientes del drenaje ácido y por encontrarse cerca de sitios que tienen presas de jales sin estabilizar. El riesgo a la salud inicia cuando sus concentraciones superan las propias del sitio de estudio y se encuentran bio accesibles (Fernández-Caliani *et al.*, 2019).

Considerando la exposición, absorción y toxicología, en la Tabla 2.7 se describe la clasificación establecida por el peso de la evidencia para el cáncer del Sistema Integrado de Información del Riesgo, (por sus siglas en inglés, IRIS) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, de efectos en la salud (USEPA, 2014).

Tabla 2.7 Clasificación de carcinogenicidad en sustancias químicas

Grupo	Clasificación	Definición
A	Cancerígeno humano	La evidencia epidemiológica es suficiente
B	Probable cancerígeno humano	B1: la evidencia en humanos es limitada
		B2: la evidencia en humanos es inadecuada pero suficiente en animales
C	Posible cancerígeno humano	La evidencia en humanos es inadecuada y en animales es limitada
D	No clasificable como cancerígeno humano	La evidencia es inadecuada tanto en humanos como en animales, o hay falta de datos
E	El agente es probablemente no cancerígeno para humanos	Evidencia negativa en por lo menos dos estudios en animales o en estudios tanto epidemiológicos como en animales.

Fuente: Tomado de USEPA, (2014)

El plomo es un buen ejemplo de los elementos potencialmente tóxicos presentes en la composición de los jales mineros. La exposición a plomo tiene diferentes efectos en la salud (de zonas mineras) así como de las poblaciones expuestas. En función de las concentraciones de plomos y las vías de exposición serán los efectos, los cuales van desde problemas neurológicos, ceguera, insuficiencia renal, trastornos gastrointestinales (Morman, 2011).

Adicionalmente, el peso de la evidencia lo evalúa como B2 probable carcinógeno para humanos basado en evidencia suficiente de carcinogenicidad en animales, tal y como se observa en la Tabla 2.7 (USEPA, 2004).

El cadmio es otro elemento considerado para la estimación de efectos la salud, catalogado en el grupo B denominado como probables carcinógenos para seres humanos, categoría B1 evidencia limitada de los estudios realizados (Moeng, 2019).

El arsénico es considerado dentro del grupo A de la guía de elementos carcinógenos en la evaluación de riesgos a la salud por la USEPA, se encuentra en la naturaleza principalmente como mineral de arsenopirita. Los síntomas agudos aparecen en un periodo de 3 a 5 días luego de la exposición a concentraciones elevadas los cuales son falta de coordinación, parálisis en animales, ataxia y otros más (Londoño *et al.*, 2016).

Para evitar los efectos antes mencionados de los elementos tratados se establecieron valores de referencia límite de exposición, en la Tabla 2.8 se pueden observar los límites máximos permisibles para agua y suelo según la legislación mexicana vigente.

Tabla 2.8 Valores límites establecidos para plomo, cadmio y arsénico

EPT	NOM-001-SEMARNAT-1996		NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	
	Uso público urbano (mg/L) promedio diario	Protección de vida acuática (mg/L) Promedio diario	Uso agrícola/residencial/comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Pb	0.2	0.2	22	260
Cd	0.2	0.2	37	450
As	0.2	0.2	22	260

Fuente: Tomado de SEMARNAT, (1996) y SEMARNAT, (2014)

A continuación, se presentan los valores establecidos por la USEPA de concentraciones diarias por las vías de exposición estudiadas, en la Tabla 2.9 se puede observar dicha información.

Tabla 2.9 Valores de dosis de exposición de los EPT seleccionados

EPT	Concentraciones de Referencia	
	Inhalación $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Oral (mg/kg -día)
Pb	No evaluado	No Evaluado
Cd	1.8 E-3	5E-3
As	4.3E-3	3E-4

Fuente: Tomado de IRIS, (2022)

2.9 Impacto ambiental del drenaje ácido de mina

Los efectos provocados por el DAM pueden observarse en el recurso hídrico superficial, así como en el suelo. Los valores característicos de este tipo de drenaje demuestran tener altas concentraciones de metales biodisponibles, conductividades eléctricas entre 0,2 y 18 mS/cm, así como valores de pH comprendidos entre 2- 8 y cantidades de especies iónicas libres y metálicas disueltas (Sarmiento, 2014).

Los residuos provenientes de las actividades de extracción, como el material particulado depositado en los cuerpos de agua afecta a las poblaciones locales de peces, y contribuye a la disminución de las poblaciones de macroinvertebrados e invertebrados bentónicos con el aumento de los sólidos en suspensión (Ceto y Mahmud, 2000).

Los volúmenes de rocas que carecen de valor comercial o lixiviado depositados cerca de cuerpos de agua provocan una disminución de su calidad, liberando grandes cantidades de iones metálicos como (Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Cd y Co), provocando el cambio de tipo de uso del recurso, no obstante, existen variaciones estacionales de la concentración de los iones, así como la disminución de la concentración de metales y aumento en la neutralización de la acidez cuando la distancia a la fuente de contaminación aumenta (Alvarenga *et al.*, 2021).

Otro de los efectos ambientales del drenaje ácido de mina es la transferencia de los iones al sedimento, lo que afecta a la biota y genera un impacto visual ya que la presencia de la coloración amarilla producto de la precipitación del hierro produce un efecto estético desagradable, también se puede mencionar que la migración de DAM en las reservas de agua subterránea y en contacto con las bacterias pueden metabolizar el azufre promoviendo el deterioro de la calidad de los ecosistemas (Favas *et al.*, 2016).

Es necesario mencionar que los cambios que puede propiciar el DAM en los ecosistemas fluviales pueden ser perjudiciales para los cultivos que utilicen estos cuerpos de agua, especialmente cuando la dilución no es efectiva ya que puede facilitar la transferencia de elementos potencialmente tóxicos, limitando la cantidad de alimento disponible para consumo, adicionalmente puede propiciar el crecimiento de algunas especies de algas e invertebrados que puedan adaptarse a estas nuevas condiciones ácidas y en ausencia de especies controladoras pueden convertirse en un problema (Favas *et al.*, 2016).

Para conocer parte de los problemas ambientales que existe por la presencia de DAM o residuos de actividad minera, se realizó la siguiente Tabla 2.10 que describe los impactos ambientales sucedidos para su desarrollo se consideró el sitio, recurso involucrado y población afectada. En el caso de no tener determinada la población se utilizó el término ND.

Tabla 2.10 Ejemplos de problemas ambientales

Tipo de mina	Recurso afectado	País	Provincia /Ciudad	Población afectada (hab.)	Afectación	Cita
Mina de carbón con alto contenido de azufre registra media de 5.5%, distribuida en la zona de recarga de agua subterránea.	Agua	Sur Oeste de China	Guizhou	8000	Las concentraciones de sulfatos, flúor y hierro derivadas del vertedero de relaves excedieron las pautas para el agua potable de China y la Organización Mundial de la Salud.	(Ren, 2021)
					Existe un impacto negativo en los acuíferos kársticos especialmente durante la estación seca que se refleja en la contaminación de agua subterránea.	
Minas abandonadas de sulfuro y hierro	Agua	Malasia	Bentong Pahang	ND	En febrero de 2018 se registró valores de pH bajos que revelaron ocurrencia de DAM con presencia de metales como arsénico, zinc y estaño.	(Gunesegeran, 2021)
					El estudio reveló que la calidad del agua es mala y deben tomarse medidas correctivas.	
Mina de carbón	Agua	Región Noreste de Corea	Distrito Dan Chon	Población distrital	Los sedimentos reciben el proceso corrosivo del DAM que se acumula en las presas de jales y permite disolver los metales como el circón y la ilmenita.	(Hyon, 2020)

Tipo de mina	Recurso afectado	País	Provincia /Ciudad	Población afectada (hab.)	Afectación	Cita
Mina de carbón de extracción superficial	Suelo	Nor Este de la India	Jaintia Hills	ND	El suelo de la región es naturalmente ácido, así como el suelo no afectado por la minería que se encuentran en promedio de 4.30 unidades de pH, sin embargo, el efecto del DAM promovió una reducción en 0.51 unidades a 3.79. Se registró un incremento del doble de aluminio intercambiable en referencia con el suelo no contaminado.	(Choudhury, 2017)
Mina cerrada y en proceso de monitoreo de lixiviados	Agua /suelo	Australia	Sunny Corner	ND	De la comparación de datos entre 1979 y 2018 en 2 km aguas abajo del conducto principal de la mina, mostró que la concentración de cobre, zinc y plomo aumentaron hasta el 2007, para el 2018 la concentración de metales en el agua disminuyó, este comportamiento se atribuye a las acciones de remediación realizadas entre 2016 y 2018.	(Kavehei, 2021)
Mina de cobre	Agua	Este de Serbia	Península Balcánica	Población local	Se encontró que el DAM transporta grandes cantidades de elementos río abajo en comparación con las cantidades de estos elementos en el agua del río Pek.	(Adamovic, 2021)
Manganeso	Agua/ Suelo Estuario del Río Doce	Brasil	Samarco	Población local	Se registró un aumento de Mn en los suelos estuarinos del Río Doce y se encontró este metal en los peces, aunque el Manganeso se considera un micronutriente importante para la flora y fauna la concentración en las aguas intersticiales del estuario excede drásticamente las concentraciones necesarias para la función biológica.	(Queiroz, 2021)
Mina de Sulfuro	Suelo	Lisboa	Alentejo	ND	La cuenca se encuentra relativamente estabilizada en la superficie desde el punto de vista de dispersión de metales.	(Ferreira, 2021)

Tipo de mina	Recurso afectado	País	Provincia /Ciudad	Población afectada (hab.)	Afectación	Cita
Mina de sulfuros	Agua	España	Península Ibérica	ND	Los tres cursos de agua que desembocan en el embalse Olivargas están contaminados por DAM procedentes de las minas abandonadas mantienen un pH ácido durante todo el año y concentraciones de Aluminio hasta 291 mg/L y Hierro 150 mg/L. El río Olivargas es la principal fuente de calcio, magnesio, sodio, estroncio y sulfatos al embalse de la presa.	(Galván, 2021)
Minas de sulfuros	suelo	Zambia Central	Kabwe	Población local	El monitoreo regional de la capa superficial del suelo demostró que las emisiones de la fundidora abandonada de Pb-Zn exceden los límites canadienses de calidad del suelo en varios distritos de Kabwe Town. Se demostró una alta accesibilidad gástrica de plomo y cadmio para un niño, considerando un peso de 10 kg.	(Křibek, 2019)

2.1 Legislación Ambiental

A continuación, en la Tabla 2.11, se muestra un resumen de la legislación internacional aplicable para el manejo de los residuos mineros generados de las actividades. Para la revisión se consideraron países con experiencia en la extracción de minerales.

Tabla 2.11 Legislación ambiental aplicable a las actividades mineras

<i>Categoría</i>	<i>Título</i>	<i>País</i>	<i>Títulos</i>	<i>Artículos aplicables</i>	<i>Descripción</i>
Reglamento	Reglamento para la protección ambiental en la actividad minero - metalúrgica	Perú	Calidad del medio ambiente	Art.31, Art 32, Art.34, Art.,36, Art.37,	Los artículos mencionados describen la infraestructura con la que debe contar la concesión de beneficio, el tratamiento que debe realizarse al agua utilizada en el proceso, así como la disposición aplicable para los relaves y residuos generados.
			De las obligaciones de los titulares de la actividad minera	Art.5, Art.6	El reglamento enuncia las responsabilidades de los titulares de la actividad minera, considerándolo responsable por las emisiones, vertimientos y disposición de los desechos al ambiente.
			De la educación y manejo ambiental de la industria minera-metalúrgica	Art.9, Art.16	En esta sección se establece el documento solicitado para el manejo ambiental de la mina considerándolo el Programa de Adecuación y Manejo Ambiental frente al Ministerio de Energía y Minas.
Reglamento	N°4038-94 Aprueba el Reglamento Ambiental para las Actividades de Exploración Minera	Perú	Reglamento ambiental para las actividades de exploración minera	Art.1, Art.7, Art.8, Anexo N°2	El reglamento establece las directrices para obtener los permisos a cada categoría de actividad A, B, C, así como la solicitud de realizar cierres y abandonos adecuados con el ambiente

Categoría	Título	País	Títulos	Artículos aplicables	Descripción
Decreto Supremo	Texto único Ordenado de la Ley General de Minería	Perú	Título Décimo Cuarto Bienestar y Seguridad	Art.206 - Art.218	En esta sección se propone la responsabilidad del titular minero con sus trabajadores de otorgar vivienda en el sitio, asistencia social contar con programas de bienestar, seguridad e higiene según las actividades realizadas.
			Título Décimo Quinto Medio Ambiente	Art.2019- Art.226	Se propone la no afectación a las áreas naturales protegidas, solicita los documentos para obtener la licencia por parte de la autoridad, así como las condiciones de operación y manejo de recursos naturales.
Ley	Ley de Catastro Minero Nacional	Perú	Ley de Catastro Minero Nacional	Art.11o, Art.2o,	Establece los criterios para conceder los permisos para las operaciones mineras, es necesario mencionar que propone que los derechos mineros formulados en legislaciones anteriores cuyos vértices adquieran coordenadas UTM serán respetados.
Ley	18248 código de Minería	Chile	Título I. Del dominio del Estado y de los Derechos Mineros	Art. 1, Art.2,	En esta ley se propone al estado como el propietario absoluto e inalienable de todas las minas.
Ley	19300 bases Generales del Medio Ambiente	Chile	Título I. Disposiciones Generales	Art.10	Esta sección especifica la necesidad de todo proyecto susceptible de causar impacto ambiental en cualquier fase debe someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental.

Categoría	Título	País	Títulos	Artículos aplicables	Descripción
Ley	20551 regula el cierre de faenas e instalaciones mineras	Chile	Título I. Disposiciones Generales Título II: Autoridad competente	Art.4, Art.5, Art.6,	Esta ley establece todos los requisitos para realizar el cierre de minas de forma adecuada, presentando los documentos necesarios a la autoridad competente, así como la evaluación periódica del cierre y sanciones en caso de no ejecutar lo indicado en el documento presentado.
Ley	20920 Marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje	Chile	Título III. De la responsabilidad extendida del productor	Art.9, Art.10, Art.11, Art.13,	Especifica las responsabilidades del productor en cuanto a la gestión de los residuos, desde las regulaciones ambientales que deben obtener hasta las metas de recolección y valorización, así como otras obligaciones asociadas.
Ley	Ley Canadiense de protección ambiental (Canadian Environmental Protection Act, CEPA)	Canadá	Plan de gestión de los productos químicos	12 secciones	En esta ley se establecen las herramientas, poderes y funciones para la gestión de los residuos y acciones a tomar ante emergencias ambientales.
Ley	Ley de Impacto Ambiental, 2012 (Canadian Environmental Assessment Act, CEAA)	Canadá	Registro de impacto ambiental en Canadá	Art.78, Art.79	En esta ley se proponen y facilitan el acceso público a la información ambiental, así como establece la autoridad competente para llevar a cabo la evaluación de los proyectos habilitados.
Ley	Ley de Pesca (Fisheries Act)	Canadá	Protección de los hábitats de pesca y prevención de la contaminación	Art.34	Propone las prácticas que pueden realizarse periodos de tiempos establecidos, así como códigos de acción para descargas.

De la revisión realizada se observó que cada país primero busca establecer valores aceptables de los minerales extraídos que pueden ser descargados o emitidos al ambiente, adicionalmente proponen procesos de obtención de permisos para realizar

actividades productivas con lineamientos que minimicen su impacto en el ambiente a continuación se describe la legislación nacional considerada.

2.1.1 Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos

Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de febrero de 1917, reformada por última vez DOF-24-12-2020, declara en su artículo 4to el derecho de toda persona vivir en un ambiente sano para su desarrollo y bienestar. Además, propone al Estado como garante del respeto de este derecho. En el artículo 73, sección XXV entrega la facultad al Congreso de legislar en toda la República en hidrocarburos, minería, sustancias químicas, etc., (DOF, 2020).

2.1.2 Ley Orgánica de la Administración Pública Federal

Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de diciembre de 1976, reformada por última vez DOF 11-01-2021 promulga en su artículo 32 Bis, sección IV que la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales tiene como responsabilidad proponer en trabajo conjunto con otras dependencias y autoridades estatales y municipales, normas oficiales en temas de preservación y restauración del ambiente, ecosistemas naturales y de flora y fauna silvestre, terrestre y acuática en materia de minería, residuos peligrosos, materiales peligrosos para la interpretación y aplicación de las normas oficiales mexicanas (Portillo, 2014).

2.1.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988, última vez reformada DOF 04-06-2012 determina en el artículo 134, sección V que en suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos debe ejecutarse acciones de recuperación para que puedan ser utilizados en cualquier actividad.

En la sección IV Regulación Ambiental de los asentamientos humanos en el artículo 23 la planeación del desarrollo urbano y la vivienda se establecerán en zonas que no representen riesgos o daños a la salud de la población (DOF, 2013).

El análisis de riesgo se basa técnica y legalmente en la LGEEPA en el título Primero “Disposiciones Generales” según los Capítulos I y II, “Normas Preliminares” y “Distribución de Competencias y Coordinación”, también en el Capítulo IV “Instrumentos de la Política Ambiental” – sección Evaluación del Impacto Ambiental – y el Título Cuarto “Protección al Ambiente” del capítulo V “Actividades Consideradas como Altamente Riesgosas” en los artículos 1, 5, 30, 145, 146, 147 (DOF, 2000).

2.1.2 Ley Minera

Publicada en el Diario oficial de la Federación el 26 de junio de 1992, última vez reformado DOF-11-08-2014 en el artículo 37 solicita a las personas que beneficien minerales están sujetos a cumplir las disposiciones generales y normas oficiales aplicables a la industria minero – metalúrgica en materia de seguridad y del equilibrio ecológico y protección al ambiente (DOF, 2000).

2.1.3 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)

Publicada en el Diario Oficial el miércoles 8 de octubre de 2003 emitida por la secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, describe el artículo 17 que los residuos de la industria minero – metalúrgica tales como jales, residuos de los patios de lixiviación abandonados pueden disponerse finalmente en el sitio de su generación; su peligrosidad y manejo integral, se determinará según las normas oficiales mexicanas (PROFEPA, 2015).

2.1.1 Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003

Define los criterios técnicos para poder determinar la peligrosidad de los jales mineros, lo cual consiste en realizar una prueba de extracción de los metales y metaloides regulados en la NOM-052-SEMARNAT-1993 mediante métodos de “Espectroscopia de emisión atómica inductivamente acoplada a plasma” y “métodos de absorción atómica”.

Luego de determinar estos constituyentes se aplica la prueba de Balance Ácido- Base para jales que contienen sulfuros de metales, los resultados del análisis permiten determinar si la muestra es generadora o no de DAM (DOF, 2013).

2.1.1 Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

Esta norma establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Las especificaciones propuestas para áreas menores o iguales a 1000 m² indican que se procede a remediar a las concentraciones de referencia totales (CR_T) determinadas en la tabla 1 o a seguir cualquiera de las metodologías descritas (SEMARNAT, 2007).

2.1.2 Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005

En esta norma se enlistan los residuos peligrosos por fuente específica y no específica, permite determinar si los compuestos de los jales mineros son peligrosos para los individuos expuestos (Semarnat, 2005).

2.1.3 Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009

En esta norma en el punto 5.4.2 se describen las consideraciones para caracterizar el residuo, en donde especifica que cuando existan normas oficiales mexicanas específicas para la caracterización de un residuo, dichas prueba se deben realizar según detalle en cada una.

Según sea el caso en el residuo, se debe determinar las concentraciones totales (base seca) de los elementos incluidos en el cuadro 2 de la norma como antimonio, arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, mercurio, plata, plomo y selenio. La movilidad de los metales y metaloides presentes en el residuo. El potencial de generación de drenaje ácido, pH de la disolución del residuo en agua (Semarnat, 2011).

2.1.4 Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental

Fracción IX, de la inspección, medidas de seguridad y sanciones artículo 57, en materia de evaluación de impacto ambiental para acciones y obras que requieran someterse a un procedimiento de evaluación ambiental artículo 17, artículo 18 y artículo 19 que manifiestan los permisos que el promovente debe presentar a la autoridad ambiental cuando las actividades que se vayan a realizar se consideren altamente riesgosas.

2.2 Metodología de estimación del riesgo desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental

Las metodologías de evaluación de riesgos de sitios contaminados surgieron en la década de 1970 a 1980 cuando sucedieron eventos que tuvieron impacto social y ambiental, como fue el caso de la bahía de Minamata en Japón o “Love Canal” en los Estados Unidos de América, y se vio la necesidad de implementar un procedimiento que permita predecir y estimar cuantitativamente los daños e impactos a los ecosistemas y salud resultante de la exposición, en la Figura 2.12 se presenta el diagrama que describe la historia de la evaluación de riesgo.

