



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN
MINAS, METALURGIA Y GEOLOGÍA.

CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS MINEROS (JALES) DEL
DEPÓSITO UBICADO EN SAN PEDRO GILMONENE, MUNICIPIO
DE GUANAJUATO.

TESIS

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
LIC. EN INGENIERO DE MINAS

PRESENTA:
GONZÁLEZ HERNÁNDEZ DIEGO EDIEL

ASESORES:
cDR. QUEZADA AGUILERA VICTOR MANUEL
DR. CAUDILLO GONZÁLEZ MARTÍN

GUANAJUATO, GTO

NOVIEMBRE 2021



A mi motor de lucha, inspiración y motivación de cada día: mi familia.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Guanajuato, especialmente a quien representa, para mí, la mejor escuela de minas de este país, el Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Geología por formarme profesionalmente dentro de sus aulas.

Al LICAMM-UG, "Laboratorio de Investigación y Caracterización de Minerales y Materiales", por su valioso apoyo en la realización de parte de los análisis que aquí se presentan.

Al cDR. Víctor Manuel Quezada Aguilera, por el acompañamiento, entrega y paciencia que le imprimió a este trabajo. Muchas gracias por su dedicación como director y por su excelente servicio como profesor de la carrera.

Al Dr. Martin Caudillo Gonzalez, porque sus observaciones enriquecieron y fueron parte importante para el desarrollo de esta tesis.

A la Ing. Gabriela Sierra Vega, muchas gracias por tu apreciable colaboración para la realización de este trabajo, sin tu ayuda gran parte de esto no hubiera sido posible.

Guanajuato, Gto., 05 de noviembre de 2021.

Asunto: Aprobación de Trabajo
de Titulación

DR. GILBERTO CARREÑO AGUILERA
DIRECTOR DE DIVISION DE INGENIERÍAS
CAMPUS GUANAJUATO
PRESENTE

Los que suscriben, revisores del trabajo, qué como requisito para obtención de Título Profesional, fue presentado a revisión por:

C. Diego Ediel González Hernández

Pasante del Programa Educativo de **ingeniero de Minas** de la División de Ingenierías del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato, en la Modalidad de Trabajo de Tesis, con el Título:

**“Caracterización de los Residuos Mineros (Jales) del Depósito
Ubicado en San Pedro Gilmonene, Municipio de Guanajuato”**

Una vez leído, analizado y revisado el trabajo, ha sido aprobado para que continúe con los trámites requeridos para solicitar fecha y sustente examen.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

Atentamente
"La Verdad Os Hará Libres"

M.A. Víctor Manuel Quesada Aguilera
Director del Trabajo

Dr. Martín Caudillo González
Codirector del Trabajo

M.C.B. Ricardo Marín Herrera
Sinodal del Trabajo

Dr. Enrique Elorza Rodríguez
Sinodal del Trabajo

Dr. Raúl Miranda Avilés
Sinodal del Trabajo

DIVISION **DE INGENIERÍAS CAMPUS** GUANAJUATO
Ex - Hacienda San Matías sin 36000, Guanajuato, Gto., Tels (473) 732 2291, 732 3864

Índice	
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	10
Antecedentes	11
Justificación	13
Objetivos	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
Hipótesis	16
Alcances	16
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	17
Residuos peligrosos, generación y tratamiento	17
Generación y manejo de residuos mineros en México.	20
CAPÍTULO 3. MARCO REGULATORIO	22
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	22
Ley General Del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	23
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	24
Normas Oficiales Mexicanas.....	24
NOM 141- SEMARNAT- 2003	25
NOM-052-SEMARNAT-2005	26
NOM-157-SEMARNAT-2009	27
CAPÍTULO 4. ZONA DE ESTUDIO	28
Ubicación geográfica	28
Topografía	29
Clima.....	30
Geología	30
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA	33
Muestreo.....	33
Plan de muestreo.....	34
Tratamiento y preparación de las muestras.....	44
Prueba de Balance Ácido-Base para jales que contienen sulfuros de metales.	50
Potencial de Neutralización (PN).	51
Potencial de Acidez (PA)	53
Caracterización de los EPT mediante el método de fluorescencia de rayos X.	57

Determinación de la gravedad específica de los jales.	58
CAPÍTULO 6. RESULTADOS.....	60
Fracción de sólidos y porcentaje de humedad.....	60
Determinación de porcentaje de cenizas.....	62
Determinación de pH.....	63
Determinación del potencial de neutralización (PN).....	63
Determinación del potencial de acidez (PA).....	64
Relación PN/PA.....	67
Determinación de los EPT de base seca en las muestras.....	68
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73