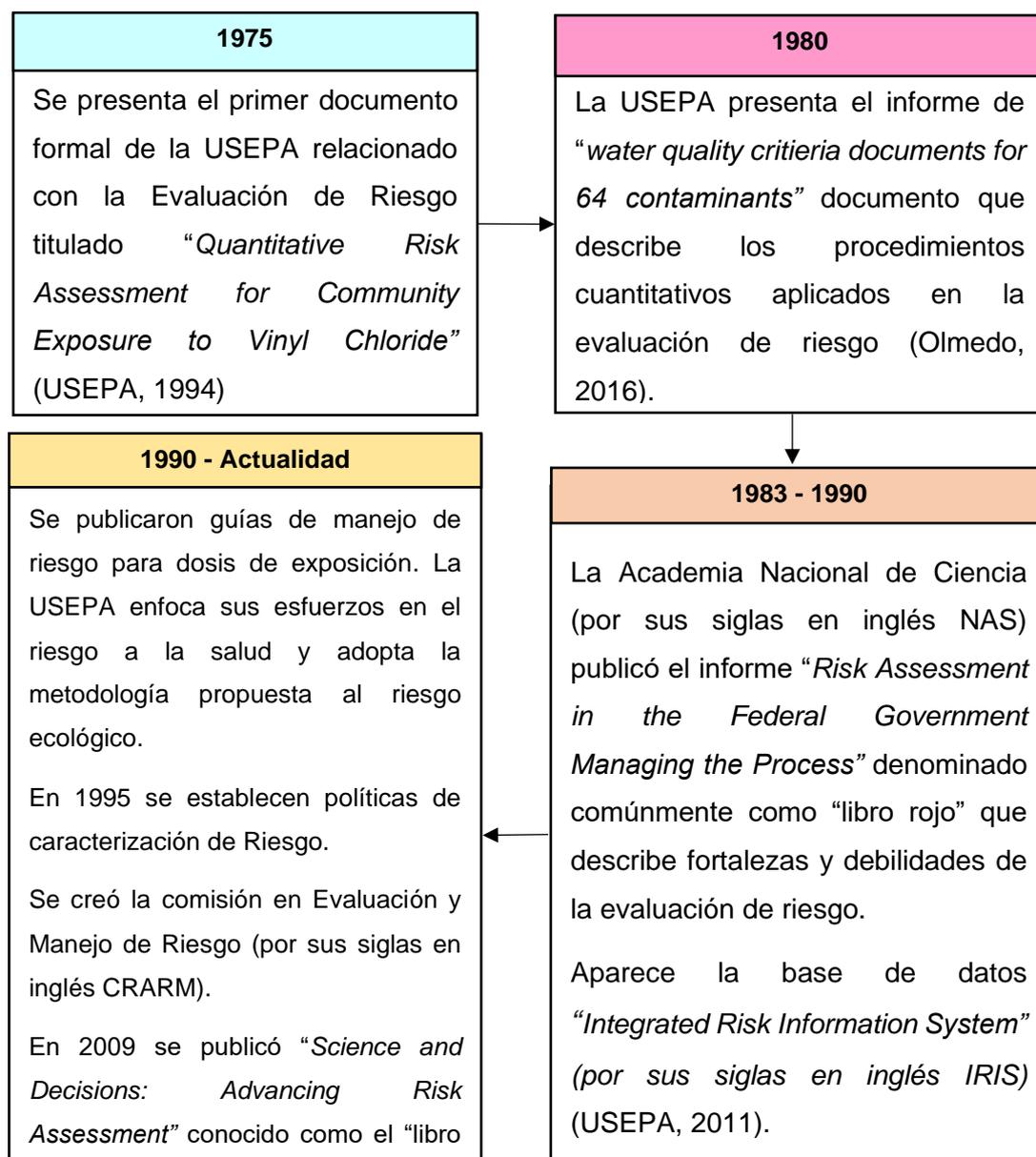


Figura 2.12 Diagrama de evolución de la evaluación y gestión de riesgo desarrollado por la USEPA, (2011)
(elaboración propia)

La metodología de evaluación de riesgo definida por la USEPA se divide en cuatro etapas, parte de la identificación del peligro que consiste en un proceso de determinación de si un compuesto químico en particular se encuentra relacionado causalmente a efectos de salud particulares como por ejemplo cáncer o defectos al nacer, esto se realiza mediante la revisión de los datos epidemiológicos y/o toxicológicos disponibles (Ornelas *et al.*, 2007).

Los sujetos pueden estar expuestos al contaminante por vía dérmica, digestiva o de inhalación, el transporte de dicha sustancia a través del cuerpo puede ser por absorción, distribución, metabolismo y excreción (Lee *et al.*, 2005).

Los compuestos que pueden resultar cancerígenos se determinan según los estudios epidemiológicos, catalogados como descriptores del peso de la evidencia, los cuales se encuentran en la base de datos Sistema Integrado de la Gestión de Riesgos, (por sus siglas en inglés IRIS) (USEPA y IRIS, 2003).

El siguiente paso es la evaluación de la dosis – respuesta, en este punto se caracteriza la relación entre la dosis del agente estudiado y la incidencia de un efecto negativo en la salud. Se determina un valor de toxicidad crónica, según el tiempo de exposición del organismo. Para fines de cálculo se establecieron factores de exposición recomendados, cuya última actualización se realizó en 2014 (Alvarenga *et al.*, 2012).

El último paso, la caracterización del riesgo examina la efectividad del respaldo de la investigación con los resultados. La metodología general de la estimación de riesgo se observa en la Figura 2.13.

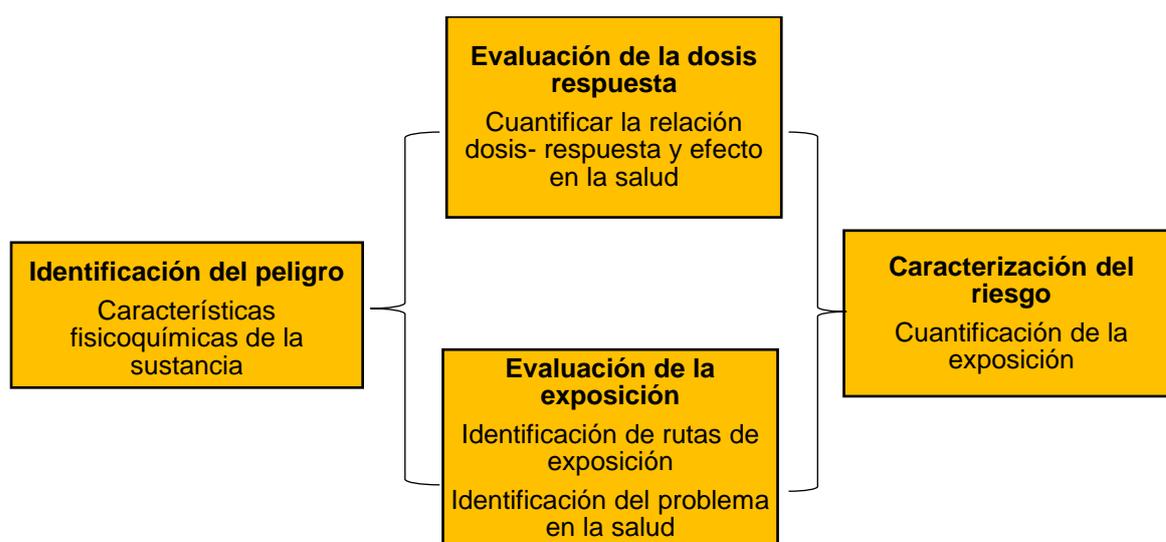


Figura 2.13 Metodología de evaluación de riesgo a la salud

Tomado de la USEPA, (2000)

2.2.1 Evaluación de la exposición

La determinación de la exposición de un receptor a un contaminante suele expresarse en términos de dosis/ingesta, a través de cada una de las vías de exposición. Según el escenario aplicado para estimar este valor se consideran las siguientes variables (Kaifer y Aguilar, 2006)

En la Tabla 2.12 se puede observar la nomenclatura asignada a las variables utilizadas en la metodología.

Tabla 2.12 Factores de exposición utilizados para los receptores

Parámetro		Escenario	
		Agrícola	Industrial
EF	Frecuencia de exposición (días/año)	350	250
ED	Duración de la exposición (años) Adultos	Adultos: 24	Adultos: 25
		Niños: 6	Niños: 0
IR_{suelo}	Velocidad de Ingestión *	Adultos: 100	Adultos: 100
		Niños: 200	Niños: 0
FI	Fracción ingerida*	1	1
BW	Peso Corporal Adultos (Kg)	80	80
BW	Peso Corporal niños (Kg)	15	15
LT	Tiempo de vida (años)	70	70
SA	Adultos área expuesta (m ² /día)	0.316	0.53
AF	Factor de Adherencia (mg/cm ²)	1	1

*Adimensional

Fuente: tomado de (USEPA, 2014)

2.2.2 Caracterización del riesgo

La caracterización integra los pasos anteriores para estimar un valor de riesgo, dicho proceso es específico si las sustancias son carcinógenos o no carcinógenos. El riesgo general para los agentes no carcinógenos utiliza el índice de peligro según la siguiente ecuación general (USEPA, 1991).

$$HQ = \frac{\text{Ingesta o dosis diaria crónica (CDI)}}{\text{Dosis de referencia (RfD)}} \quad (2.5)$$

La estimación de riesgos para sustancias cancerígenas describe la probabilidad de que el individuo desarrolle cáncer en un punto de su vida debido a la exposición al elemento de interés, viene representado por la siguiente ecuación general (Olmedo, 2016).

$$\text{Riesgo} = \text{Ingesta o dosis diaria crónica (CDI)} \times \text{Factor de pendiente (SF)} \quad (2.6)$$

$$\text{Riesgo} = \text{CDI} \left[\frac{\text{mg}}{\text{Kg-día}} \right] * \text{SF} \left[\frac{\text{mg}}{\text{kg-día}} \right] \quad (2.7)$$

2.3 Evaluación del riesgo ecológico

La evaluación de riesgo ecológico es un método desarrollado para estimar el grado de afectación de la exposición a elementos potencialmente tóxicos a los ecosistemas, fauna y flora. Es una herramienta útil para poder establecer programas de protección, bases de clasificación, priorización de riesgos y finalmente dar apoyo para la toma de decisiones en la gestión ambiental (Wu, 2021).

Existen diferentes técnicas para la evaluación del riesgo, como son la distribución de la sensibilidad de especies (SSD), determinación del coeficiente de peligro por sus siglas en inglés Hazard Quotient (HQ), estudios de observación en campo como encuestas, calificaciones categóricas, comparaciones de exposición y efectos de un solo punto, incorporación de la variabilidad en la estimación de exposición y/o efectos así como modelos de proceso basados parcial o totalmente en aproximaciones teóricas. En la Figura 2.14 se puede observar la metodología general para el manejo del riesgo ecológico. (Manan *et al.*, 2021).

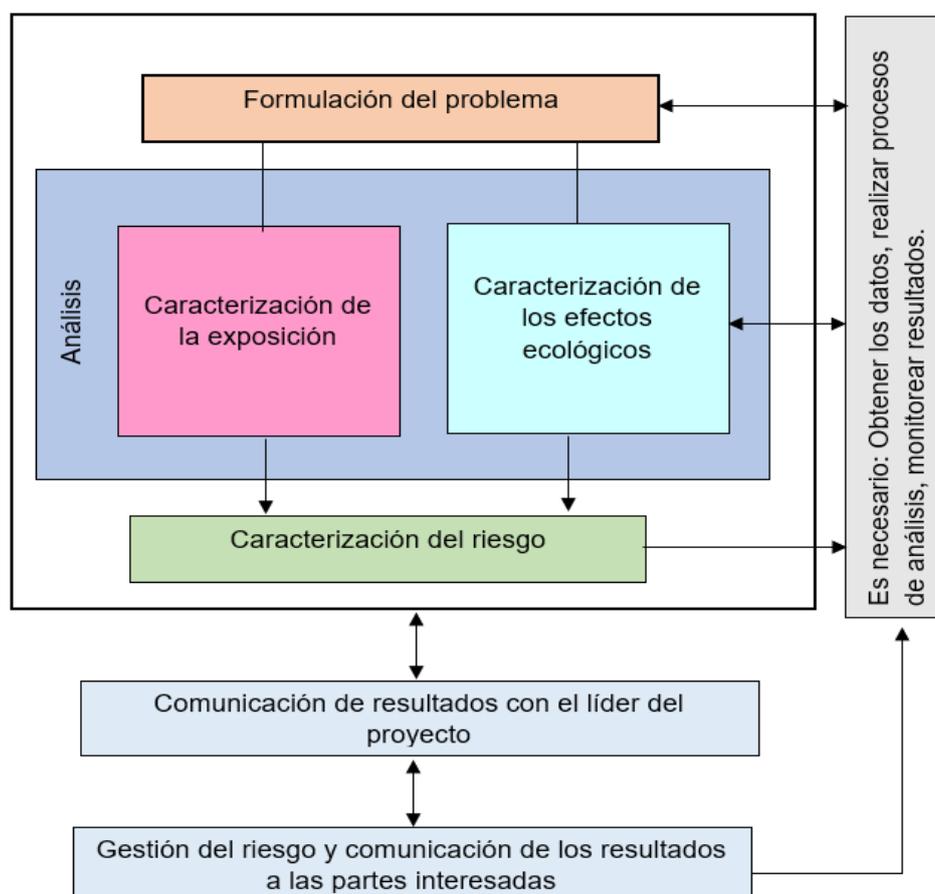


Figura 2.14 Esquema de la metodología general del manejo de riesgo ecológico, Tomado de Norton *et al.*, (1992)

La metodología consiste en la definición del problema, los criterios para la formulación del problema se basan en la relevancia ecológica del sitio, susceptibilidad a factores de estrés, potenciales factores, y relevancia en los objetivos de manejo (Marcomini *et al.*, 2009).

La siguiente etapa, el análisis se basa en la determinación de la relación que existe entre la exposición que abarca la liberación del agente físico, químico o biológico desde la fuente de origen hasta la interacción con el ecosistema o alguno de sus componentes y efectos del factor de estrés (Lu, 2021).

Finalmente en la caracterización del riesgo ambiental pueden seleccionarse diferentes métodos o indicadores como el indicador de vulnerabilidad ambiental (EVI) basado en la determinación del riesgo, o el índice de riesgo ambiental utilizado el análisis de riesgo por agroquímicos (Alister y Kogan, 2006).

2.4 Software para la evaluación del riesgo

Los paquetes computacionales disponibles son diversos, algunos evalúan el riesgo a la salud y otros programas evalúan el riesgo ecológico existen una gran variedad como RBCA: Acción correctiva basada en riesgos, REC: Reducción de riesgos, Mérito ambiental, Costos, EVS-PRO: Sistema de visualización ambiental, DQO-PRO, BIOSCREEN, HerRisk, entre otros. La mayoría de estos programas son aplicaciones comerciales, sin embargo, existen programas de libre acceso como el caso de SADA (Yépez, 2021).

2.4.1 SADA

Programa desarrollado y distribuido en 2009 por la Universidad de Tennessee Knoxville, denominado Análisis Espacial y Asistencia para la Toma de Decisiones (por sus siglas en inglés, SADA) permite la evaluación del riesgo a la salud humana y riesgo ecológico. El programa fue financiado por la USEPA y el Departamento de energía de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés, USDOE). Este programa se desarrolló durante más de una década con el lanzamiento más reciente (Versión 5.0.78) (Stewart y Purucker, 2011).

El software del programa realiza la recolección de información- parámetros – análisis y genera resultados. Integrando diferentes herramientas como se ven a continuación (Neris *et al.*, 2019) :

- Diseño de muestreo.
- GIS.
- Estadística

- Diseño de modelado espacial.
- Evaluación de riesgo.
- Diseño de remediación
- Análisis de costo/beneficio.

En la Figura 2.15 se presentan los componentes primarios de la interfaz gráfica del usuario, de los pasos a seguir para llegar a la toma de decisiones (Stezar *et al.*, 2013).

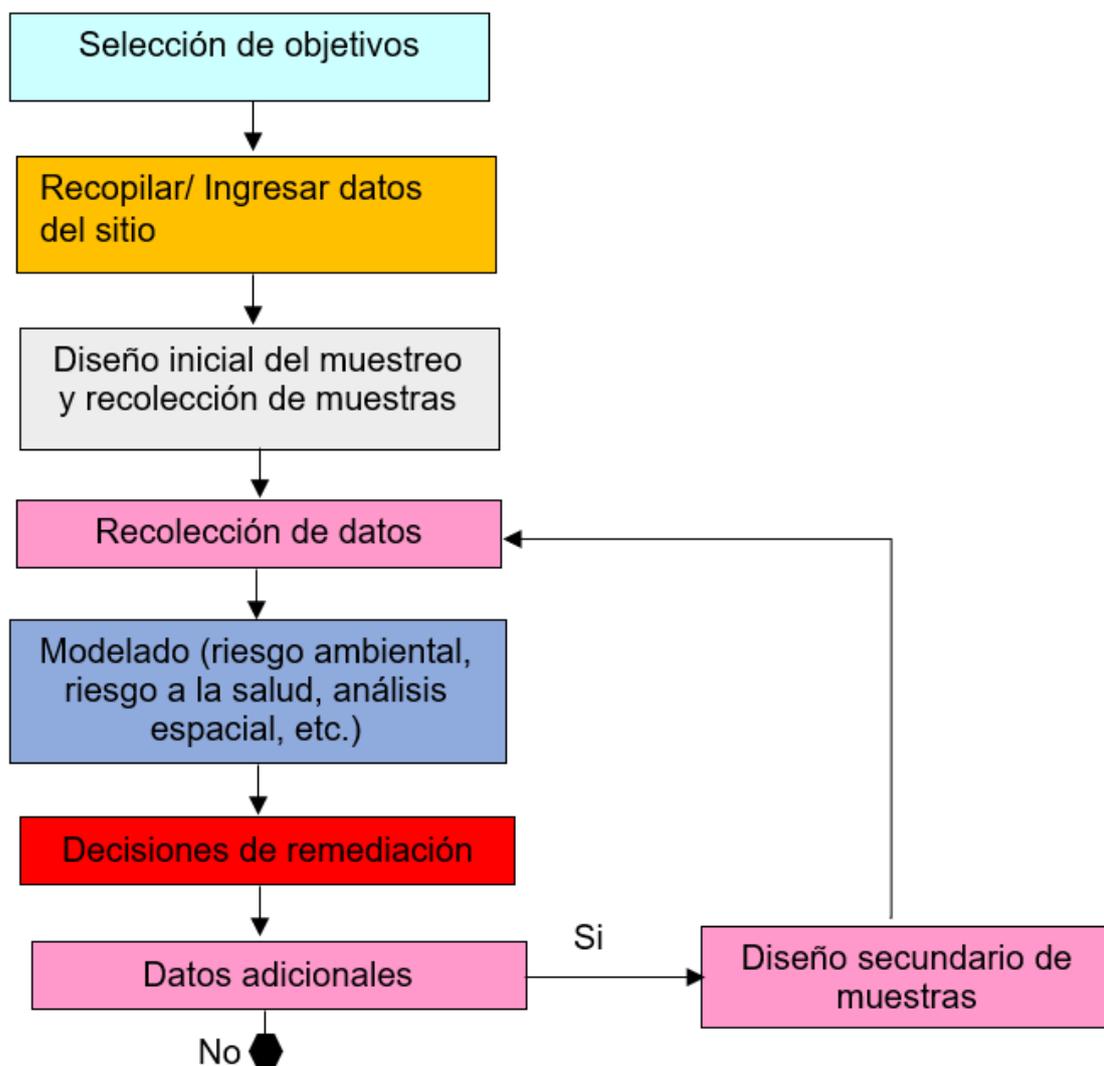


Figura 2.15 Interfaz del programa SADA.
Tomado de R. N. Stewart y Purucker, (2006)

A continuación en la Figura 2.16 se presenta las características del software para poder iniciar el trabajo así como las limitaciones que presenta para el riesgo a la salud, para realizar la gestión de los datos SADA se requiere importar la información analítica de laboratorio según las extensiones permitidas por el programa, como Microsoft Excel

(.exe), archivo Microsoft Access, formato SIG shapefiles (.shp), Data Exchange format (.dxf), también pueden utilizarse imágenes fotográficas (Stewart y Purucker, 2011).



Figura 2.16 Interfaz del programa SADA de riesgo a la salud.
Tomado de Guadarrama, (2019)

El SADA contiene una de las bases de datos más completas y proporciona parámetros de exposición por defecto para más de 20 especies comúnmente encontradas en América del Norte. Las especies pueden parametrizarse para machos, hembras y juveniles. En la Figura 2.17 pueden observarse los requisitos del módulo.

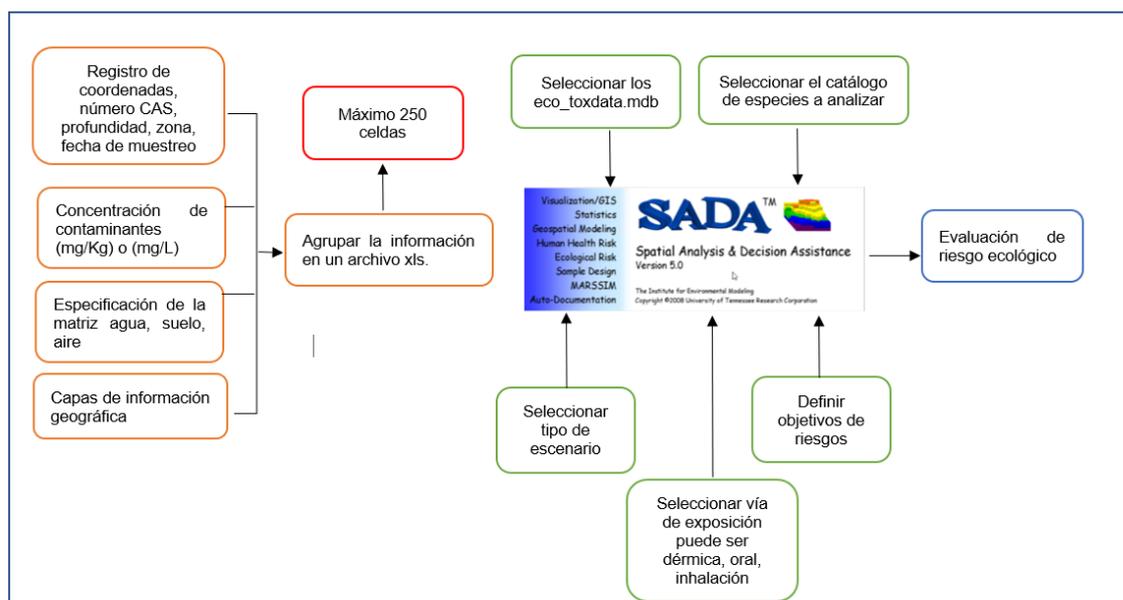


Figura 2.17 Interfaz del programa de riesgo ecológico SADA
Tomado de Guadarrama, (2019)

2.5 Riesgo ecológico y a la salud por exposición a elementos potencialmente tóxicos

La contaminación del suelo por elementos potencialmente tóxicos es un problema en su mayoría derivado por las actividades humanas ya que se alteran los ciclos geoquímicos, entonces se convierten en contaminantes por: a) alteración de las tasas de generación a través de ciclos artificiales. b) Transferencia de material desde las minas a ubicaciones aleatorias. c) Su concentración en los residuos mineros son generalmente más altas que en el suelo (Duarte, 2013).

Cabe señalar que las concentraciones naturales de los elementos potencialmente tóxicos en el suelo dependen de la composición de los minerales primarios, así como la presencia de formas solubles y activas de estos, en la Tabla 2.13 se puede observar que existe concentraciones naturales por encima de las concentraciones normadas (Covarrubias y Peña Cabriales, 2017).

Tabla 2.13 Concentraciones de EPT en diferentes tipos de roca

Tipo de roca	Cu	Zn	Cd	Pb	Mn	As
	-----(mg/kg^1) -----					
Ultramáficas	10 - 140	40 - 60	0.03 - 0.05	0.1- 1	850- 1500	0.5 -1
Máficas	60 - 120	80- 120	0.13 - 0.22	3- 8	1200 -2000	0.6 -20
Intermedias	15 - 80	40- 100	0.13	12.15	500- 1200	1 - 2.5
Ácidas	10 - 30	40 - 60	0.09- 0.2	15- 24	350 -600	1 -2.6
Ácidas (volcánicas)	5 - 20	40- 100	0.05 -0.2	1- 20	600- 1200	1.5 -2.5
Lutita	40	80 -120	0.22- 0.3	18- 25	500- 850	4.3 -4.8
Arenisca	5 - 30	15 - 30	0.05	5- 10	100- 500	1 -1.2
Calcita, dolomita	2 - 10	10 - 25	0.035	3- 10	200- 1000	1 -2.4

Fuente: Tomado de Covarrubias y Peña Cabriales, (2017)

Los mecanismos de acción en la salud de los elementos potencialmente tóxicos, se puede apreciar a nivel molecular, uno de ellos consiste en el bloqueo de grupos funcionales esenciales como por el ejemplo el Ca^{+2} en el caso del plomo que interfiere con su metabolismo, reemplazándolo y comportándose como un segundo mensajero intracelular afectando su distribución dentro de la célula, en la siguiente Tabla 2.14 se presenta las posibles consecuencias a la salud por exposición a los elementos como Pb, Cd y AS (Marteles *et al.*, 2007).

Tabla 2.14 Consecuencias a la salud por EPT.

Elemento	Características	Efectos en la salud	Referencias
Plomo	<p>Metal blando de color grisáceo plateado Temperatura de fundición 327.5°C. Proviene de diversas fuentes naturales como desgastes geológicos o emisiones volcánicas En la naturaleza, se encuentra asociado a compuestos como: galena (PbS), cerrusita (PbCO₃) o anglesita (PbSO₄). En las menas el plomo se encuentra mezclado con otros minerales como el zinc, cobre, plata, cadmio u oro</p>	<p>Tiende a acumularse en horizontes no contaminados y con alto contenido de materia orgánica, incide sobre la actividad microbiana en la mineralización del nitrógeno.</p>	(Zúñiga, 2019).
		<p>Puede causar anemia por la combinación del plomo con los eritrocitos y produce alteración en la síntesis de proteínas</p>	
		<p>Si la exposición es continua Ataca al cerebro y al sistema nervioso central, provoca coma, convulsiones e incluso la muerte</p>	(Iglesias, 2009).
Cadmio	<p>El cadmio no es un elemento abundante en la naturaleza se encuentra en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En los jales se puede asociar con la esfalerita (ZnS).</p>	<p>Este elemento no se degrada en el ambiente solo cambia su forma entonces algunas de estas pueden disolverse en el agua y adherirse a las partículas de suelo</p>	(Zúñiga, 2019).
		<p>La exposición prolongada al cadmio afecta los riñones y posiblemente genera enfermedades renales Exposiciones a corto plazo pueden causar daños en los pulmones y fragilidad en los huesos</p>	(ATSDR, 2008).
		<p>Aparición de trastornos gastrointestinales tras la ingestión.</p>	(WHO, 1980)
Arsénico	<p>Metaloide calcófilo que mantiene dos estados de oxidación, se encuentra de manera natural por el desgaste del material geológico Las principales fuentes de arsénico son la pirita y arsenopirita, en el ambiente se encuentra en forma de arseniatos (60%) sulfuros y sulfosales (20%) así como arseniuro, arsenitos, óxidos, aleaciones y polimorfos de arsénico elemental</p>	<p>En su forma inorgánica es altamente tóxico y su exposición prolongada puede causar cáncer y lesiones cutáneas</p>	(Vallejo, 2015)
		<p>Exposición prolongada puede provocar neurotoxicidad, enfermedades pulmonares y cardiovasculares, influencia negativa en el desarrollo cognitivo</p>	(WHO, 2018)

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos específicos planteados en este trabajo, a continuación, en la Figura 3.1, se presenta el diagrama de flujo utilizado en el desarrollo de la metodología:

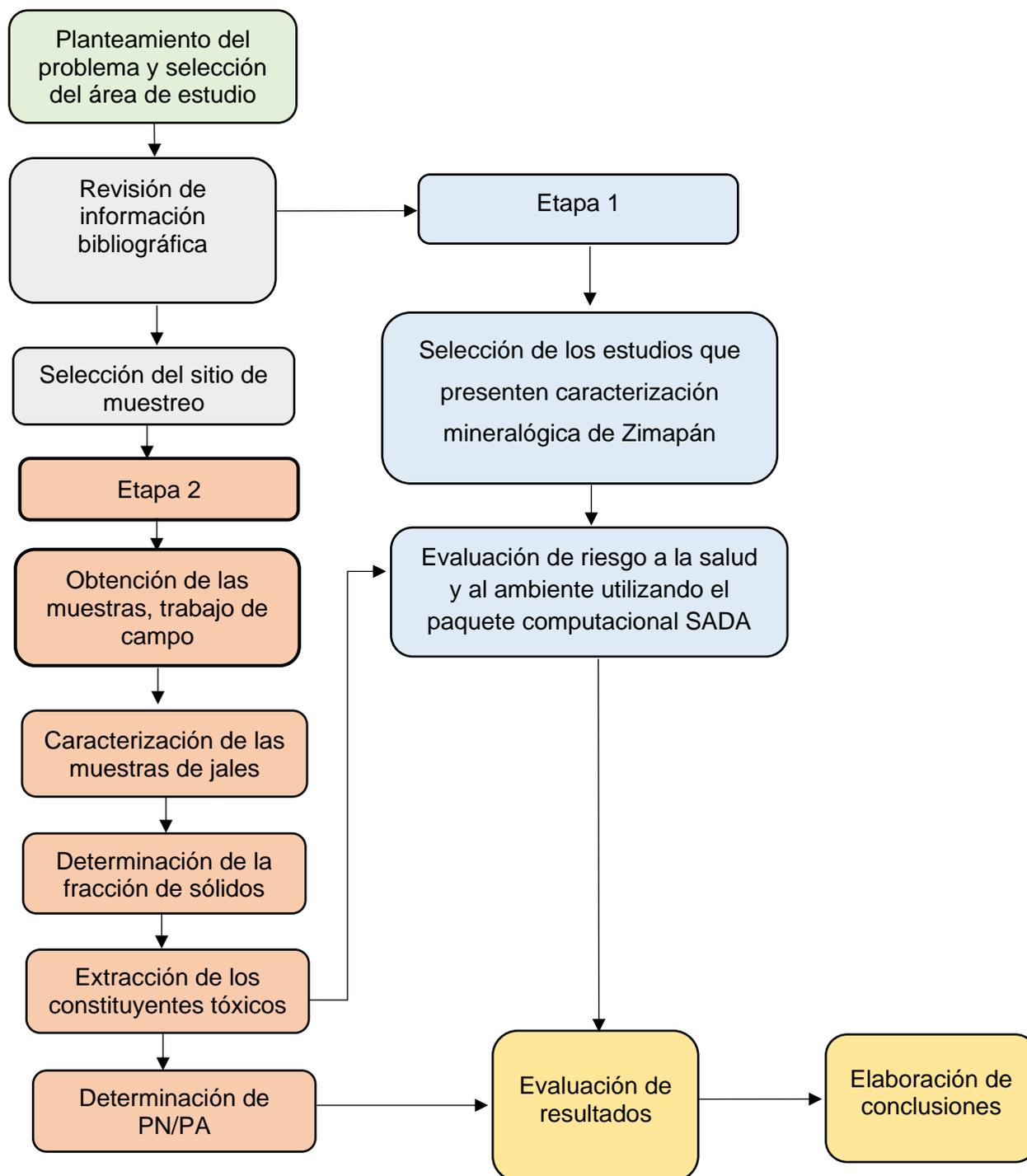


Figura 3.1 Diagrama de flujo general de la metodología de este estudio.

3.1 Revisión bibliográfica

Inicialmente se realizó una investigación documental que incluyó conceptos aplicados al tema, legislación mexicana e internacional alusiva a jales mineros, paquetes computacionales de evaluación de riesgos a la salud y al ambiente. Luego de este proceso, se seleccionaron trabajos previos con disponibilidad de caracterización de jales y finalmente se trabajó en el laboratorio con la muestra de jale proporcionada por la UAEH denominada zona 3.

3.2 Selección de sitios de trabajo

Luego de la investigación bibliográfica, se seleccionaron dos zonas de estudio considerando la disponibilidad del análisis químico cuantitativo y la problemática ambiental. La primera zona consiste en la caracterización del área de diversas presas de jales en el municipio de Zimapán. Para la elaboración del trabajo se consideró las muestras colectadas de la presa El Monte del trabajo de R. Moreno, (2009). La segunda zona de estudio consiste en muestras de una zona minera del área de Zimapán también considerados en el trabajo de García, (2018). En la Figura 3.2 se puede observar los sitios bibliográficos seleccionados para la determinación del riesgo a la salud y al ambiente.

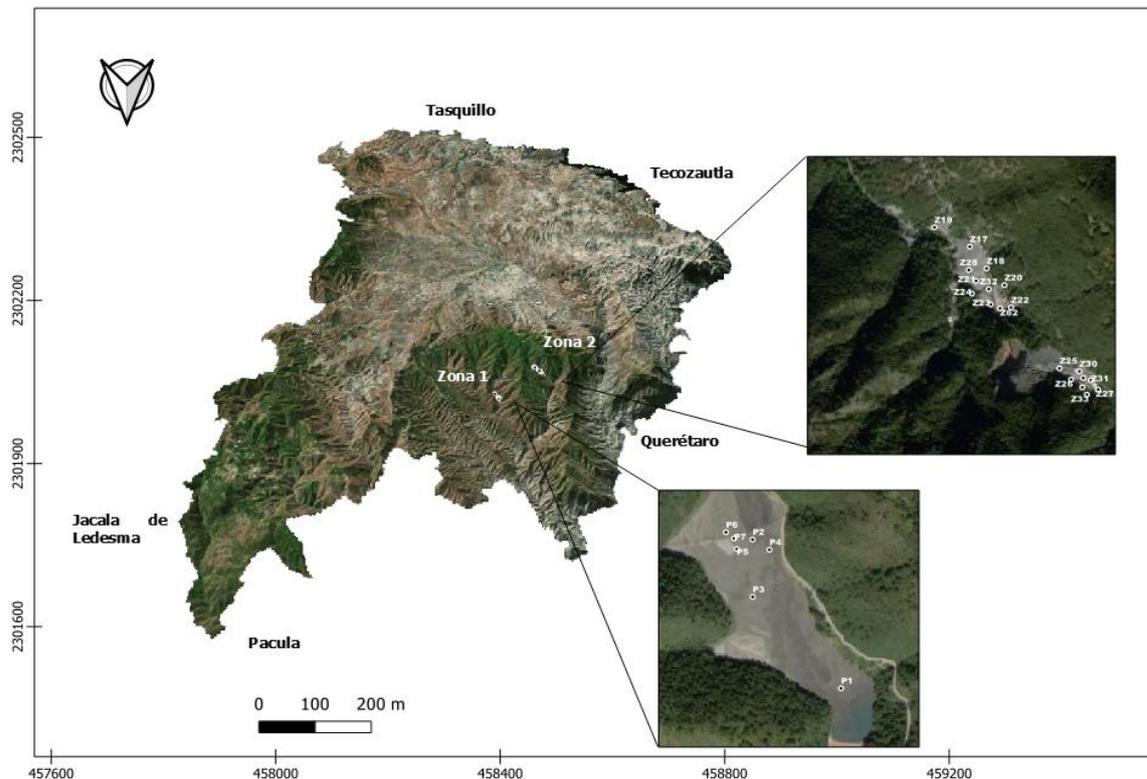


Figura 3.2 Ubicación de puntos de estudio Zona 1 Tovar, (2009), zona 2 (García, 2018)

3.3 Caracterización de las muestras

Para esta etapa, se utilizó la información disponible de la caracterización de las zonas de trabajo correspondiente al análisis químico cuantitativo, y al análisis mineralógico. Adicionalmente a la muestra de la zona 3 y sus repeticiones se le realizaron las pruebas analíticas y de criterio establecidas en la NOM-141-SEMARNAT-2003 para poder establecer su potencial para la generación de drenaje ácido.

3.3.1 Determinación de la fracción de sólidos

La determinación de la fracción de sólidos se llevó a cabo en la estufa a 140°C, las muestras de jales se homogenizaron para el procedimiento y se dejaron secar por un periodo 18 horas, este proceso se llevó a cabo conforme lo solicita la NOM-141-SEMARNAT-2003. En la Figura 3.3 se observa el proceso de secado de la muestra.



Figura 3.3 Estufa para secar muestras

Luego de enfriar la muestra a temperatura ambiente en el desecador se registró el peso final de cada muestra, luego se determinó el contenido de sólidos de las muestras.

$$FS = \frac{P_s}{P_H} \quad (2.7)$$

Donde:

FS= Fracción de sólidos

P_s= Peso en gramos de la muestra después del secado

P_H= Peso en gramos de la muestra húmeda (antes del secado)

3.3.2 Extracción de metales y metaloides en jales con agua en equilibrio con CO₂ según la NOM-141-SEMARNAT-2003

Con la finalidad de determinar los elementos potencialmente tóxicos que conforman las muestras de jales proporcionadas por la Universidad de Hidalgo se realizó el procedimiento para cuantificar la fracción extraíble, que puede representar un riesgo ambiental y así definir la peligrosidad de estos los residuos mineros.

El procedimiento de obtención del extracto se llevó a cabo en el Laboratorio de Tecnología de Materiales del Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, según la figura 2.9. La medición del pH se realizó con el equipo HANNA HI 2550 pH/ORP & EC/TDS/NaCl Meter. Se realizó el ensayo por triplicado y adicionalmente se preparó el blanco para cada repetición para pasar inmediatamente a agitación la mezcla, como se puede observar en la Figura 3.4 a continuación.



Figura 3.4 Muestras de jales y blanco para determinación de extracto PECT

3.3.3 Análisis mediante el Espectrómetro de Absorción Atómica

El análisis de metales y metaloides disponibles en el extracto PECT se llevó a cabo en el Laboratorio de Absorción Atómica del Área Académica de Química de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), el equipo utilizado fue el espectrómetro de absorción atómica de modelo Spectra 800 AA marca Varían para la determinación de plomo, zinc y cadmio.

Posteriormente se realizó también la cuantificación total de la concentración de plomo disponible, este procedimiento se llevó en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el espectrómetro de absorción atómica AVANTA GBC, el análisis consistió en la toma de 0.5g de muestra de jal y adicionar 10 ml de agua regia (formada por 60 ml HCl y 20 ml HNO₃) para luego pasar

al digestor aproximadamente 45 minutos. Posteriormente se preparó la curva de calibración para plomo con base en el límite máximo permisible en la NOM-052-SEMARNAT-2005 utilizando los estándares del equipo. Una vez que se tuvo la lectura de la curva patrón en el programa se midió el contenido de plomo. En la Figura 3.5 se observa el equipo utilizado en la realización del análisis de absorción atómica.



Figura 3.5 Espectrómetro de Absorción Atómica Avanta

3.3.4 Potencial de neutralización

La prueba inició con la calificación cualitativa de la reacción de carbonatos, mediante la observación del grado de efervescencia al ser transformado en dióxido de carbono, luego de agregar gotas de ácido clorhídrico (HCl) al 25% de esta calificación se denominó **moderada**. En la Figura 3.6 se observa la preparación de las soluciones.

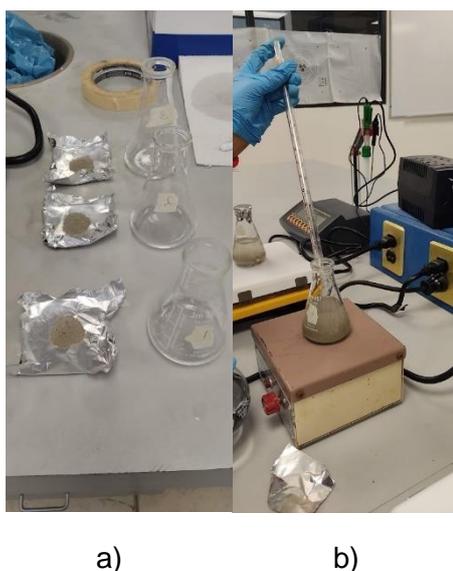


Figura 3.6 Determinación cualitativa de los carbonatos a) preparación de las muestras para la adición de HCl, b) preparación de la mezcla 1.

Según el grado de reacción se adicionan los mililitros de ácido clorhídrico de acuerdo con el diagrama de la Figura 2.10 que describe la cantidad de solución ácida necesaria para cuantificar el potencial de neutralización., para continuar con la preparación de las mezclas.

Se continuó la agitación por 22 horas más, al término de este tiempo se midió el pH el valor obtenido fue mayor a 2.5 razón por la que se adiciona más HCl 1.0 N para disminuir hasta el valor propuesto, registrando los valores añadidos y se volvió a agitar durante dos horas más. A continuación, en la Tabla 3.1, se registran los volúmenes añadidos de ácido clorhídrico.

Tabla 3.1 Volumen de HCl añadido en la muestra de jales

Muestra	Mezcla 2	Mezcla 3	pH a las 22 horas	Mezcla 4
	Va HCl 1 N(mL)	Vb HCl 1 N(mL)		Vc HCl 1 N(mL)
N1	2.0	2.0	4.8	3.0
N2	2.0	2.0	3.5	4.0
N3	2.0	2.0	4.6	4.0

Finalmente se adiciona agua destilada para conseguir un volumen de 125 mL y se tituló con una solución NaOH 0.1 N hasta un pH final de 8.3. En la Tabla 3.2 se presentan los valores añadidos.

Tabla 3.2 Volumen añadido de NaOH 0.1 en la titulación para alcanzar pH 8.3

Muestra	Volumen NaOH 0.1 N (mL)
M1	12.5
M2	17.9
M3	11
Promedio	13.8

3.3.5 Potencial de acidez

Con el propósito de cuantificar el azufre total se consideró la combustión de azufre en un ambiente rico en oxígeno análisis propuesto como medio de cuantificación en la NOM-141-SEMARNAT-2003, este procedimiento se llevó a cabo en el laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica, de la Universidad Nacional Autónoma de México, se llevó a cabo en el equipo S-144DR Dual Range Analyzer. Los resultados indican un total de 0.95 % de azufre en la muestra de jal.

3.3.6 Microscopio de barrido electrónico

El análisis se realizó en el Laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional Autónoma de México. El equipo utilizado de marca PHILIPS serie XL20 permitió tomar imágenes en un tiempo de conteo de 300s, con un voltaje de 15 Kv, el barrido de los elementos se realizó considerando la naturaleza de la muestra. Se encontraron los elementos asociados a los niveles de energía asignados por el analista en la imagen de la Figura 3.7 y en el Anexo 1 se muestran las imágenes reportadas para la muestra en estudio.