Índice de Figuras

Figura 1. Clasificación de los residuos mineros, según la NOM-157-SEMARNAT-2009.	21
Figura 2. Jerarquía jurídica de México, modificado de González (2016).	22
Figura 3. Ubicación geográfica del Estado de Guanajuato (INEGI, 2010).	28
Figura 4. Ubicación geográfica del Municipio de Guanajuato (INAFED, 2001).	28
Figura 5. Ubicación geográfica del Depósito de Jales de San Pedro Gilmonene, Gto. (Google, 2019).	29
Figura 6. Curvas de nivel de la carta geográfica con clave: F14C43 Fuente: INEGI (2016).	36
Figura 7. Modelo de la topografía inicial del depósito (en color gris las curvas actuales y en azul el modelo creado).	36
Figura 8. Guía para el número de muestras.	37
Figura 9. Malla de muestreo realizada en Google Earth Pro, 2018.	39
Figura 10. Equipo personal y de uso para el muestreo.	40
Figura 11. Ubicación georreferenciada del depósito de jales. Fuente: Google Earth Pro, 2019.	40
Figura 12. Uso del equipo de protección personal (izquierda) y de las bolsas para resguardo del material (derecha).	42
Figura 13. Pozo de muestreo con escala (izquierda), aprovechamiento de laderas para levantar especímenes con muestreo de canal (derecha).	43
Figura 14. Registro, limpieza, etiquetado y resguardo de las muestras.	44
Figura 15. Registro de los pesos en el proceso de secado. De izquierda a derecha: i: Peso del recipiente seco, ii: Peso del recipiente más la muestra húmeda, iii: Peso del recipiente más la muestra seca.	46
Figura 16. Cuarteo de la muestra, paso I.	48
Figura 17. Cuarteo de la muestra, paso II.	48
Figura 18. Proceso de incineración y determinación de cenizas.	49
Figura 19. Procedimiento A para la determinación del Potencial de Neutralización.	51
Figura 20. Procedimiento B para la determinación del Potencial de Neutralización.	52
Figura 21. Procedimiento para la determinación del porcentaje de azufre total en sulfuros.	54
Figura 22. Espectrofotómetro utilizado para la determinación de los sulfatos (Fishersci.com, 2020).	55
Figura 23. Procedimiento para la determinación de sulfatos por el método de turbidimetría EPA- 9038.	56
Figura 24. Molienda de la muestra para cumplir con los requisitos de prueba de fluorescencia por rayos X.	58
Figura 25. Determinación de la gravedad específica de las muestras, toma de pesos "A", "M", "S" y "P".	59
Figura 26. Distribución de la concentración de arsénico en las muestras estudiadas y su límite máximo permisible.	69
Figura 27. Distribución de la concentración de selenio en las muestras estudiadas y su límite máximo permisible.	70
Figura 28. Distribución de la concentración de plomo en las muestras estudiadas y su límite máximo permisible.	70
Figura 29. Distribución de la concentración de antimonio en las muestras estudiadas y su límite máximo permisible.	71

Índice de Tablas

Tabla I. Concentraciones totales de arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), hierro (Fe), cobre (Cu) y zinc (Zn) utilizadas como niveles de referencia para la identificación de suelos contaminados en algunos países del mundo.	13
Tabla II. Generación estimada de residuos peligrosos reportada por empresas registradas, según sector industrial, 2004 - 2017.	17
Tabla III. Comparativo de las principales Normas Oficiales Mexicanas referentes a Residuos Peligrosos.	25
Tabla IV. Descripción de actividades para el muestreo, con tiempos y responsables.	34
Tabla V. Datos calculados del volumen y tonelaje del depósito de jales.	36
Tabla VI. Número de muestras de acuerdo al muestreo exploratorio.	38
Tabla VII. Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo.	41
Tabla VIII. Resultados de la granulometría.	46
Tabla IX. Cálculo del volumen de HCl para determinar el PN.	53
Tabla X. Límites máximos permisibles (LMP) para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT y base seca.	58
Tabla XI. Resultados del proceso de secado y determinación de la Fracción de Sólidos.	60
Tabla XII. Resultados del porcentaje de humedad.	61
Tabla XIII. Resultados del porcentaje de cenizas.	62
Tabla XIV. Resultados del Potencial de Neutralización (PN).	63
Tabla XV. Resultados de las pruebas para la determinación del porcentaje de azufre total.	64
Tabla XVI. Determinación del factor de corrección usado por el ensayo de blancos para el ensayo de azufre total.	65
Tabla XVII. Resultados de la determinación del azufre presente en sulfatos y del Potencial de Acidez (PA).	66
Tabla XVIII. Resultados de la evaluación de los jales para determinar si son generadores de DAM.	67
Tabla XIX. Resultados de la concentración de los EPT y su comparación con los LMP de la NOM-052-SEMARNAT-2005.	68