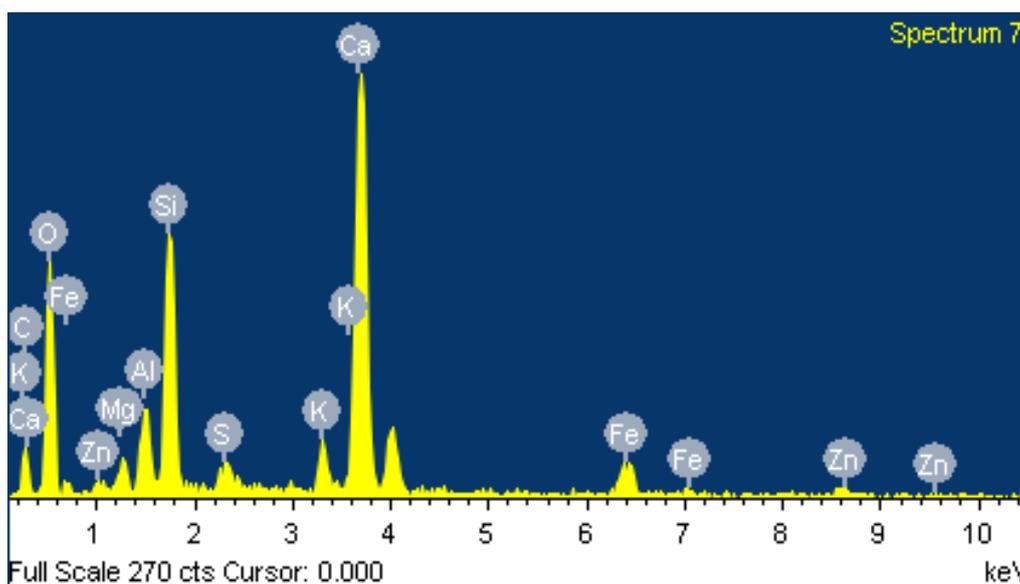


Figura 3.7 Niveles de energía asociados al contenido de elementos en la muestra

3.3.7 Análisis Infrarrojo

El análisis se realizó en un espectrómetro FTIR marca Thermo Scientific Nicolet iS10 utilizando un accesorio GladiATR con un cristal de diamante bajo todo el intervalo del infrarrojo medio ($400-4000\text{ cm}^{-1}$). La lectura de las muestras fue a 64 scans con una resolución de 4 cm^{-1} considerando las condiciones de inicio del equipo (background) al inicio de cada análisis. Para asegurar la ausencia de humedad y CO_2 , durante este método todas las muestras se analizaron en presencia de nitrógeno grado analítico .

3.3.8 Análisis difracción de rayos x

Los análisis de DRX fueron llevados a cabo en el laboratorio de Difracción de Rayos X del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales (AACTyM), se tomó la muestra homogenizada. La muestra se corrió por 30 minutos en un difractor modelo Equinox 2000, marca Inel, con tubo de cobre y detector de 110 grados, que utiliza una mezcla de gases argón-etano. La identificación de minerales en los

difractogramas fue realizada con el software Match! Versión 2 (Cristal Impact, 2003-20015). Las micrografías fueron obtenidas con un microscopio digital USB de 1000x, mod. Microscopio-100, marca Steren. Las imágenes de los equipos utilizados pueden observarse en el Anexo 4

3.4 Software SADA

El software calcula las Metas Preliminares de Remediación (Preliminary Remediation Goals por sus siglas en inglés, PRG), que consisten en las concentraciones superiores al medio de una sustancia, en este caso el suelo, que garanticen la protección a la salud y al ecosistema. Para este caso se realizó la comparación con la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 de los elementos seleccionados por cada zona.

Los datos alimentados al programa corresponden a las concentraciones totales de elementos Pb, Cd, y As para la zona 1 y elementos Pb y As para la Zona 2, así como la concentración disponible y total de Pb de la muestra de jal, de los 5 tipos de escenarios disponibles, se consideró los usos del suelo otorgados a las áreas de estudio industrial y agrícola revisados en el Plan de Ordenamiento Territorial de Zimapán.

En la imagen de la Figura 3.8 se observan los factores utilizados en la evaluación de riesgo a la salud, según la actualización del año 2014 de la USEPA.

Exposure Parameters - Soil	Residential	Industrial	Recreational	Excavation	Agricultural	Unit
Exposure frequency	350	250	40	20	350	days/yr
Adult exposure duration	24	25	24	1	24	years
Child exposure duration	6	0	6	0	6	years
Total exposure duration	30	25	30	1	30	years
Adult soil ingestion rate	100	100	100	480	100	mg/day
Child soil ingestion rate	200	0	200	0	200	mg/day
Fraction ingested	1	1	1	1	1	unitless
Inhalation rate	20	20	20	20	20	m ³ /day
Adult surface area	0.53	0.316	0.53	0.53	0.53	m ² /day
Adherence factor	1	1	1	1	1	mg/cm ²
Gamma exposure factor	1	0.3333	0.041667	0.3333	1	unitless
Gamma shielding factor	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	unitless

General	Adult	Child	Unit
Body weight	80	15	kg
Lifetime	70		years

Mass loading factors	Residential	Agricultural	Unit
Plant MLF	0.26	0.26	unitless
Pasture MLF	0.26	0.26	unitless

Milk food chain pathway (Dairy cattle)	Residential	Agricultural	Unit
Fraction on-site	1	1	unitless
Fraction feed from site	1	1	unitless
Quantity pasture ingested	16.1	16.1	kg/day
Quantity soil ingested	1	1	kg/day

Beef food chain pathway (Beef cattle)	Residential	Agricultural	Unit
Fraction on-site	1	1	unitless
Fraction feed from site	1	1	unitless
Quantity pasture ingested	7.2	7.2	kg/day
Quantity soil ingested	1	1	kg/day

Figura 3.8 Parámetros de exposición para la estimación de riesgo

Tomado de SADA, 2022

Adicionalmente para los cálculos se seleccionó las siguientes vías de exposición: ingestión y dérmica, en la Figura 3.9 se puede observar las opciones disponibles en el programa de los descrito antes.



Figura 3.9 Parámetros de exposición para los escenarios seleccionados

Tomado de SADA, 2022

Continuando con la preparación del programa en la Figura 3.10 se observan los parámetros de riesgos permitidos en la determinación. Para el índice de peligro, Hazard Index (por sus siglas en inglés, HI) se asignó un valor de 1 para sustancias no carcinógenas, donde si el HI <1 significa que no existe riesgo en los individuos expuestos. Para los elementos clasificados como carcinógenos por IRIS se seleccionó un riesgo de 1E-6 (USEPA, 1991).

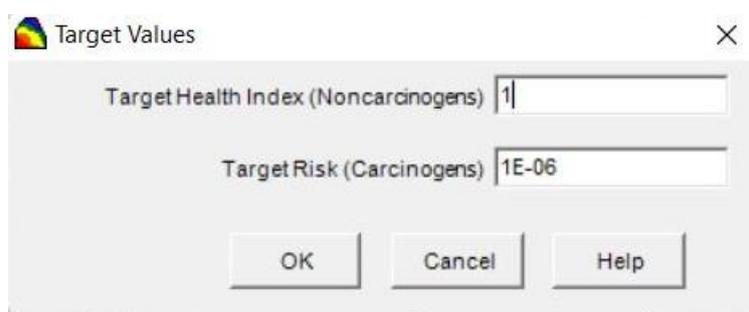


Figura 3.10 Valores de estimación de riesgo propuestos

Tomado de SADA, 2022

Una vez estandarizados los parámetros de medición, se elaboraron los mapas de LMP en el programa, posteriormente se realizó el mapa de interpolación de distribución de riesgo en las zonas en la Figura 3.11 se puede observar el formato que el programa mantiene para los mapas de LMP.

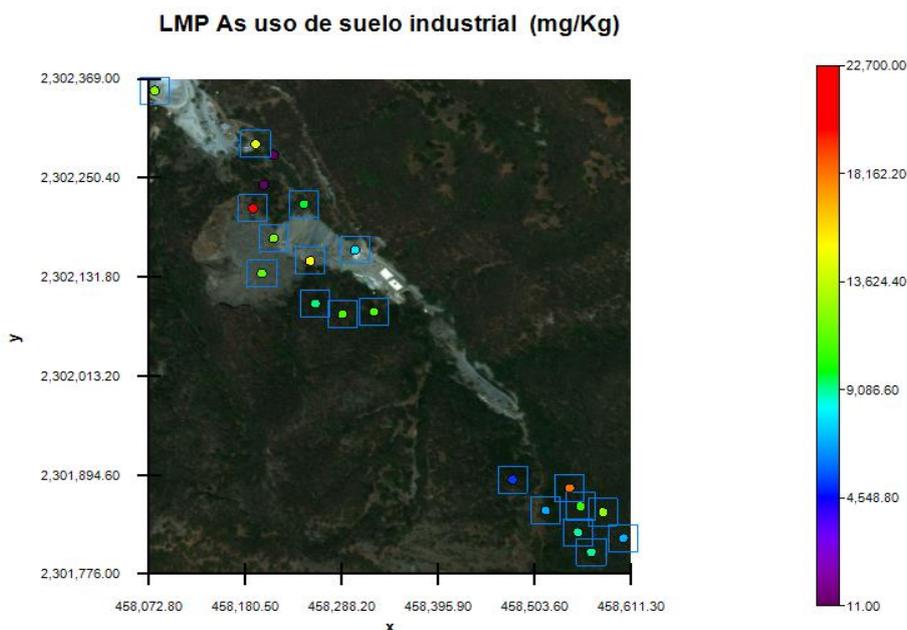


Figura 3.11 Representación de los LMP de Pb para uso industrial de la Zona 1 según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

La evaluación de riesgo ecológico también se llevó a cabo con el software SADA, este módulo del programa proporciona una base de datos (eco_toxdata_v5) de medios para los efectos de los contaminantes en los receptores ecológicos, ofrece modelos de exposición para 19 especies terrestres (aves y mamíferos). Para el cálculo de riesgo ecológico se revisó la base de información del SADA y se comparó con otras bases de datos que dispongan información de las aves y mamíferos de México, Hidalgo - Zimapán, a continuación, en la Tabla 3.3 se expone las especies seleccionadas para el análisis.

Tabla 3.3 Comparación de las especies existentes en la base de datos SADA con las especies que se encuentran en Zimapán

Familia	Nombre en inglés	Tipo	Nombre en español	Nombre común	Bases de datos		
					SADA 5.0	Avibase	Alfonso L. Herrera
Columbidae	Mourning Dove	Ave	Zenaida macroura	Zenaida Huiyota	x	x	-
Accipitridae	Red-tailed hawk	Ave	Buteo jamaicensis	Busardo Colirrojo	x	x	-

Familia	Nombre en inglés	Tipo	Nombre en español	Nombre común	Bases de datos		
					SADA 5.0	Avibase	Alfonso L. Herrera
Strigidae	Burrowing Owl	Ave	Athene cunicularia	Mochuelo de Madriguera	x	x	-
Leporidae	Black-tailed jackrabbit	Mamífero	Liebre del desierto	Liebre de cola negra	x	-	x
Falconidae	American kestrel	Ave	Falco sparverius	Cernícalo Americano	x	x	-
Vespertilionidae	Little brown bat	Mamífero	Miotis Lucífugo	Murciélago marrón	x	-	x
Mustelidae	Long-tailed weasel	Mamífero	Neogale frenata	Comadreja de brida	x	-	x

Fuente: Tomado de (Ordoñez, 2022).

Por otra parte, para el análisis de riesgo se seleccionó la evaluación UCL95 disponible en el módulo de estadística para lograr una concentración representativa de exposición a la cual se logra poner en riesgo al individuo. SADA cuenta con concentraciones de exposición predeterminada para una variedad de receptores de vida silvestre, no se modificaron estos valores para el cálculo ya que los estándares establecidos concuerdan con la guía de riesgo ecológico establecida por la USEPA a continuación, a manera de ejemplo en la Figura 3.12, se observa los resultados del análisis de riesgo ecológico para el ave Busardo colirrojo, en la zona 1 para la exposición a As por contacto dérmico, se eligió la evaluación de todos los especímenes, aunque puede seleccionarse por hembras, machos y juveniles. El programa contiene los modelos de exposición por especie los cuales son comparados con las concentraciones de los EPT y finalmente calcula una dosis y compara los valores con los valores referenciales de toxicidad (TRV) de las bases de datos, de esta manera se presentan los resultados obtenidos por área de estudio en el siguiente capítulo (Marcomini *et al.*, 2009).

The figure displays the SADA software interface for terrestrial exposure modeling. It consists of several interconnected windows:

- Set Terrestrial Modeling Contaminant Parameters:** A window for configuring parameters for a specific contaminant (Arsenic). It includes sections for Chemical Constants, Inhalation (Volatile/Non-Volatile), Particulate Emission Factor (PEF), and various Bioaccumulation Factors (BAF) for plants, invertebrates, and mammals. It also includes Tissue Regression parameters (Log-linear slope and intercept).
- Set Species-Specific Terrestrial Exposure Parameters:** A window for configuring parameters for a specific species (Red-tailed hawk). It includes sections for Food Ingestion Parameters (rate, fraction of food IR), Mammalian Prey Diet (fraction of diet), Soil Ingestion Parameters, Soil Inhalation Parameters, Dermal Contact Parameters (Adherence Factor, Surface area), and Physical Parameters (Body weight, Area usage factor). It also includes a Range description.
- SADA Modelos de exposición ecológicos:** A central box representing the ecological exposure models.
- Soil Ecological Benchmark Ratios (mg/kg)/(mg/kg):** A window showing benchmark ratios for various contaminants. It includes a table of benchmark information and a table of results for Arsenic.

Analyte	Concentration	Units	UCL95	Eco-SSL Avian	Eco-SSL Mammalian
Arsenic	12197.946	mg/kg	12197.946	283.6731562	265.172733

Figura 3.12 Interfaz de especies terrestres.
Tomado de SADA, 2022

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de otras investigaciones considerados para este estudio

Las condiciones de colección de muestras para la zona 1 consistieron en la recolección de 19 puntos en la presa de jales el Monte, en forma de canal de una longitud 1.0 a 1.50 m por 0.30 m de espesor. Realizando el secado a temperatura ambiente, en condiciones cerradas y libres de corrientes de aire (R. Moreno, 2009).

La información utilizada de la zona 2, consistió en 7 puntos colectados por la empresa minera dentro de la presa de jales. En la Tabla 4.1 se muestran los puntos utilizados para la determinación del riesgo, (García, 2018).

La distancia más cercana de un poblado a los puntos de muestreo de la zona 1 es de 7.0 km, para la zona 2 existe una distancia de 8 km aproximadamente.

Tabla 4.1 Concentraciones de los elementos seleccionados para la determinación del riesgo a la salud y riesgo ecológico de la Zona 1 y 2

Sitio	Punto	pH	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)	Fecha	Zona
Zona 1	Z17	6.3	731.8	3500	15,600	Junio,2009	Zimapán, Hidalgo
	Z18		807.2	5500	9700		
	Z19		549.1	4400	12100		
	Z20		423.9	4000	7900		
	Z21		585.2	4800	11900		
	Z22		692.5	6500	11000		
	Z23		472.7	4800	9300		
	Z24		523.5	3600	11200		
	Z25		280.4	3400	5200		
	Z26		335.3	2200	6900		
	Z27		340.9	3800	7000		
	Z28		1010.8	5700	22700		
	Z29		489.8	2100	10500		
	Z30		914.2	9500	18300		
	Z31		589.2	2400	12300		
	Z32		690.3	2800	15300		
	Z33		305.7	3600	9061		
	Z61		294.1	2300	8933		
	Z62		329.6	5100	11010		
Zona 2	P1	8.5	-	834.55	3016.48	Octubre, 2018	Zimapán, Hidalgo
	P2	8	-	882.57	4026.49		
	P3	8.1	-	577.9	4074.04		
	P4	8.3	-	629.14	3516.24		
	P5	8.3	-	587.37	4808.55		
	P6	7.8	-	1256.65	5469.26		
	P7	8.2	-	833.27	8744.53		

4.1 Caracterización de la muestra de jal zona 3

Los análisis de caracterización cualitativa como son el microscopio de barrido electrónico identificaron la presencia de elementos como calcio, silicio, así como se detectó baja presencia de elementos como azufre, hierro y zinc en la muestra. Este tipo de compartimiento en la muestra puede ser posible por el alto contenido de roca caliza en la zona de Zimapán. Los resultados del análisis de infrarrojo indican una tendencia a la presencia de ortoclasas, oligoclasas según la similitud entre los espectros del equipo y la muestra dichos resultados están en concordancia con los obtenidos en el microscopio de barrido electrónico (García, 2018).

Los resultados del análisis de absorción atómica indican que las cantidades totales en la presa de jales de plomo excedían los valores permitidos según el uso de suelo como se puede observar en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Comparación de las concentraciones disponibles y totales de Pb

<i>Punto</i>	<i>pH</i>	<i>Pb total(mg/kg)</i>	<i>Pb biodisponible (mg/kg)</i>	<i>LMP Pb industrial (mg/Kg)</i>	<i>LMP Pb agrícola (mg/Kg)</i>
<i>M1</i>	6.3	2822.00	1.007	800	400

Los resultados demuestran que la cantidad de elementos biodisponibles obtenidos del análisis del extracto PECT se encuentran dentro de los valores permitidos por la norma. Se realizó el análisis de la concentración total de arsénico el resultado demostró una concentración total de 6944 mg/kg para la presa de jales, estos valores están relacionados con la abundancia de los minerales asociados a Pb, Ag y Zn (Armienta *et al.*, 2007)

4.1.1 Resultados del Análisis Infrarrojo

Los minerales aquí presentados son aquellos que obtuvieron el mayor Match (similitud) entre sus espectros y los de la muestra. Esto no quiere decir que existen o no éstos en dicho ejemplar, ni habla de una mayor abundancia de uno u otro pues esto depende de que tanto la muestra como los minerales de referencia sean analizados bajo las mismas condiciones. Lo que sí permite la técnica es decir que existen esos grupos funcionales (con base en las bandas de las vibraciones moleculares características) y, con DRX, corroborar cuáles son los minerales realmente presentes. En la Tabla 4.3 se puede observar los resultados obtenidos del análisis. El diagrama obtenido se encuentra en el Anexo 2.

Tabla 4.3 Interpretación/ Caracterización de la muestra

Muestras	Grupos funcionales	Silicatos	
		Feldespatos Nombre (fórmula)	Carbonatos Nombre (fórmula)
M1	Si ₃ O ₈ ⁴⁻ y CO ₃ ²⁻	Ortoclasa (KAlSi ₃ O ₈), Microclina (KAlSi ₃ O ₈), Oligoclasa (Ca _{0.1-0.3} Na _{0.7-0.9} AlSi ₃ O ₈), Albita NaAlSi ₃ O ₈) y Andesina (Ca _{0.3-0.5} Na _{0.5-0.7} AlSi ₃ O ₈).	Smithsonita (ZnCO ₃), Calcita (CaCO ₃), Magnesita (MgCO ₃) y Gaylussita (Na ₂ Ca(CO ₃) ₂ 5H ₂ O)

4.1.2 Resultados del Potencial de Neutralización Neto

Los valores de las repeticiones de la M1 de la Zona 3 en la determinación de la fracción de sólidos se pueden observar en la Tabla 4.4, el resultado promedio es 0.886.

Tabla 4.4 Determinación de la fracción de sólidos de los jales de las repeticiones de la muestra

Descripción/ datos	ID Muestra	Peso inicial (P _H) (g)	Peso final (P _S) (g)	FS
Muestras homogenizas	M1	50.0	45.6	0.912
	M2	50.0	43.1	0.862
Muestras no homogenizadas	M3	50.0	45.6	0.912
	M4	50.0	43.0	0.860

Una vez obtenida la fracción de sólidos y valorada la muestra según el grado de efervescencia, se calculó el total de mililitros gastados de HCl 0.1N según la siguiente fórmula:

$$VF = Va + Vb + Vc \quad (2.7)$$

El cálculo del volumen final para la muestra de jal es:

$$VF = 2 + 2 + 3.6 = 7.6 \text{ mL}$$

Se culminó la determinación del cálculo del potencial de neutralización (PN) expresado como kg de carbonato de calcio (CaCO₃) de cada tonelada de jales, calculada mediante la fórmula a continuación:

$$PN = \frac{(\text{Volumen Final en mL de HCl}) - (0.1 \times \text{Volumen en mL de NaOH})}{\text{Peso de la muestra (g)}} \times 50 \quad (2.8)$$

El resultado obtenido del potencial de neutralización de la muestra es:

$$PN = \frac{(7.6mL) - (0.1 \times 13.8 mL)}{2.000 (g)} \times 50 = 155.5 Kg CaCO_3/ton$$

Finalmente, el resultado obtenido del análisis del contenido de azufre total demostró que existe un un total de 0.95% de azufre en la muestra de jal. Estos valores de azufre total no son suficientes para realizar la determinación del potencial de neutralización estos valores particulares se pueden atribuir al alto contenido de carbonatos en la muestra, grupos funcionales detectados en el análisis de infrarrojo, sin embargo, por la clasificación de drenaje ácido estudiado en la Tabla 2.3 debido al pH se encuentra en la clasificación tipo V que tiende a la neutralización.

4.1.3 Resultados del Microscopio de Barrido Electrónico

Los resultados del análisis del microscopio electrónico de barrido demuestran que existe presencia de elementos como Ca, Si y K. En las imágenes no se evidenció altas presencia de pirita. En la Figura 4.1 se puede observar la imagen obtenida durante la visualización de la muestra.

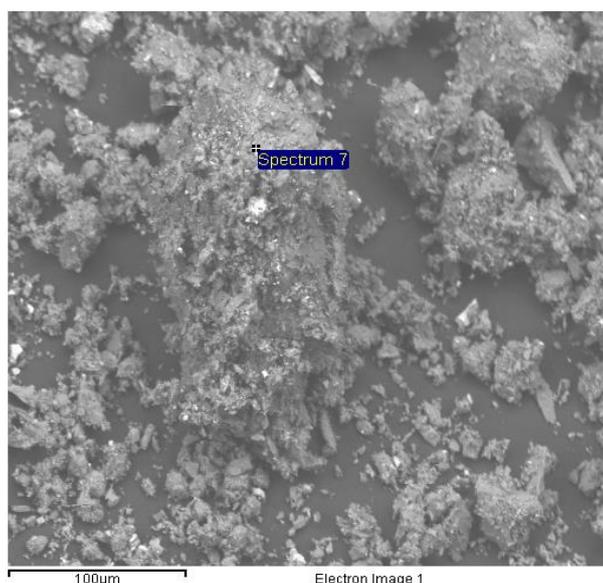


Figura 4.1 Imagen del microscopio de barrido electrónico para una distancia de 100µm

4.1.4 Resultados de la difracción de rayos X

La cuantificación realizada demostró a la calcita ($CaCO_3$) como mineral predominante como se puede observar en la Figura 4.2, con una abundancia del 48.1%. Los siguientes minerales en abundancia fueron la nefelina ($NaAlSi_3O_8$) (18.1%) y la goethita $FeO(OH)$ (16.1%). En proporción menor al 10% y mayor al 1% se identificaron

billingsleyita (Ag_7AsS_6) (8.7%), cristobalita (4.6%) y cuarzo (SiO_2) (3.9%). Como mineral minoritario principal se encontró esfalerita (ZnS) (0.5%). Se detectó también manganberzelita. Estos resultados confirman y amplían con detalle los reportados en los análisis de infrarrojo. Asimismo, explican que en el análisis elemental se haya encontrado azufre total en una concentración menor al 1%. La alta concentración de cuarzo y otros silicatos provocó interferencia en el análisis de sulfatos, sin embargo, se puede concluir que los jales depositados en la presa de la planta de beneficio cooperante no presentan riesgo de generación de DAM, sin embargo, considerando el análisis del extracto PECT, el drenaje neutro no está exento de presentar concentraciones importantes de metales pesados.

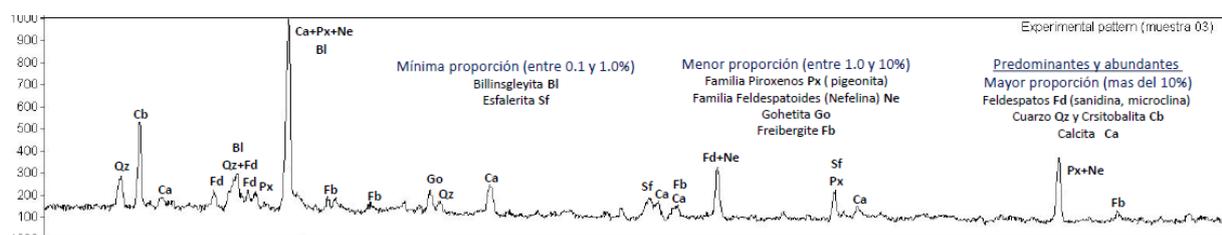


Figura 4.2 Difractograma de la muestra homogenizada

4.2 Generación de drenaje ácido

Para la zona 1 de estudio la determinación de la acidez de las muestras se realizó mediante la medición de pH teniendo resultados promedio de 6.3 para las muestras, dicho valor se acerca a la neutralidad, sin embargo, existen muestras que presentan valores de pH menores, los cuales tienen semejanza con el valor promedio de pH reportados en la muestra de la zona 3 de 6.5, en la determinación de la generación de DAM del sitio se determinó que la relación PN/PA no cumplió con el protocolo establecido en la legislación seleccionada. Ya que la cantidad de azufre total cuantificada en la combustión de azufre rico en oxígeno fue menor a los valores obtenidos de compuestos de azufre analizados en la determinación del potencial de neutralización. Estos sitios de estudio fueron seleccionados ya que trabajos previos indican que el distrito minero Zimapán es una zona con altas concentraciones de minerales con elementos potencialmente tóxicos, que cuenta con varias presas de jales (antiguas y recientes) lo que permitió acceder a la información de caracterización mineralógica como generación de drenaje para estas zonas (R. Moreno, 2009).

Se considera un jal generador de drenaje ácido cuando la relación del potencial de neutralización (PN) con el potencial de acidez (PA) sea menor o igual que 1.2 según los resultados obtenidos del sitio de estudio zona 2 del distrito minero Zimapán, los jales muestreados no tienden a producir drenaje ácido ya que su relación $\text{PN/PA} \geq 1.2$

como se muestra en la Figura 4.3 de los puntos muestreados el punto 7 es el más cercano al límite permitido según la NOM-141-SEMARNAT-2003.

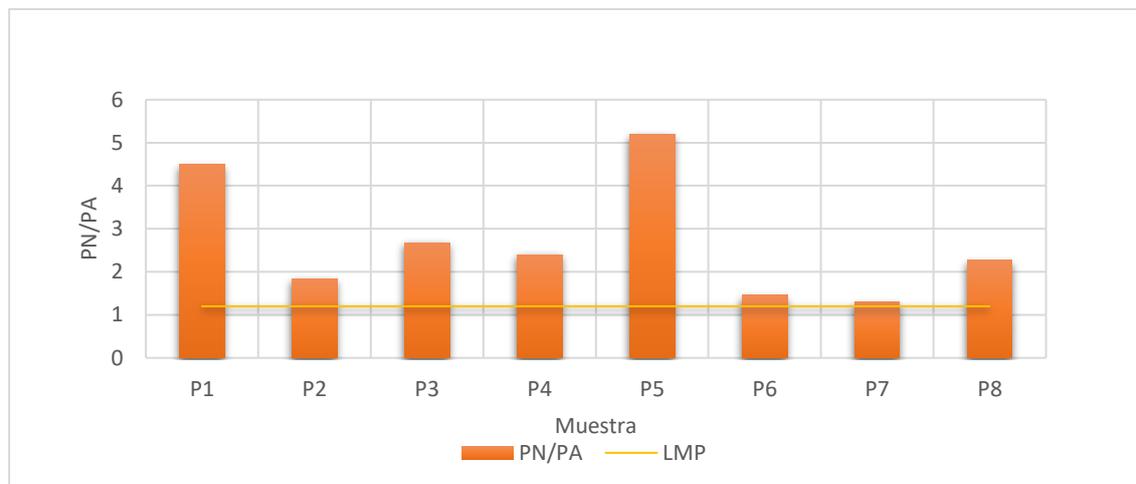


Figura 4.3 Determinación del PN/PA para Zona 2

Los puntos de la zona de estudio se encuentran en un sitio de alta presencia de CaCO_3 lo que permite que exista alcalinidad en la oxidación de los sulfatos (Plante *et al.*, 1988).

4.3 Resultados de riesgo a la salud zona 1

Los resultados del análisis de riesgo para los escenarios seleccionados de uso suelo como industrial y agrícola según los criterios establecidos en el plan de ordenamiento territorial del distrito minero Zimapán 2016 -2020.

La zona 1, se encuentra situada en la secuencia estratigráfica de la porción centro - noroccidental del estado de Hidalgo representada por una secuencia calcáreo – pelítico la parte inferior donde se aloja la mineralización y otra superior denominada Formación Soyatal conformadas por rocas de composición ácido – intermedia, esto permite reportar que la mineralogía considerada primaria del yacimiento está constituida por pirita (FeS_2), galena (PbS), esfalerita (ZnS), arsenopirita (AsFeS) estos datos se ven reflejado en la caracterización mineralógica del sitio que contiene altas cantidades de plomo y arsénico que se encuentran por encima de los límites permitidos de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 como se presenta en la Figura 4.4.

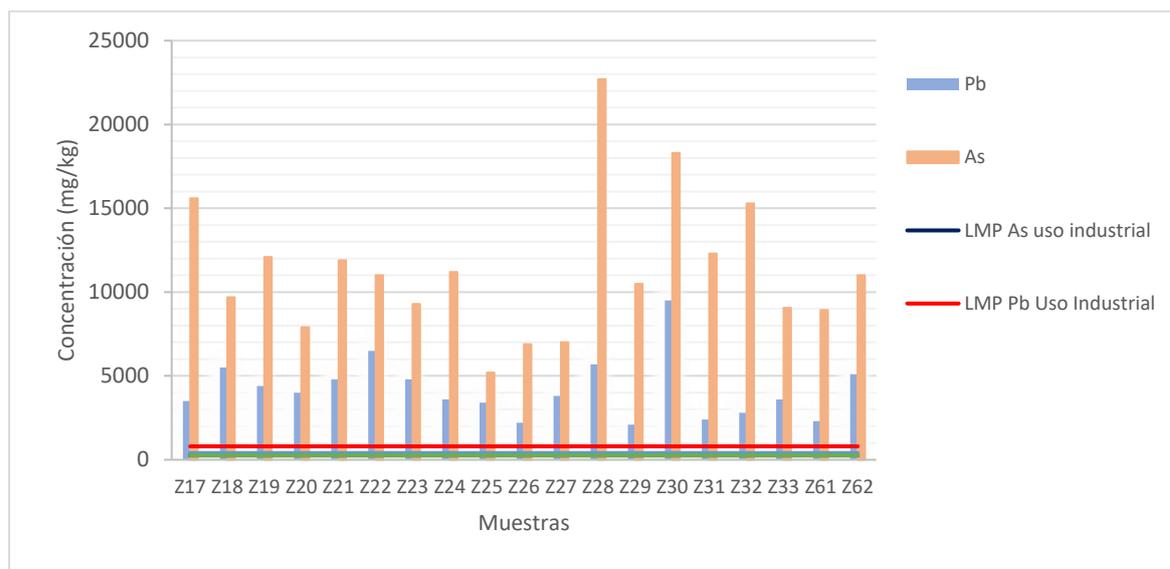


Figura 4.4 LMP según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para Pb y As según el uso de suelo (elaboración propia)

Las muestras presentan concentraciones totales de cadmio menores que las de arsénico y plomo, sin embargo, se encuentran por encima de los límites máximos permitidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, adicionalmente es un elemento que puede representar problemas a la salud y al ambiente como se puede ver en la Figura 4.5.

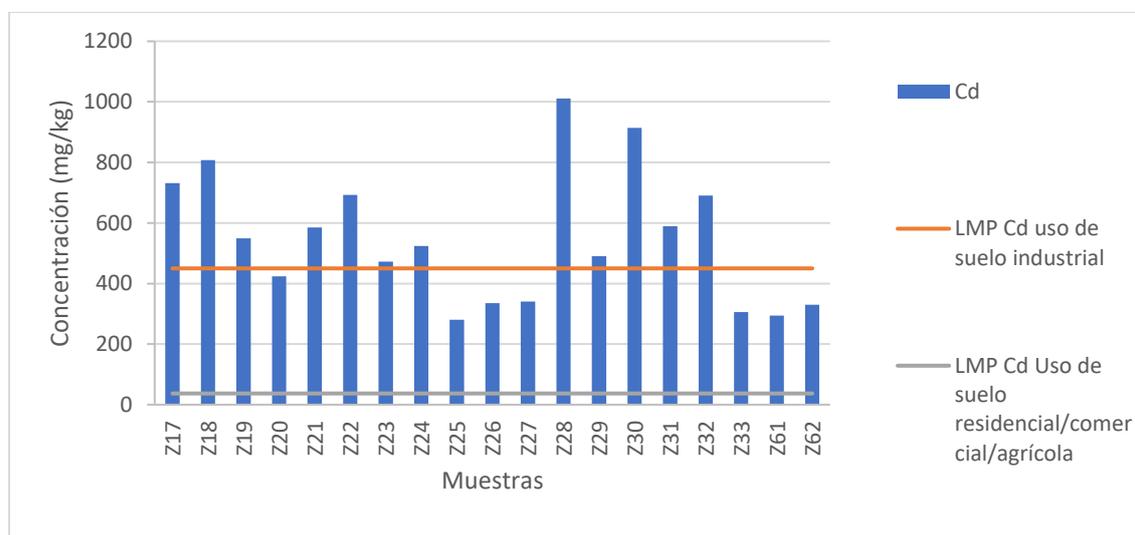


Figura 4.5 LMP según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para Cd según el uso de suelo (elaboración propia)

El cálculo de la caracterización del riesgo realizado con la concentración de UCL 95 para los 3 elementos seleccionados se observan a continuación en la Tabla 4.5

Tabla 4.5 Cociente de Riesgo (HQ) e Índice de Peligro (HI) por exposición a metales contenidos en jales mineros.

Receptor	Matriz (Suelo)	Número CAS	Concentración (mg/kg)	Escenario Agrícola			Escenario Industrial		
				Ingesta Suelo	Contacto dérmico	Σ HQ	Ingesta Suelo	Contacto dérmico	Σ HQ
Adulto	Plomo	7439921	4617.89	5.90E-05	-	5.90E-05	1.20E-05	-	1.20E-05
	Arsénico	7440382	12197.95	2.70E-02	1.50E-02	4.20E-02	5.60E-03	5.30E-03	1.10E-02
	Cadmio	7440439	612.82	7.30E-01	1.65E+00	2.30E+00	5.20E-01	6.60E-01	1.20E+00
	TOTAL			7.50E-02	1.66E+00	2.30E+00	5.20E-01	6.60E-01	1.20E+00

Los resultados obtenidos de la caracterización del riesgo a la salud para los elementos seleccionados permiten observar que es probable que exista 7.5 casos de cáncer por cada 100 individuos expuestos a estas concentraciones totales por ingestión, para el uso de suelo agrícola. Continuando con el análisis para cada elemento, el resultado de la caracterización del cadmio para el uso de suelo industrial describe que existe peligro para los adultos ya que aproximadamente 2.3 personas por cada 10 están expuestos debido al contacto dérmico.

Existe relación entre los resultados del programa y los resultados de la NOM-147-SEMARNAT/SS1-2004 ya que para las actividades agrícolas los límites referenciados están excedidos hasta en un 53% de estudios anteriores se sabe que los efectos del cadmio sobre los cultivos producen enrollamiento de las hojas, deficiencia de fósforo y reducción en el transporte de manganeso (Hernández y Rodríguez, 2019).

El cadmio generalmente se encuentra presente en la estructura cristalina de la esfalerita o en forma de sulfuro de cadmio y a diferencia del elemento que lo acompaña generalmente, el zinc (asociación mineralógica esfalerita – greenockita), este si es considerado un elemento potencialmente tóxico (Moreno, 2013).

Con relación a los elementos Pb y As el programa los consideró como potencial riesgo considerando su clasificación según el IRIS B2 y A respectivamente, los resultados obtenidos indican que existe la probabilidad de 1.2 en 100.000 de desarrollar cáncer por ingestión de plomo para un uso de suelo industrial, mientras que, para el uso de suelo agrícola la probabilidad aumenta en 5.2 por 100.000 por exposición debido a la ingestión. Para el caso de contacto dérmico la exposición indica que si existe riesgo para los individuos. Para el uso de suelo agrícola los resultados indican que los individuos tienen una probabilidad de 5.2 en 100.000 de estar en riesgo por ingestión de plomo.

Estudios hidrogeoquímicos realizados en la zona de Zimapán proponen que las altas concentraciones de arsénico están relacionadas con su disolución natural a través del acuífero más cercano a la zona mineralizada, sin embargo, otros autores proponen que la movilidad del As en las presas de jales es la causa de su alta concentración en las aguas subterráneas (Moreno, 2013).

Los resultados demuestran que existe riesgo a la salud asociado a la exposición, estos valores guardan relación con los referenciales para uso de suelo ya que exceden el límite establecido para cada uso. A continuación, se presenta en el mapa de la Figura 4.6 se presenta la dispersión de riesgo a la salud para la zona 1 para uso de suelo industrial, esta imagen demuestra que el 36% de los puntos tienen probabilidad de estar en riesgo.

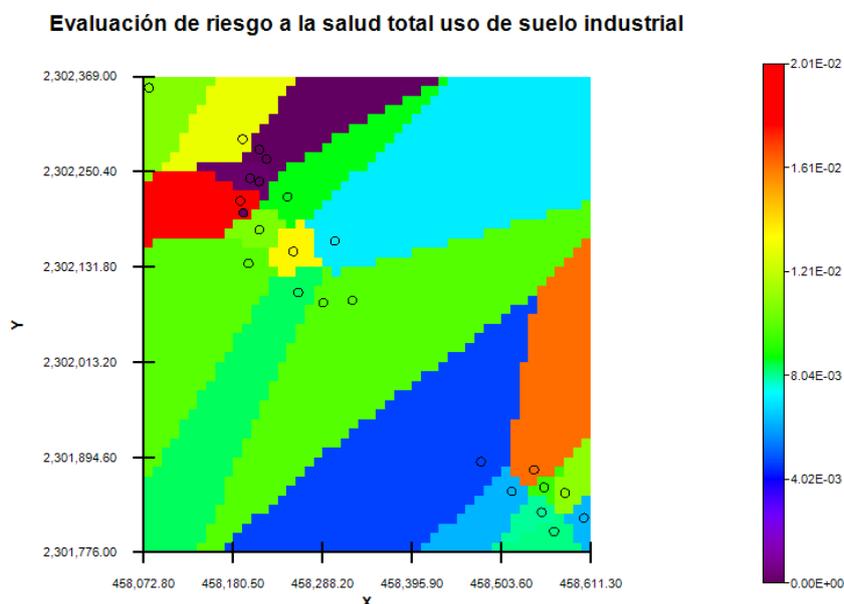


Figura 4.6 Interpolación de riesgo total para elementos cancerígenos Zona 1

4.4 Resultados de riesgo a la salud zona 2

Las muestras de la zona 2 provienen de la presa de jales del distrito minero Zimapán en operación, que extrae Cu, Pb y Zn, las cuales fueron utilizadas evaluar la ecotoxicidad de sus lixiviados en embriones de peces, los resultados obtenidos demostraron que las concentraciones usadas no son lo suficientemente tóxicas para causar daños teratogénicos (García, 2018).

A continuación, se presentan los valores referenciales de uso de suelo según la NOM-147-SEMARNAT/SS1-2004 en la Figura 4.7 se observa que las concentraciones totales de plomo de la zona 2 exceden los límites permitidos para el uso de suelo

residencial, agrícola e industrial. La zona de estudio se ubica aproximadamente a 10 km del centro poblado de la Zimapán, los involucrados en el análisis de riesgo son el personal que realice base en la zona minera, así como se considera también en la caracterización del riesgo ecológico la flora y fauna (mamíferos y aves) en el siguiente apartado.

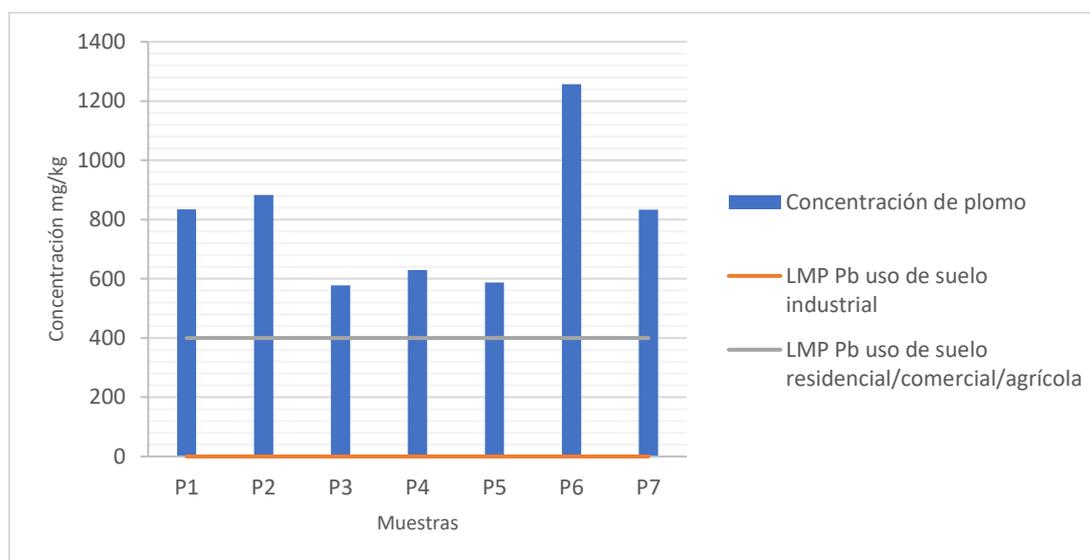


Figura 4.7 LMP según los criterios de uso de suelo de la NOM-147-SEMARNAT/SS1-2004 para Pb (elaboración propia)

La caracterización del riesgo a la salud de las muestras provenientes de la zona 2 para plomo demuestran que existe riesgo para los escenarios de uso de suelo considerados. Como se aprecia en la Tabla 4.6 los resultados obtenidos por el programa SADA, para concentraciones totales de plomo y arsénico, existe la probabilidad de 1.2 en 100 de estar en riesgo.