Lista de acrónimos

ABA	Prueba de Balance Ácido-Base
CPR	Códigos de Peligrosidad de los Residuos
CRETIB	Corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico ambiental, inflamable y biológico-infeccioso
DAM	Drenaje Ácido de Mina
DGGIMAR	Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas
EPA	Environmental Protection Agency
EPT	Elementos Potencialmente Tóxicos
GE	Gravedad Específica
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LPGGIR	Ley general para la prevención y gestión integral de residuos
LICAMM-UG	Laboratorio de Investigación y Caracterización de Minerales y Materiales
LPM	Límite Máximo Permisible
NOM	Norma Oficial Mexicana
PA	Potencial de Acidez
PECT	Prueba del Extracto de Constituyentes Tóxicos
pH	Potencial de Hidrógeno
PM-ABA	Prueba Modificada de Balance Ácido-Base
PN	Potencial de Neutralización
PSGRP	Prestadores de Servicios que Generan Residuos Peligrosos
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SMGRP	Servicios Mercantiles que Generan Residuos Peligrosos
SMRP	Servicios de Manejo de Residuos Peligrosos

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad primaria que se refiere a la exploración, explotación y aprovechamiento de los minerales (INEGI, 2010). Considerada una de las actividades económicas de mayor tradición en México, practicada desde la época prehispánica y fuente de la expansión regional desde la colonia. Ha estado presente en el desarrollo del país como un factor importante de modernización y avance, al suministrar insumos a prácticamente todas las industrias, entre las que destacan: la construcción, la metalúrgica, la siderúrgica, la química y la electrónica (INECC, 2020).

Sin embargo, es una de las actividades en la que se generan mayor cantidad de residuos durante sus diferentes etapas, (Barrie *et. al.*, 1992). Entre los residuos generados están los denominados jales, colas o relaves que al ser dispuestos sin implementar controles ambientales se dispersan al entorno inmediato afectando al suelo, atmosfera y cuerpos de agua, sin mencionar las posibles repercusiones contra la salud humana (Gutiérrez-Ruíz, 2007).

El manejo y la disposición inadecuada de dichos residuos, aunando a las condiciones climáticas del sitio, han ocasionado que se dispersen y movilicen en extensas áreas tanto urbanas o rurales, originando problemas de contaminación de suelos por metales pesados con alto potencial contaminante como: plomo, zinc, cadmio, arsénico, selenio y antimonio; principalmente (Urbano, 2007).

En el Estado de Guanajuato, la explotación minera comenzó desde el siglo XVI, cuando fue descubierto un importante sistema de vetas en lo que hoy es el distrito minero de Guanajuato, dando paso a un historial de casi 500 años de explotación minera (COREMI, 1992). Dicho distrito podría ser un ejemplo de la mala disposición de los residuos mineros debido a la carencia de una legislación en materia ambiental desde los inicios de la minería en el país hasta la promulgación de las primeras leyes y normativas aplicables a esta.

Antecedentes

Los problemas ambientales de la minería en México son una herencia del pasado. Un gran porcentaje de residuos mineros fueron generados antes de este siglo (en algunos distritos a lo largo de más de 450 años) cuando no existía ningún tipo de legislación y control ambiental. Hace algunos años (septiembre de 2004) fue aprobada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) una norma para la adecuada disposición de jales, la cual sólo aplica para nuevos proyectos (DOF, 2004). Sin embargo, como producto de la actividad minera pasada, existen cientos de millones de toneladas de jales dispersos en el territorio nacional de los que no se conocen sus condiciones y sus potenciales afectaciones al ambiente. Son escasos los recursos disponibles para realizar diagnósticos ambientales y evaluaciones de riesgo en las múltiples regiones mineras del país. Por ello, resulta imperante desarrollar estrategias para identificar sitios que representen un mayor peligro de dispersión de acidez y de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) hacia el ambiente, y poder concentrar los esfuerzos de evaluación de riesgo (Ramos, 2006).