Tabla 4.6 Cociente de Riesgo (HQ) e Índice de Peligro (HI) por exposición a metales contenidos en jales mineros para la Zona 2.

Receptor	Matriz (Suelo)	Número CAS	Concentración (mg/kg)	Escenario Agrícola			Escenario Industrial		
				Ingesta Suelo	Contacto dérmico	Σ HQ	Ingesta Suelo	Contacto dérmico	Σ HQ
Adulto	Plomo	7439921	878.92	1.10E-05	-	1.10E-05	2.30E-06	-	2.30E-06
	Arsénico	7440382	5408.05	1.20E-02	6.60E-03	1.90E-02	2.50E-03	2.40E-03	4.90E-03
	TOTAL			1.20E-02	6.60E-03	1.90E-02	2.50E-03	2.40E-03	4.90E-03

Los resultados demuestran que para el uso de suelo industrial de los elementos plomo y arsénico, existe una probabilidad de riesgo por ingestión de 1.1 en 100.000 y 1.2 en 100 siendo los valores de exposición de arsénico de mayor interés. En la Figura 4.8 se

puede observar que el elemento arsénico se encuentra por encima de los valores referenciales de la NOM-147-SEMARNAT/SS1-2004 la cual determina que para uso residencial/agrícola y comercial el arsénico debe encontrarse por debajo de 22 mg/l y para uso industrial hasta los 260 mg/kg.

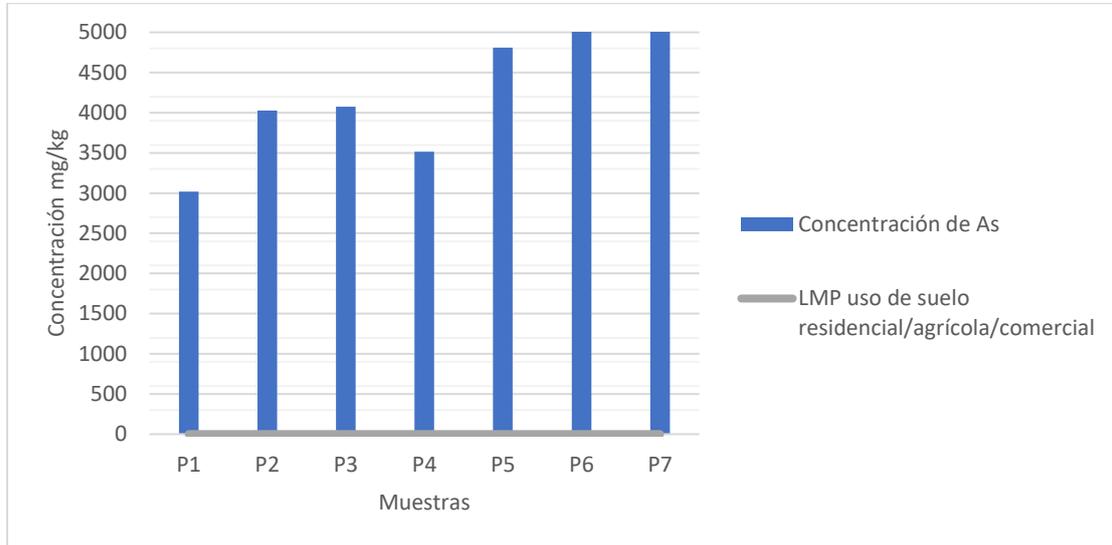


Figura 4.8 LMP según los criterios de uso de suelo de la NOM-147-SEMARNAT/SS1-2004 para As (elaboración propia)

En la Figura 4.9 se muestra el mapa de interpolación de riesgo para los elementos carcinógenos según el uso de suelo industrial, los resultados demuestran que el trabajo en la zona 2 puede resultar negativo para la salud de los trabajadores.

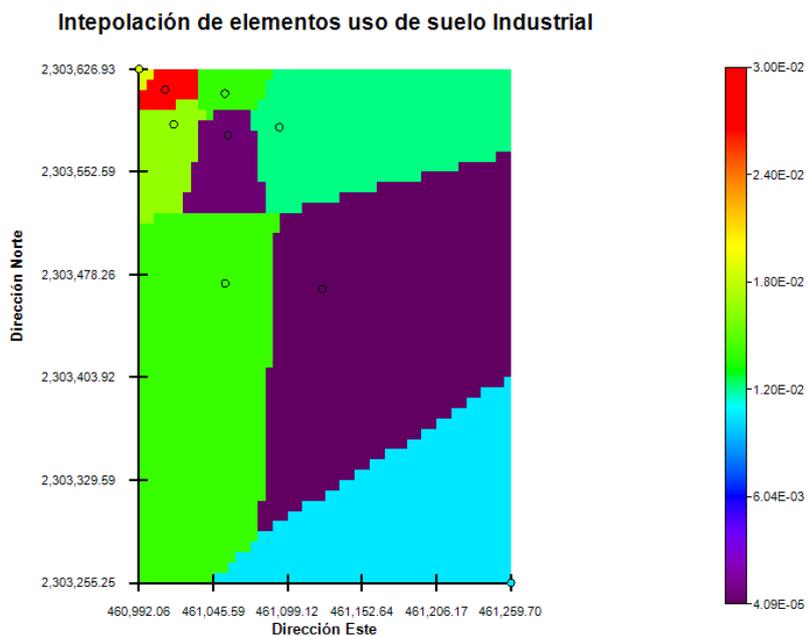


Figura 4.9 Interpolación de riesgo total para elementos cancerígenos Zona 2.

4.1 Resultados de riesgo a la salud para la Zona 3

Los resultados del análisis de riesgo para los escenarios seleccionados de uso suelo como industrial y agrícola para la concentración disponible de plomo demuestran que no existe riesgo a los individuos expuestos. La muestra se encuentra situada en una zona minera de Zimapán. En la Tabla 4.7 se presentan los resultados de la evaluación de riesgo a la salud.

Tabla 4.7 Cociente de Riesgo (HQ) e Índice de Peligro (HI) por exposición a metales contenidos en jales mineros para la Zona 3

Receptor	Matriz (Suelo)	Número CAS	Concentración (mg/kg)	Escenario Agrícola			Escenario Industrial		
				Ingesta Suelo	Contacto dérmico	ΣHQ	Ingesta Suelo	Contacto dérmico	Σ HQ
Adulto	Plomo	7439921	1.007	1.10E-05	-	1.10E-05	1.00E-06	-	1.1E-06

4.2 Resultado de riesgo ecológico

La caracterización del riesgo ecológico se realizó para la zona 1, 2 y 3 ya que se encuentran dentro del área minera de Zimapán. Para la evaluación de riesgo se consideró los elementos Pb, Cd y As. Los parámetros propuestos por SADA son una frecuencia de exposición 7/7 para las aves y mamíferos. Se consideró una distribución UCL95. Los resultados demuestran que existe una concentración media para cadmio de 1702.27 mg/Kg este valor difiere un 36% de la concentración calculada como se puede observar en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Cálculo de la dosis de riesgo para la flora y fauna por exposición a metales contenidos en jales mineros para las áreas de estudio

Elementos	Concentración	Unidades	UCL95	Bases	
				Eco-SSL Avian	Eco-SSL Mammalian
Arsénico	12197.95	mg/kg	12197.95	283.67	265.17
Cadmio	612.82	mg/kg	612.82	795.87	1702.27
Plomo	4617.89	mg/kg	4617.89	419.81	82.46

Los resultados para las especies seleccionadas descritas en el apartado anterior indican que la dosis de arsénico a la cual se encuentran expuestas las aves, representa un riesgo no aceptable para ellas. Para realizar la evaluación de riesgo ecológico se seleccionaron un ave y un mamífero los resultados se pueden observar en el Anexo 3.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Inicialmente se llevó a cabo una recopilación exhaustiva en cuanto a la legislación ambiental vigente de zonas mineras para la regulación de ejecución de proyectos mineros en países como Brasil, Chile, Ecuador, México y Perú, lo cual permitió conocer los estándares que mantiene la región debido a la clasificación de sus zonas mineras. La legislación aplicada a drenaje ácido de mina se reflejó solamente en países como Canadá y México, se considera que se deben incrementar los esfuerzos para regular la gestión de los residuos generados por dicha actividad.
- Con respecto en lo que se refiere al paquete computacional SADA para la evaluación de riesgo a la salud y al ambiente, se encontró que el uso de este programa permite llevar a cabo el análisis de sitios de zonas de difícil acceso con la ventaja que cuenta con bibliotecas de datos y metodologías de cálculo aprobadas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América.
- Se realizó la revisión de estudios relacionados con la generación del drenaje ácido de mina (DAM) en México para la selección de un escenario que permitió la aplicación del análisis de riesgo utilizando el software SADA con la base de datos actualizada al año 2014 de IRIS que contiene la evidencia toxicológica de los elementos integrados en el drenaje ácido como Pb, Cd y As, lo que evita la realización de los estudios toxicológicos ahorrando recursos y tiempo además ha sido aplicado para estudios de evaluación de riesgos ecológicos en suelos contaminados en diferentes países (España, Ecuador, Estados Unidos de América y México).
- Se pudo encontrar que la concentración total de Pb 2822 mg/kg en la muestra de la zona 3 comparada con la concentración de referencia de la NOM -147-SEMARNAT-SSA1-2004 representa un riesgo a la salud estos valores corroboran los resultados de SADA 1.1E-05 para uso de suelo agrícola, la exposición continua ataca al sistema nervioso central.
- Se estimó el posible riesgo de los elementos seleccionados que conforman el DAM de la población cercana de las zonas 1 y 2. Los resultados muestran que para la zona 1 que los elementos Pb 5.9E-05, Cd 7.3E-01 y As 4.20E-02 para uso de suelo agrícola, para uso industrial Pb 1.2E-05, As 1.1E-02 y Cd 5.2E-0. Para la zona 2, Pb 1.1E-05, As 1.20E-02 para uso agrícola, para uso industrial Pb 2.3E-06, As 4.9E-03 demuestran que existe un potencial riesgo cuantitativo

- La población expuesta para la zona 1 y 2 es constituida por las personas que residen en las cercanías del lugar que son principalmente trabajadores de las empresas mineras de permanencia temporal los resultados demuestran que se deben tomar medidas de gestión a la exposición por Pb, Cd y As, como realizar la remediación del sitio, establecer políticas municipales para la gestión de jales mineros, o establecer controles por parte de la autoridad ambiental aplicable.
- En cuanto a la evaluación para el riesgo ecológico del SADA, de la revisión de dichas bases se consideraron 4 especies de aves y 3 de mamíferos aplicables a la zona de Zimapán, lo que permitió establecer que existe la probabilidad de riesgo para dichas especies, a dosis mayores 283.67 mg/Kg para arsénico, de que su población sufra desordenes neurológicos, inmunológicos y reproductivos.
- Así mismo se compararon los resultados de los escenarios seleccionados con la NOM-147-SEMARNAT/SS1-2204 aplicable a los criterios de uso de suelo (residencial, agrícola e industrial) para la determinación del porcentaje de desviación de los límites máximos permisibles, hallándose que las concentraciones totales de los elementos Pb, Cd y As sobrepasan los límites máximos establecidos para todos los escenarios en las zonas 1 y 2. Sin embargo, las concentraciones biodisponibles estudiadas en la zona 2 no presentan toxicidad de acuerdo a estudios previos (García, 2017) ; en cuanto a la zona 1 no existen evidencias de toxicidad según (Tovar, 2009).
- De acuerdo con la hipótesis planteada se acepta para las zonas 1 y 2 donde los datos fueron tomados de trabajos previos ya que según la clasificación de la generación de DAM entran en la categoría tipo III. Esta hipótesis es rechazada para la muestra de la zona 3, debido a que los valores obtenidos de la determinación del PN/PA demostraron que existe una mayor concentración de carbonatos, información que se corrobora con la difracción de rayos x que demuestra una predominancia de calcita (CaCO_3), lo que se traduce en la ausencia de drenaje ácido de mina.
- Según lo indicado en la hipótesis planteada para la aplicación del programa SADA los valores obtenidos para el riesgo a la salud de la zona 1 $7.5\text{E}-02$, zona 2 $1.2\text{E}-02$ y zona 3, se acepta la hipótesis debido a que los valores obtenidos, ameritan una gestión del riesgo a la salud.
- Para el riesgo ecológico se seleccionaron las especies que se encuentran en las zonas de estudio del distrito minero de Zimapán que son: Zenaida macroura, Buteo jamaicensis y Athene cunicularia. Los resultados de la comparación del

SADA con los valores de referencia toxicológicos evidencian que existe un riesgo potencial de tener problemas reproductivos y neurológicos a los 133.64 mg/kg para las especies expuestas a Pb, Cd y As.

Recomendaciones

- Una de las oportunidades del uso exitoso del SADA para aplicarlo en estudios de determinación de riesgo ecológico es particularizar las bases de datos del programa para las zonas de interés.
- Así mismo se recomienda que para la determinación de riesgo ecológico utilizando el paquete computacional SADA es necesario el establecimiento de las dosis toxicológicas de las especies de la zona ya que se pueden realizar mapas de dosis de afectación por cada tipo de especie.

REFERENCIAS

- Acharya, B. S., y Kharel, G. (2020). Acid mine drainage from coal mining in the United States – An overview. *Journal of Hydrology*, 588. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125061>
- Aduvire, O. (1991). Drenaje Ácido de Mina. Generación y Tratamiento. *Instituto Geológico y Minero de España*, 51.
- Alister, C., y Kogan, M. (2006). ERI: Environmental risk index. A simple proposal to select agrochemicals for agricultural use. *Crop Protection*, 25(3), 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.04.006>
- Alvarenga, P., Guerreiro, N., Sim, I., y Jos, M. (2021). Drainage on Surface Water , Stream Sediments , and Macrophytes Using a Battery of Chemical and Ecological Indicators. *Water (Switzerland)*, 13(1436), 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w13101436>
- Alvarenga, P., Palma, P., De Varennes, A., y Cunha-Queda, A. C. (2012). A contribution towards the risk assessment of soils from the São Domingos Mine (Portugal): Chemical, microbial and ecotoxicological indicators. *Environmental Pollution*, 161, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.09.044>
- Armienta, M., Rodriguez, C., Ongley, L., Brust, H., Morales, F., Aguayo, A., Cruz, O., y Cenicerros, N. (2007). Origin and fate of arsenic in a historic mining area of Mexico. *Arsenic in Soil and Groundwater Environment - Biogeochemical Interactions, Health Effects and Remediation*, 9(06), 473–498. [https://doi.org/10.1016/s0927-5215\(06\)09018-7](https://doi.org/10.1016/s0927-5215(06)09018-7)
- Armienta, M., y Rodríguez, R. (2004). El agua en México vista desde la academia. En B. Jiménez & L. Marín (Eds.), *Science Academy* (Edición di). Academia Mexicana de Ciencias. http://132.248.9.9/libroe_2007/1013589/A05.pdf
- Armienta, M., Villaseñor, G., Cruz, O., Cenicerros, N., Aguayo, A., y Morton, O. (2012). Applied Geochemical processes and mobilization of toxic metals and metalloids in an As-rich base metal waste pile in Zimapán , Central Mexico. *Applied Geochemistry*, 27(11), 2225–2237. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.01.015>
- ATSDR. (2008). ToxFAQs sobre el cadmio. *Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades. Health and Human Services*, 2. https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts5.pdf

- Azpeitia, A. (2007). *Minerales de los distritos mineros metálicos Zimapán, Pachuca-Real del Monte, Molango y su aplicación didáctica* [Universidad Nacional Autónoma de México]. En *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Minero-Metalúrgica*. [http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/325/1/Minerales de los distritos mineros metalicos Zimapan.pdf](http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/231104/325/1/Minerales%20de%20los%20distritos%20mineros%20metalicos%20Zimapan.pdf)
- Brandão, T., Bastidas, K., y Weiler, J. (2020). Acid mine drainage (AMD) treatment by neutralization: Evaluation of physical-chemical performance and ecotoxicological effects on zebrafish (*Danio rerio*) development.pdf. *Chemosphere*, 253, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126665> 0045-6535
- Carrillo, M., y Suter, M. (1982). *Libro-Guía de la excursión geológica a la región de Zimapán y áreas circundantes, Estados de Hidalgo y Querétaro* (J. T. Bodet (ed.); Primera Ed). Sociedad Geológica Mexicana. https://www.researchgate.net/publication/261099417_Tectonica_de_los_alrededores_de_Zimapan_Hidalgo_y_Queretaro_Libro_guia_de_la_excursion_geologica_de_la_region_de_Zimapan
- Cervantes, A. (2014). *Caracterización del drenaje ácido y de las rocas asociadas a una mina para evaluar su posible aplicación en un sistema de tratamiento pasivo* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Caracterización-del-drenaje-ácido-y-de-las-rocas-a-Macedo-Haydee/ab01096e9afc400d3bbd9a813add87c875e8b615>
- Ceto, N., y Mahmud, S. (2000). Abandoned Mine Site Characterization and Cleanup Handbook. *United States Environmental Protection Agency, August*, 129 p.
- CONAGUA. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zimapán (1301), Estado de Hidalgo* (Número 1113). https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/hidalgo/DR_1301.pdf
- Cortés, E. (2018). *Evaluación integrada de riesgo ambiental en el municipio de Zimapán, Hidalgo* [Universidad Nacional Autónoma de México]. https://repositorio.unam.mx/contenidos/evaluacion-integrada-de-riesgo-ambiental-en-el-municipio-de-zimapan-hidalgo-3497512?c=pQvQg0&d=false&q=*&i=1&v=1&t=search_0&as=0
- Covarrubias, S. A., y Peña Cabriales, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 7–21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>

- DOF. (2000). Reglamento De La Ley General Del Equilibrio Ecológico Y La Protección Al Ambiente En Materia De Evaluación Del Impacto Ambiental. *Diario Oficial de la Federación*, 1–19. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGEEPA_MEIA_311014.pdf
- DOF. (2013). Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección del Medio Ambiente. *Diario Oficial de la Federación*, 17. <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/protocolo/LGEEPA.pdf%0Ahttps://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/protocolo/LGEEPA.pdf%0Ahttp://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFs/148.pdf>
- DOF. (2020). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. *Diario Oficial de la Federación*, 1–194. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1_241220.pdf
- Dold, B. (2003). Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulfide mine waste. *Journal of Geochemical Exploration*, 80(1), 55–68. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(03\)00182-1](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(03)00182-1)
- Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014>
- Downing, B. W. (2014). The Microbiology of Acid Drainage. *Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils: Causes, Assessment, Prediction, Prevention, and Remediation*, 9780470487, 61–65. <https://doi.org/10.1002/9781118749197.CH5>
- Duarte, V.-M. (2013). *Origen y distribución espacial de metales pesados en suelos de Zimapán, Hidalgo*. [Colegio de Postgraduados , Campus Montecillo]. <http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/1995>
- Favas, P. J. C., Pratas, J., y Gomes, M. E. P. (2012). Hydrochemistry of superficial waters in the Adoria mine area (Northern Portugal): Environmental implications. *Environmental Earth Sciences*, 65(1), 363–372. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1097-6>
- Favas, P. J. C., Sarkar, S. K., Rakshit, D., Venkatachalam, P., y Prasad, M. N. V. (2016). Acid Mine Drainages From Abandoned Mines: Hydrochemistry, Environmental Impact, Resource Recovery, and Prevention of Pollution. En *Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00017-2>
- Fernández-Caliani, J. C., Giráldez, M. I., y Barba-Brioso, C. (2019). Oral bioaccessibility

- and human health risk assessment of trace elements in agricultural soils impacted by acid mine drainage. *Chemosphere*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124441>
- Galarza, J. L. S. (2017). *Simulación acelerada de intemperismos de jales de una planta de beneficio para la estimación de drenaje ácido.pdf* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2017/enero/0754269/Index.html>
- Galvez, R., Martín, A. de S., Ouattara, A., y Martin, E. U. (2018). 8.8.2. *Potential Environmental Impacts. Handbook of Environmental Engineering*. McGraw-Hill Education. <https://www-accessengineeringlibrary-com.pbidi.unam.mx:2443/content/book/9781259860225/toc-chapter/chapter40/section/section3>
- García. (2018). *Evaluación de la ecotoxicidad de lixiviado de jales utilizando embriones de Danio rerio como organismo de prueba*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, S. (2013). *Modelación del Potencial de Drenaje Ácido de Botaderos - Calibración a partir de celdas húmedas y granulometría*. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/113400/cf-garcia_sc.pdf?sequence=1
- Gilles, T., y Charlene, H. (2014). *The International Network for Acid Prevention: Global Acid Rock Drainage Guide*. https://www.researchgate.net/publication/226280864_The_global_acid_rock_drainage_guide_GARD_Guide
- GMZ. (2016). Plan Municipal de Desarrollo Zimapán 2016-2020. *Gobierno Municipal de Zimapán*, 1–122. <http://www.invedem.gob.mx/files/2014/02/ifm-pmd-zongolica-08-10.pdf>
- Guadarrama, P. (2019). *Caracterización y análisis de riesgo de los jales de una zona minera del estado de Durango, México* (p. 94). <http://132.248.9.195/ptd2019/septiembre/0795279/Index.html>
- Hernández, Y., y Rodríguez, P. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos Tropicales*, 40(3), 19. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362019000400009&lng=es&tlng=es.
- Iglesias, A. M. (2009). *Efecto de arsénico y plomo en la salud de aves silvestres de matorral micrófilo subinermes de la región minera Villa de la Paz.pdf* [Universidad

- Nacional Autónoma de México].
<http://132.248.9.195/ptd2009/marzo/0640574/Index.html>
- Ilizaliturri, C. A., González-Mille, D., Pelallo, N. A., Domínguez, G., Mejía-saavedra, J., Dosal, A. T., Iván Pérez-Maldonado, Batres, L., Díaz-Barriga, F., y Espinosa-Reyes, G. (2009). Revisión de las metodologías sobre evaluación de riesgos en salud para el estudio de comunidades vulnerables en América Latina. *Interciencia*, 34(10), 710–717.
- INE, y SEMARNAT. (2010). *Introducción al análisis de riesgos ambientales* (L. R.-B. Miriam Zuk (ed.); Segunda Ed). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/E50951BDD32362E005257D4D0074F7D1/\\$FILE/IntroducciónAlAnálisisDeRiesgosAmbientales.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/E50951BDD32362E005257D4D0074F7D1/$FILE/IntroducciónAlAnálisisDeRiesgosAmbientales.pdf)
- INEGI. (2020). *Estados Unidos Mexicanos. Presentación de resultados (resumen ejecutivo) . Censo de Población y Vivienda 2020*.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/cpv2020_pres_res_hgo.pdf
- IRMA. (2020). *Evaluación de operación minera informe público resumido*.
<https://responsiblemining.net/wp-content/uploads/2020/11/Mina-Zimapán-de-Carrizal-Informe-Resumido-de-Auditoría-Oct2020ES.pdf>
- Jordanova, N., Jordanova, D., Liu, Q., Hu, P., Petrov, P., y Petrovský, E. (2013). Soil formation and mineralogy of a Rhodic Luvisol - insights from magnetic and geochemical studies. *Global and Planetary Change*, 110, 397–413.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.08.020>
- Kaifer, M., y Aguilar, A. (2006). Guía de análisis de riesgos para la salud humana y los ecosistemas. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 1(1), 1–64.
http://www.nutricion.org/publicaciones/pdf/prejuicios_y_verdades_sobre_grasas.pdf
<https://www.cholesterolfamiliar.org/formacion/guia.pdf>
<https://www.cholesterolfamiliar.org/wp-content/uploads/2015/05/guia.pdf>
- Karagüzel, Ören, Şahbaz, et al. (2020). Prediction of acid mine drainage potential of dump site.pdf. *Arabian Journal of Geosciences*, 14. <https://doi.org/https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/s12517-020-06220-x>
- Labastida, I., Armienta, M., Lara-castro, R. H., Aguayo, A., Cruz, O., y Cenicerros, N. (2013). Treatment of mining acidic leachates with indigenous limestone , Zimapan

- Mexico. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 1187–1195.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.006>
- Lee, J., Chon, H., y Kim, K. (2005). *Human risk assessment of As , Cd , Cu and Zn in the abandoned metal mine site*. 185–191. <https://doi.org/10.1007/s10653-005-0131-6>
- Lin, S. L. (2013). *Medición del Potencial de Generación de Agua Ácida para un Relave en la Zona Central del Perú y sus Necesidades de neutralización*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Londoño, L. F., Londoño Muñoz, P. T., y Muñoz Garcia, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteconología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145–153.
[https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)
- Lottermoser, B. (2007). Sulfidic Mine Wastes. En *Mine Wastes* (Third, pp. 31–82). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05133-7_2
- Lu, J. (2021). Ecological risk assessment of heavy metal contamination of mining area soil based on land type changes: An information network environment analysis. *Ecological Modelling*, 455(December 2020), 109633.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109633>
- Manan, T. S. B., Khan, T., Wan Mohtar, W. H. M., Beddu, S., Qazi, S., Sheikh Khozani, Z., Mohd Kamal, N. L., Sarwono, A., Jusoh, H., Yavari, S., Mustafa, S. F. Z., Hanafiah, Z., Mohd Zaid, H. F., Machmudah, A., Isa, M. H., Ahmad, A., y Ghanim, A. A. J. (2021). Ecological and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Sungai Perak, Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126124>
- Marcomini, A., Sutter II, G. W., y Critto, A. (2009). Environmental Risk Assessment. En A. Critto & G. W. Sutter II (Eds.), *Decision Support Systems for Risk - Based Management of Contaminated Sites* (First, p. 446). Springer Science. https://doi.org/10.1007/978-0-387-09722-0_2
- Marteles, M., Bergua, B., Arraiga, B., y Cabeza, M. (2007). Intoxicación por plomo. *Medicina Clínica*, 129(15), 600.
<https://sisbib.unmsm.edu.pe/BVrevistas/spmi/v18n1/pdf/a05v18n1.pdf>
- Mihelcic, J., y Zimmerman, J. (2006). *Ingeniería ambiental Fundamentos, sustentabilidad, di* (A. G. Editor (ed.); First Edit). Alfa y Omega. <http://www.alfaomega.com.mx>

- Moeng, K. (2019). Community perceptions on the health risks of acid mine drainage: the environmental justice struggles of communities near mining fields. *Environment, Development and Sustainability*, 21(6), 2619–2640. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0149-4>
- Morales-Arredondo, J. (2022). *Journal of South American Earth Sciences Hydrogeochemical behavior of Ba , B , Rb , and Sr in an urban aquifer located in central Mexico and its environmental implications*. 116(March). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103870>
- Moreno. (2013). Influencia de los minerales de los jales en la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, zinc y cadmio en el distrito minero Zimapán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 191–200. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000300003
- Moreno, E. (2018). *Evaluación de la peligrosidad de jales mineros por su capacidad para generar drenaje ácido en una mina de hierro.pdf* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2018/agosto/0777871/Index.html>
- Moreno, R. (2009). Neoformación mineralógica en residuos mineros (jales) del distrito minero Zimapán, estado de Hidalgo, México. *Minería y Geología*, 25(2), 31.
- Morin, K., y Hutt, N. (2001). *Environmental Geochemistry of Minesite Drainage: Practical Theory and Case Studies* (First). MDAG Publishing. <https://www.mdag.com/book.html>
- Morman, G. (2011). Mine wastes and Human Health. *Elements an International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 7(6), 6. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05133-7>
- Neris, J., Olivares, D., Velasco, F., Luzardo, F., Correia, L., y González, L. (2019). HHRISK: A code for assessment of human health risk due to environmental chemical pollution. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170(September 2018), 538–547. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.017>
- Norton, S. B., Rodier, D. J., van der Schalie, W. H., Wood, W. P., Slimak, M. W., y Gentile, J. H. (1992). A framework for ecological risk assessment at the USEPA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 11(12), 1663–1672. <https://doi.org/10.1002/etc.5620111202>
- Olmedo, M. (2016). *La Evaluación de Riesgos en Salud. Guía metodológica. Aplicaciones prácticas de la metodología de Evaluación de riesgos en salud por*

- exposición a químicos* (Número November).
- Ordoñez, J. (2022). *Zimapán lista de aves - Avibase - Listas de Aves del Mundo*.
<https://avibase.bsc-eoc.org/checklist.jsp?lang=ES&p2=1&list=clements&synlang=ES®ion=MXhizi&version=text&lifelists=&highlight=0>
- Ornelas, M., Reza, S., y Romieu, I. (2007). Salud y deporte. *Tecnociencia Chihuahua*, 430(614), 26–35. <https://vocero.uach.mx/index.php/tecnociencia/article/view/33>
- Pat- Espadas, A. (2018). Review of constructed wetlands for acid mine drainage treatment. *Water (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/w10111685>
- Plante, B., Schudel, G., y Benzaazoua, M. (1988). Prediction of Acid Mine Drainage. *Hard Rock Mine Reclamation*, 21–46. <https://doi.org/10.1201/9781315166698/-2>
- Portillo, J. L. (2014). Ley Orgánica de la Administración Pública Federal. *In q3-4. (n.d.), 78. Gaceta del Senado. (2016). Ley General de Bienestar Animal TÍTULO I Disposiciones Generales Capítulo I Del objeto de la Ley, 1–23. Retrieved from http://www.senado.gob.mx/64/gaceta_del_senado/documento/60630 Diputados, C. De, Congreso, 1–99.*
- PROFEPA. (2015). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. Diario Oficial de la Federación. *Procuraduría Federal de Protección al Ambiente*, 1–52. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6633/1/nom-161-semarnat-2011.pdf>
- Reyes, A. M. (2009). *Caracterización fisicoquímica de jales mineros y evaluación de biosólidos como propuesta de remediación*. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.
- Rivera, M. Y., Romero, F. M., Sedov, S., y Solleiro Rebolledo, E. (2020). Carbonatos pedogénicos para el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM). Experimentos de laboratorio. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1), 1–17. <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a250919>
- Rosales, M. Á. (2019). *Desarrollo y evaluación de sistemas en columna para el tratamiento de drenaje ácido de mina en Zimapán, Hidalgo*. [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2019/agosto/0793345/Index.html>
- Salas, F. (2020). Predicción De Drenaje Ácido De Mina, Jales De La Mina La Prieta, Chihuahua, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 825–834. <https://doi.org/10.20937/rica.53523>

- Salas, F., Guadarrama, P., García, N., Fernández, G., Alarcón, M. T., y Gutiérrez, J. (2020). Determinación de Posible Drenaje Ácido de Mina y Caracterización de Jales Mineros provenientes de la Mina Cerro de Mercado, Durango, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 729–744. <https://doi.org/10.20937/rica.53461>
- Sarmiento, M. (2014). *Estudio de la contaminación por drenajes ácidos de mina de las aguas superficiales en la cuenca del río Odiel (SO) España* (Número December 2016) [Universidad de Huelva]. <http://www.researcherid.com/rid/l-2366-2012>
- Schmiermund, R., y Drozd, M. (1997). ACID MINE DRAINAGE AND OTHER. En J. J. Marcus (Ed.), *Mining Environmental Handbook. Effect of Mining on the Environment and American Environmental Control on Mining* (First, p. 745). Imperial College Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1142/9781860943768_0013
- Semarnat. (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. En *Diario Oficial de la Federación* (pp. 1–32). Viernes 23 de junio de 2006. <http://www.economia-noms.gob.mx/normas/noms/2006/052semarnat.pdf>
- SEMARNAT. (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Secretaría de Medio Ambiente, recursos naturales y pesca*, 1–36. <http://132.248.65.10/infjur/leg/docleg/fed/indices/2000/oct/26102000.pdf>
- SEMARNAT. (2003). Nom-141-Semarnat-2003. En *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* (pp. 1–52). 2003. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1317/1/nom-141-semarnat-2003.pdf>
- SEMARNAT. (2007). NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. En *Diario Oficial de la Federación* (pp. 35–96). <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/402/cuencas.html>
- SEMARNAT, y INEC. (2003). *Introducción al análisis de riesgos ambientales* (R. M. del Pont Lalli (ed.); Primera ed, p. 128). Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). <https://crstinacortinas.org/sustentabilidad/download/introduccion-al-analisis-de-riesgos-ambientales-semarnat-ine/>
- SGM. (2020). Anuario estadístico de la minería mexicana, 2019. *Servicio Geológico Mexicano*, 49, 555. http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2019_Edicion_2020.pdf
- SGM. (2021). Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2020. *Servicio Geológico*

- Mexicano*, 249. <https://www.gob.mx/sgm/articulos/consulta-el-anuario-estadistico-de-la-mineria-mexicana>
- Stewart, R., y Purucker, T. (2006). SADA: A freeware decision support tool integrating GIS, sample design, spatial modeling, and risk assessment. *Proceedings of the iEMSs 3rd Biennial Meeting, " Summit on Environmental Modelling and Software"*. https://www.researchgate.net/publication/255586959_SADA_A_Freeware_Decision_Support_Tool_Integrating_GIS_Sample_design_Spatial_Modeling_and_Risk_Assessment
- Stewart, R., y Purucker, T. (2011). An environmental decision support system for spatial assessment and selective remediation. *Environmental Modelling and Software*, 26(6), 751–760. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.12.010>
- Stezar, I. C., Pizzol, L., Critto, A., Ozunu, A., y Marcomini, A. (2013). Comparison of risk-based decision-support systems for brownfield site rehabilitation: DESYRE and SADA applied to a Romanian case study. *Journal of Environmental Management*, 131, 383–393. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.022>
- Tomiya, S., Igarashi, T., Tabelin, C. B., Tangviroon, P., y Li, H. (2019). Acid mine drainage sources and hydrogeochemistry at the Yatani mine, Yamagata, Japan: A geochemical and isotopic study. *Journal of Contaminant Hydrology*, 225(January), 103502. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2019.103502>
- USEPA. (1991). Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I Human Health Evaluation Manual (Part A). *United States Environmental Protection Agency (USEPA)*, 1(December), 289. <https://doi.org/EPA/540/1-89/002>
- USEPA. (1994). Technical Document Background for Nepa Reviewers : *United States Environmental Protection Agency (USEPA)*, December. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/2000EF52.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1991+Thru+1994&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>
- USEPA. (2004). Integrated Risk Information System: Lead. *United States Environmental Protection Agency (USEPA)*, 1–15. https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=277
- USEPA. (2011). Volumen II Apéndices Guía de Revisión Técnica de EIA: Minería No Metálica y Metálica Documento Regional preparado bajo El Programa de Cooperación Ambiental CAFTA-DR para Fortalecer la Revisión de la Evaluación de

- Impacto Ambiental (EIA). *United States Environmental Protection Agency (USEPA)*. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100E0QQ.TXT>
- USEPA. (2014). Update of Standard Default Exposure Factors. *United States Environmental Agency (USEPA), Risk Assessment, 2004*(July 2004), 6. <https://www.epa.gov/risk/update-standard-default-exposure-factors>
- USEPA, y IRIS. (2003). Benzene; CASRN 71-43-2. *Integrated Risk Information System (IRIS) Chemical Assessment Summary United States Environmental Protection Agency (USEPA)*, 1–43.
- Vallejo, O. (2015). Efecto de la dispersión hídrica de arsénico, cadmio y plomo en la calidad de los sedimentos y agua superficial de la microcuenca San Miguel, Zimapán. En *Instituto Politécnico Nacional Centro Interdisciplinario De Investigaciones Y Estudios Sobre Medio Ambiente Y Desarrollo*. Instituto Politécnico Nacional.
- Wang, Z., Xu, Y., Zhang, Z., y Zhang, Y. (2021). Review : Acid Mine Drainage (AMD) in Abandoned Coal Mines. *Water*, 1–22. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.3390/w13010008>
- WHO. (1980). Límites de exposición profesional a los metales pesados que se recomiendan por razones de salud. En *World Health Organization* (Vol. 647, Número 126). http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/41251/1/WHO%7B_%7DTRS%7B_%7D647%7B_%7Dspa.pdf
- Wu, J. (2021). Ecological risk assessment of coal mine area based on “source-sink” landscape theory – A case study of Pingshuo mining area. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126371>
- Yépez, J. (2021). *Modelación matemática del riesgo por contaminación de suelos por metales pesados en Ecuador* [Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/174774/Yopez - Modelacion matematica del riesgo por contaminacion de suelos por metales pesados en Ecuador.pdf?sequence=1>
- Zúñiga, D. (2019). *Evidencias de dispersión de jales mineros sobre un transecto en suelos de la región de Zimapán Hidalgo* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3441397>

ANEXOS

Anexo 1 Imágenes del Microscopio de barrido electrónico

El análisis realizado en el microscopio de barrido electrónico permitió observar la presencia de elementos como carbono, calcio y silicio como se puede observar en la Figura 1.

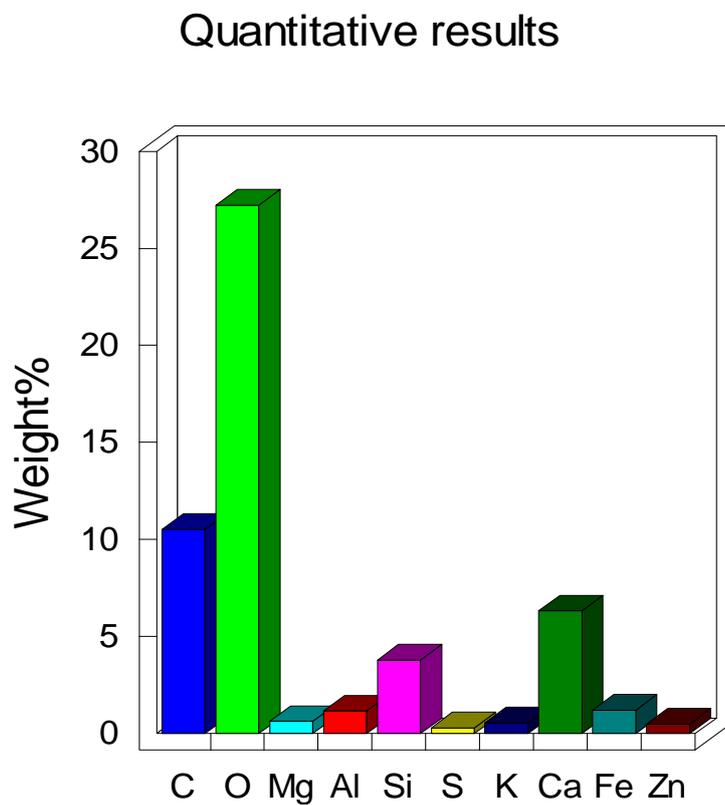


Figura 1 Análisis cuantitativo del contenido de elementos en la M1.

Anexo 2 Gráficas del análisis de Infrarrojo

En la Figura 2 se pueden observar los espectros identificados mediante el análisis infrarrojo.

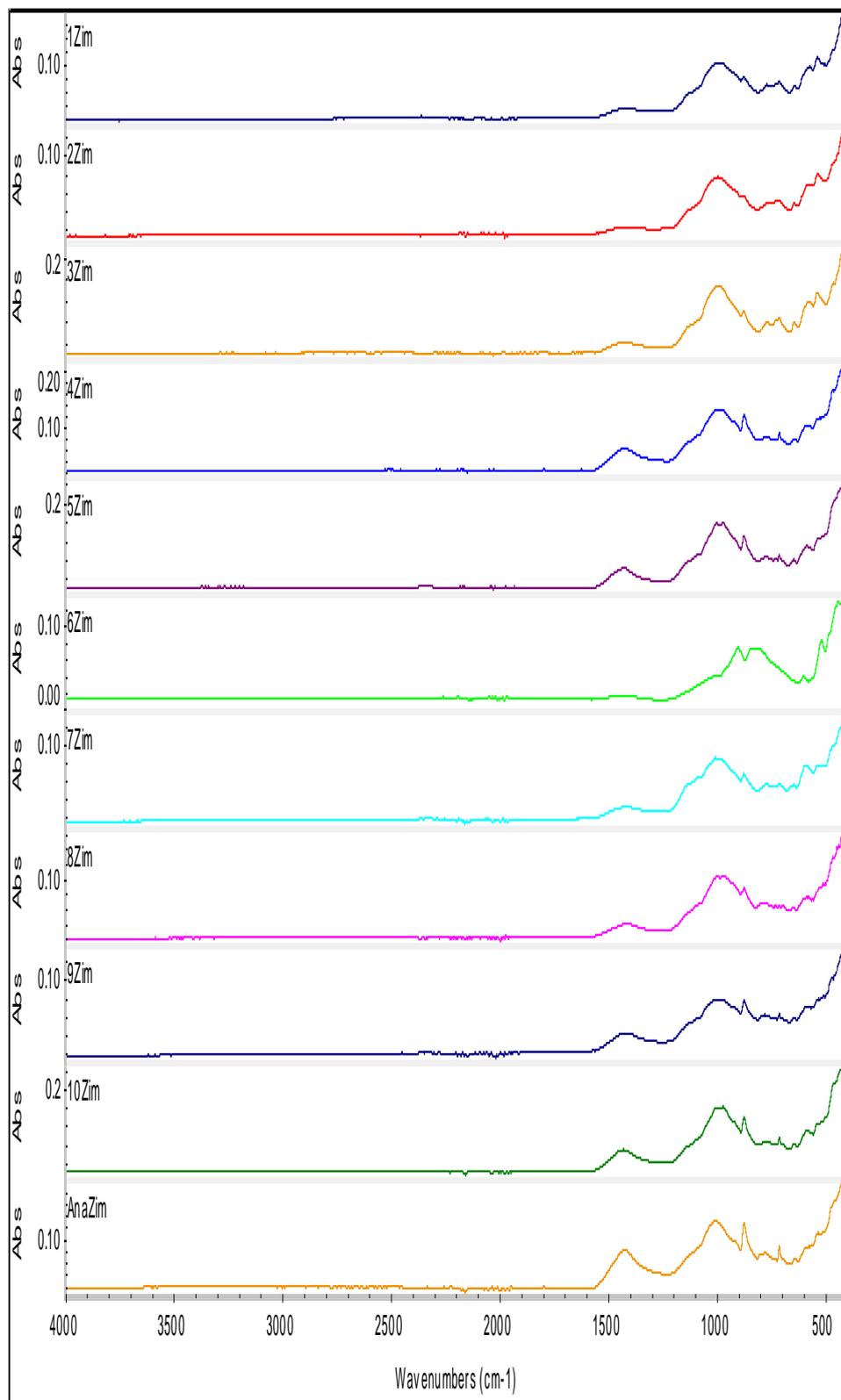


Figura 2 Espectros de los grupos funcionales hallados en el IR.