En este sentido, dentro de los trabajos elaborados sobre el Distrito Minero de Guanajuato, cabe resaltar a García-Meza, (2003), quien realizó un estudio sobre el potencial de restauración de los depósitos de jales de Valenciana, pero en la caracterización sólo describe dos muestras que son poco representativas de la variabilidad espacial que hay en este sitio (Ramos, 1998). Por otro lado, Carrillo-Chávez et al., (2003) publicaron una evaluación geoquímico-ambiental del distrito y concluyen que los jales no representan un riesgo al ambiente, sin embargo, no reportan el número de muestras analizadas ni los sitios de colecta, por lo cual es difícil juzgar su representatividad.

Ramos (2006), identificaron por lo menos 31 depósitos de jales de cianuración y flotación, de los cuales lograron la caracterización de 5, siendo estos los depósitos de San Nicolas, La Luz, Pozuelos, Valenciana y El Cedro. Según las normas vigentes en distintos países para niveles de referencia en sedimentos, los jales analizados por dichos autores tienen concentraciones medias a altas para los metales Cu, Pb y Zn y los volúmenes tan grandes que existen dispersos en todo el territorio del Distrito de Guanajuato pueden ocasionar problemas de toxicidad al ambiente.

Quezada *et. al.*, (2019), realizó un primer estudio de la erosión hídrica y determinación de peligro por inestabilidad del depósito de jales ubicado en San Pedro Gilmonene, en dicho estudio señala que la construcción de este depósito inicio aproximadamente en 1940, época en la que no existía ningún tipo de regulación ambiental. Además, menciona que los residuos de dicho depósito provienen del beneficio de minerales provenientes de minas del distrito minero “La Luz” en Guanajuato, y donde se aplicaron métodos de beneficio por patios y el

método de cianuración, inclusive que fue construido al lado de un arroyo y el método usado fue solo el de depósito a tiro libre, mencionando que no ha contado con ningún tipo de infraestructura para desviar escurrimiento y evidencia notable de los efectos de la erosión hídrica.

Dicho estudio sirvió de base para el desarrollo del presente trabajo, pudiendo rescatar algunos elementos del trabajo de este autor, mismos que se especifican más adelante.

Justificación

El proceso de beneficio de yacimientos minerales sulfurados produce residuos mineros de granulometría diversa, los que pudieran clasificarse en finos (~75% @ -74 μm), arenas (~10-20% @ -74 μm) y rocas (Muir et al., 2016). Los dos primeros, denominados jales contienen sulfuros metálicos residuales como la pirita (FeS_2), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS). La oxidación de estos sulfuros metálicos puede derivar en la generación de drenaje ácido de mina (DAM), que son soluciones que se caracterizan por bajos valores de potencial de Hidrogeno (pH) y altas concentraciones de EPT disueltos (Lin, 1997; Johnson *et al.*, 2000; Roussel *et al.*, 2000; Moncur *et al.*, 2004).

Entre los impactos ambientales derivados de una mala disposición final de los residuos generados por la explotación minera, de acuerdo con Ledesma *et al.*, 2004, se encuentran la pérdida de cobertura vegetal, la creación de estructuras poco consolidadas susceptibles a la erosión eólica e hídrica, la liberación de sustancias tóxicas, la generación de DAM y lixiviación de metales pesados al exponer los minerales de los yacimientos a un medio oxidante.

De los EPT comúnmente reportados en los jales mineros, el hierro (Fe), el zinc (Zn) y el cobre (Cu) son esenciales en la composición o funcionamiento de los organismos vivos, pero en concentraciones altas (Tabla I) pueden causar efectos adversos (Manahan, 1989). En cambio, el arsénico (As), cadmio (Cd) y plomo (Pb), junto al mercurio (Hg), están reconocidos como los elementos químicos más tóxicos en la naturaleza, a los que no se les conoce alguna función biológica (Manahan, 1989; Baldwin & Marshall, 1999) y que aún en concentraciones bajas pueden contaminar los ecosistemas con el consecuente efecto nocivo para los organismos vivos (Nriagu, 1988).

Tabla I. Concentraciones totales de arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), hierro (Fe), cobre (Cu) y zinc (Zn) utilizadas como niveles de referencia para la identificación de suelos contaminados en algunos países del mundo.