Anexo 3 Mapas de interpolación de riesgo ecológico

En los mapas de las Figuras 3 y 4 se muestran la dispersión del riesgo para las especies animales de las zonas seleccionadas de Zimapán.

Evaluación de riesgo ecológico por contacto del Busardo Colirrojo

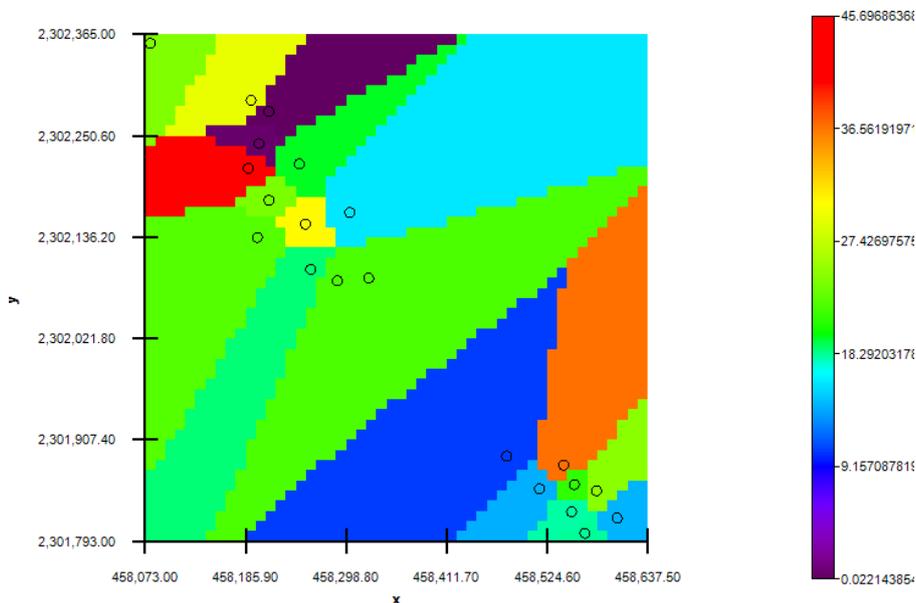


Figura 3 Interpolación de riesgo a la salud por la exposición a As del Busardo colirrojo.

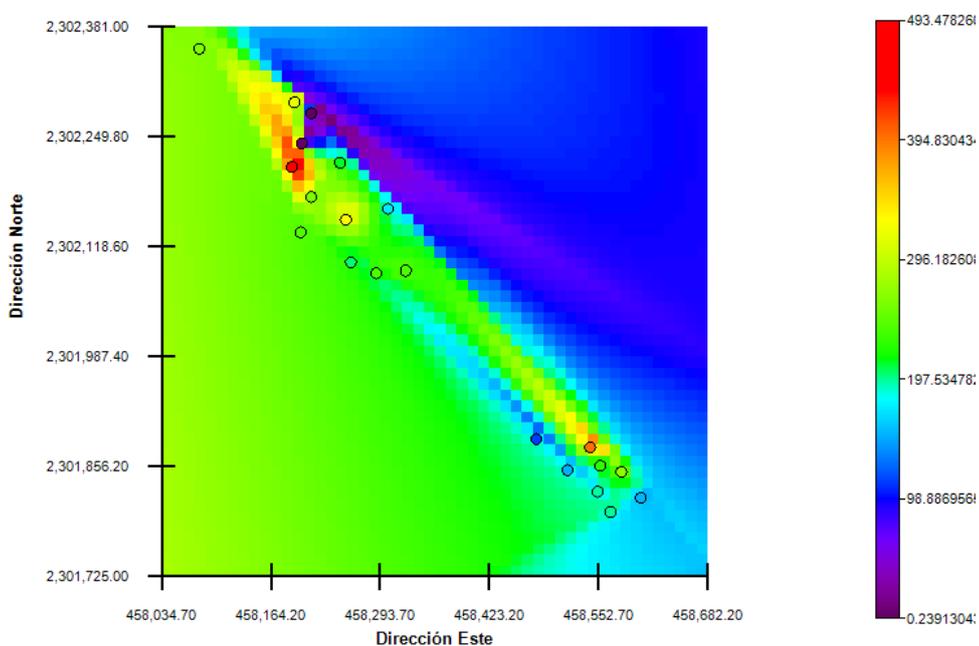


Figura 4 Interpolación de riesgo a la salud por la exposición a As de la base de datos Eco-SS mamíferos.

Anexo 4 Análisis de difracción de Rayos X y micrografías de la muestra de jales de la Zona 3

Los análisis de DRX fueron llevados a cabo por el Dr. Francisco Raúl Barrientos Hernández en el laboratorio de Difracción de Rayos X del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales (AACTyM), del cual es responsable. Se tomaron dos submuestras estratificadas antes del cuarteo, una muestra obtenida en 2015 de una de las presas de jales de la misma planta de beneficio y la muestra homogeneizada utilizada para el resto de los análisis, con fines de para comparación. Las muestras se corrieron por 30 minutos en un difractómetro modelo Equinox 2000, marca Inel, con tubo de cobre y detector de 110 grados, que utiliza una mezcla de gases argón –etano (Figura 3.1). La identificación de minerales en los difractogramas fue realizada con el software Match Versión 2 (Cristal Impact, 2003-20015). Las micrografías fueron obtenidas con un microscopio digital USB de 1000x, mod. Microscopio-100, marca Steren (Figura 3.2) con la colaboración del Dr. Emiliano Moreno Pérez, profesor de la Licenciatura en Ingeniería Civil del Área Académica de Ingeniería y Arquitectura y de la ya citada AACTyM. A continuación, se muestran los difractogramas y la descripción mineralógica de las muestras.



Figura 3.1 difractómetro modelo Equinox 2000



Figura 3.2 Microscopio Steren

MUESTRA 1

Esta muestra corresponde a la fracción fina del jal analizado. En la Figura 3.3 se muestra el difractograma correspondiente. En esta se muestra predominan, en proporción superior al 10%, feldespatos como la sanidina KAISi_3O_8 , microclina y ortoclasa, así como cuarzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), calcita dolomitizada y piroxenos

como la hiperstena y la pigeonita. En menor proporción se detectaron arsenopirita (FeAsS) y Macfallita $\text{Ca}_2\text{Mn}_3^{3+}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_3$. Los minerales minoritarios presentes son alactita ($\text{Mn}^{2+}_7(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_8$), freibertia, pirita (FeS_2), galena (PbS), grosularita-andradita, argentita (Ag_2S) y esfalerita (ZnS).

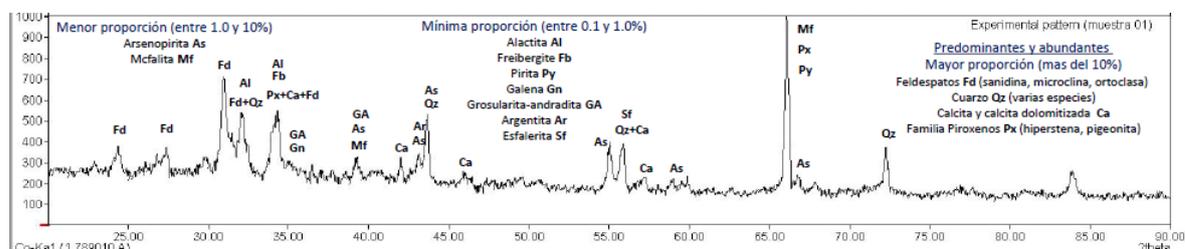


Figura 3.3. Diffractograma de la muestra 1, correspondiente a la fracción fina del jal

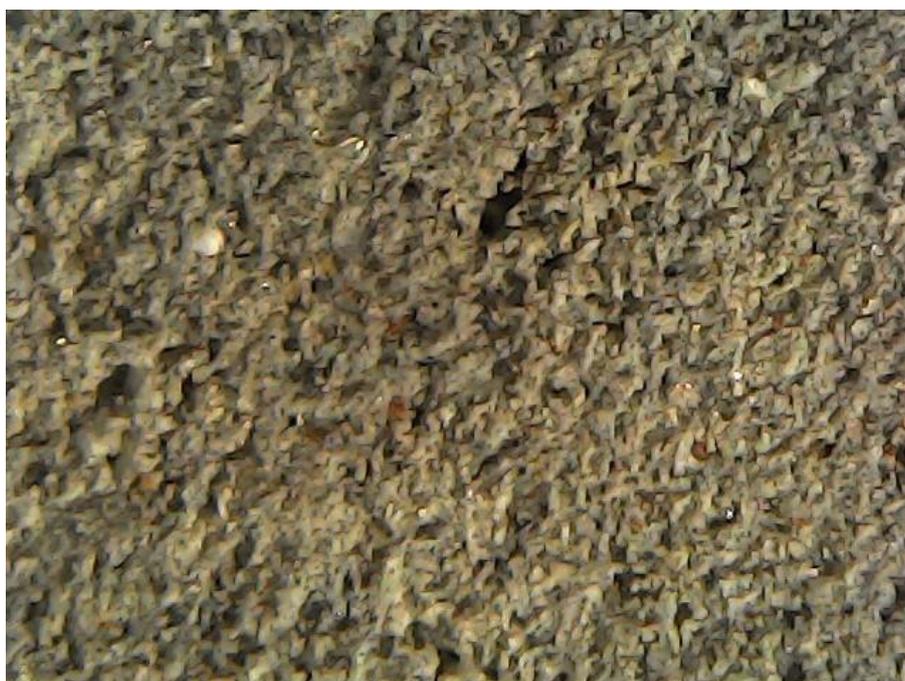


Figura 3.4. Micrografía de la muestra 1 correspondiente a la fracción fina del jal

MUESTRA 1-2

En la Figura 3.5 se presenta el diffractograma de la fracción gruesa muestra no homogenizada, en la que predominan los piroxenos, principalmente como wollastonita ($\text{CaSiO}_3 - \text{Ca}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]$) y también se encontraron hedenbergita ($\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$) y enstatita ($\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$). En proporción menor al 10% se encuentra la ardennita

$((Mn^{2+},Ca,Mg)_4(Al,Mg,Fe)_6(SiO_4)_2(Si_3O_{10})(AsO_4,VO_4)(OH)_6)$. En la Figura 3.6 se muestra la micrografía obtenida con un microscopio digital USB de 1000x (mod. Microscopio-100, marca Steren). En esta se observan minerales blanquecinos que corresponden principalmente a la wollastonita. Los minerales oscuros pueden corresponder a los otros piroxenos y los minerales rojizos pueden corresponder a la ardennita y también a oxihidróxidos de hierro. Finalmente, los minerales brillantes minoritarios son los de carácter metálico, pudiendo tratarse de esfalerita, galena, pirita y arsenopirita, en proporción no detectable por el difractómetro.

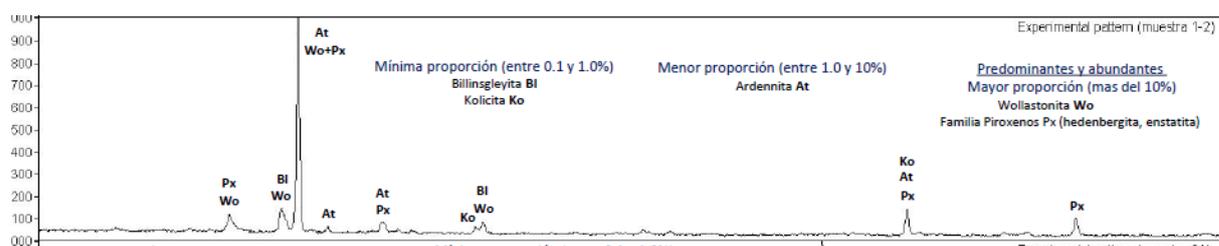


Figura 3.5. Difractograma de la muestra no homogeneizada



Figura 3.6. Micrografía de la muestra 1-2 correspondiente a la fracción gruesa

MUESTRA 3

La muestra 3 corresponde al jal homogeneizado. En la Figura 3.7 se presenta el difractograma con la cuantificación realizada. Se encontró la calcita ($CaCO_3$) como

mineral predominante, con una abundancia del 48.1%. Los siguientes minerales en abundancia fueron la nefelina ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) (18.1%) y la goethita $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$ (16.1%). En proporción menor al 10% y mayor al 1% se identificaron billingsleyita (Ag_7AsS_6) (8.7%), cristobalita (4.6%) y cuarzo (SiO_2) (3.9%). Como mineral minoritario principal se encontró esfalerita (ZnS) (0.5%). Se detectó también manganberzelita. Estos resultados confirman y amplían con detalle los reportados en los análisis de infrarrojo. Asimismo, explican que en el análisis elemental se haya encontrado azufre total en una concentración menor al 1%. La alta concentración de cuarzo y otros silicatos provocó interferencia en el análisis de sulfatos, sin embargo, se puede concluir que los jales depositados en la presa de la planta de beneficio cooperante no presentan riesgo de generación de DAM, sin embargo, considerando el análisis del extracto PECT, el drenaje neutro no está exento de presentar concentraciones importantes de metales pesados. En las Figuras 3.8 y 3.9 se pueden observar las micrografías de la muestra.

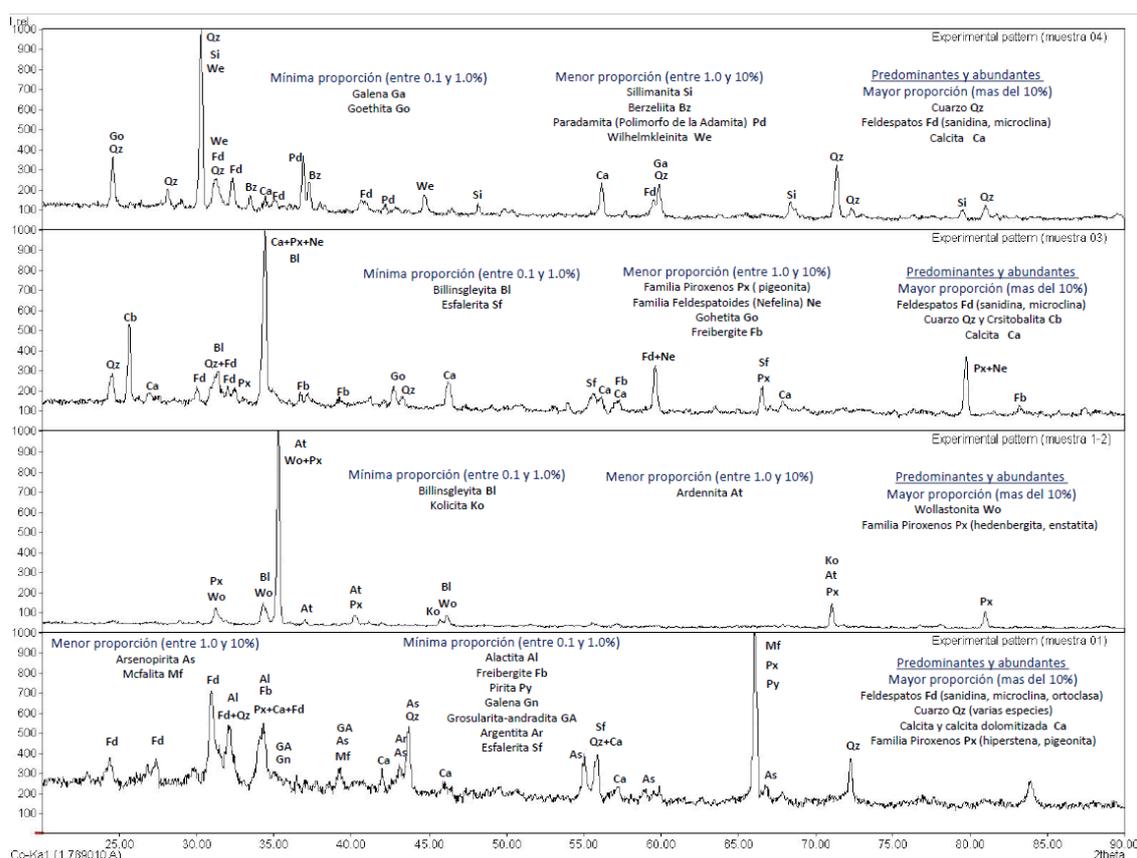


Figura 3.7. Difractograma de la muestra homogenizada con cuantificación de minerales



Figura 3.8. Micrografía de la muestra homogenizada del jal



Figura 3.9. Micrografía del jal homogenizado donde se aprecian los minerales metálicos minoritarios y algunos cristales de cuarzo y calcita.

MUESTRA 4

En esta muestra de referencia obtenida de una de las presas de la misma planta de beneficio con anterioridad a este estudio se observó que coinciden en los minerales mayoritarios encontrados son cuarzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), sanidina (KAlSi_3O_8) y microclina (KAlSi_3O_8) como se puede observar en la Figura 3.10. En proporción menor al 10% se encontraron silimanita (Al_2SiO_5), berzelita ($(\text{NaCa}_2)\text{Mg}_2(\text{AsO}_4)_3$, paradamita $\text{Zn}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$. y wilhelmkleinita $\text{ZnFe}_{2^{3+}}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2$. Como minerales metálicos minoritarios se identificaron en el difractograma galena y goethita, también se detectaron trazas de arsenopirita y esfaleritas, aunque únicamente se realizó el empate con el software. En la figura 3.11 se pueden observar la micrografía tomada de la muestra 4.

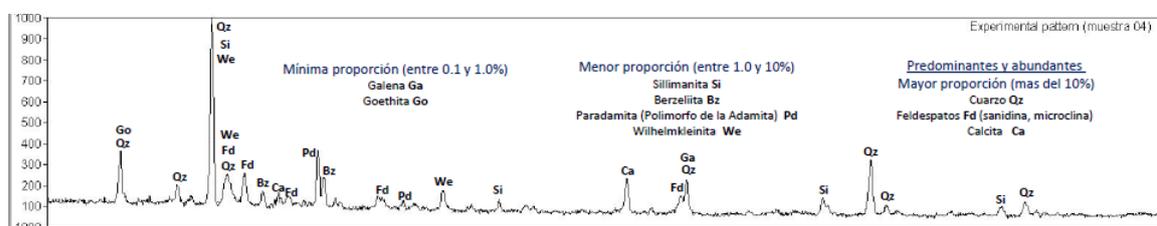


Figura 3.10. Micrografía de la muestra 4

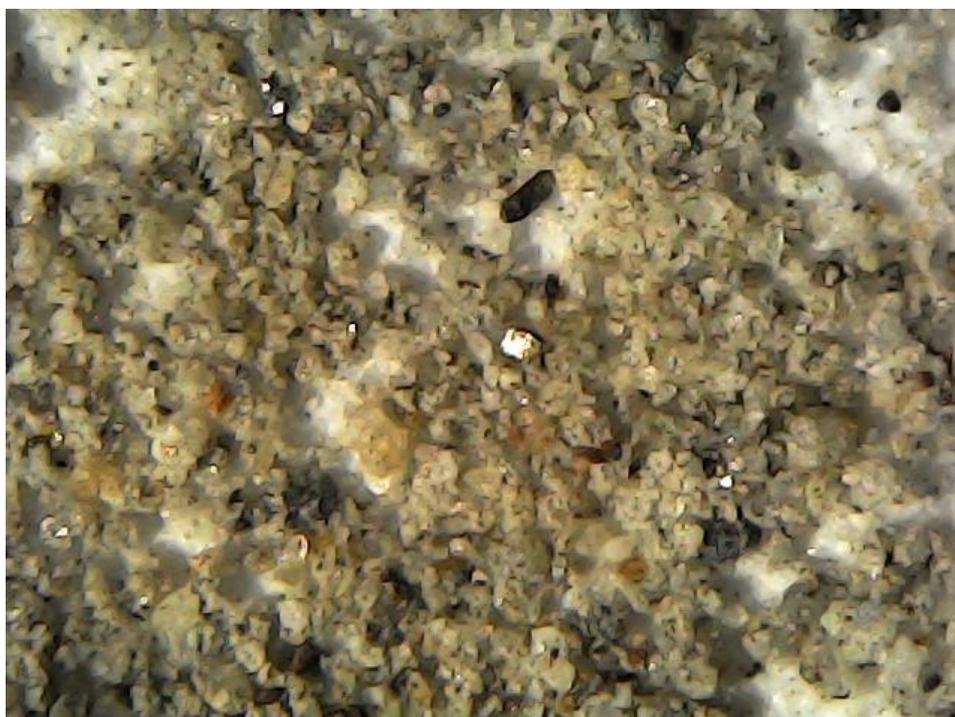


Figura 3.11. Micrografía de la muestra 4