País	As		Cd		Pb		Fe		Cu		Zn		Fuente
	(mg•kg-1)		(mg•kg-1)		(mg•kg-1)		(mg•kg-1)		(mg•kg-1)		(mg•kg-1)		
Criterio	RSH	RE	RSH	RE	RSH	RE	RSH	RE	RSH	RE	RSH	RE	
Holanda	576	85	28	13	622	580	NR	NR	8600	96	46100	350	RIVM (2001)
Australia	100	20	20	3	300	300	NR	NR	1000	60	7000	2000	DEP (2001)
Canadá	12	12	10	1.4	140	70	NR	NR	63	63	200	200	CEQG (2002)
EUA	22	60	37	20	400	500	23000	NR	3100	50	23000	200	US-EPA (2002) * ORNL (1997)
México	20	20	20	20	200	100	NR	NR	NR	NR	800	300	PROFEPA (2000)

RSH: riesgo a la salud humana; RE: riesgo ecológico; NR: datos no reportados. *En los Estados Unidos de América (EUA), los niveles de referencia varían entre las diferentes regiones. En esta tabla se presentan los que corresponden a la región 9 (Arizona, California, Hawái e Islas del Pacífico).

En el distrito minero Guanajuato, una de las primeras zonas donde se inició la actividad minera, fue en el Mineral de La Luz, en la zona hay gran cantidad de sitios donde se puede identificar la presencia de diferentes residuos mineros, como lo son jales, terreros y tepetateras que pueden tener ya más de un siglo de haber sido depositados. Sin embargo, no existe un registro de la cantidad de estos y mucho menos de las características físico-químicas de los elementos ahí acumulados. El depósito de Jales de San Pedro Gilmonene no tiene antecedentes de haber sido analizado y/o caracterizado bajo la normatividad aplicable, por lo cual se propone realizar una cuantificación de los EPT presentes en los jales para determinar su grado de toxicidad.

Objetivos

Objetivo general.

Efectuar la caracterización y el análisis de riesgo por el potencial de generación de DAM y la toxicidad de los residuos del depósito de jales mineros, ubicado en la localidad de San Pedro Gilmonene, en el Estado de Guanajuato, México, en apego a la legislación mexicana aplicable.

Objetivos específicos.

Conocer las leyes y normas que rigen el manejo y la correcta disposición de los residuos mineros en México.

Determinar la composición química y el potencial de generación de DAM de los residuos mineros (jales) contenidos en el depósito de San Pedro Gilmonene, Guanajuato, previamente muestreados con base a lo establecido en las normas NMX- AA-132-SCFI-2016 y NOM 141-SEMARNAT-2003, haciendo uso de la técnica analítica de fluorescencia de rayos X.

Analizar el riesgo inherente del depósito de jales y su influencia sobre la salud de la población de la comunidad de San Pedro Gilmonene y zonas aledañas.

Hipótesis

Debido a la concentración de EPT en los jales del antiguo depósito de San Pedro Gilmonene, estos representan un peligro al equilibrio del ecosistema, a la calidad del agua y en general a la salud de la población que vive en las cercanías de la zona de estudio.

Alcances

El muestreo se realizó en una sola ocasión y en un solo depósito de jales abandonado en la localidad de San Pedro Gilmonene, municipio de Guanajuato. Cubriendo un área de poco más de 40,000 metros cuadrados.

La preparación y tratamiento de las muestras se realizó en tres laboratorios de la Universidad de Guanajuato: el Laboratorio de Química, el Laboratorio de Metalurgia y el Laboratorio de Investigación y Caracterización de Minerales y Materiales (LICAMM – UG) del Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Geología.

Los resultados arrojados de la caracterización de EPT solamente pudieron ser cuantificados dentro de los límites de detección de los equipos empleados, siendo estos los únicos disponibles para la realización de las pruebas.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Residuos peligrosos, generación y tratamiento

En el artículo 3º, fracción XXXII, de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), se define a un residuo como:

“Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó”;

Así mismo, en la fracción XXXIII de este mismo artículo. se define a un residuo peligroso de la siguiente manera:

“Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o que contengan agentes infecciosos que le confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio y, por tanto, representan un peligro al equilibrio ecológico o el ambiente”.

Con base en los datos de la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR), de la SEMARNAT, al cierre de 2017, se registraron 33 sectores como generadores de residuos peligrosos (véase Tabla II).

Tabla II. Generación estimada de residuos peligrosos reportada por empresas registradas, según sector industrial, 2004 - 2017.

Sector	Generación estimada (t)
Acuacultura	399.31
Agrícola	763.00
Alimentario	81,188.62
Artículos y productos de diferentes materiales	39,140.75
Artículos y productos de plástico	32,821.81
Artículos y productos metálicos	60,576.90
Asbesto	226.91
Automotores	248,821.88
Celulosa y papel	10,600.78
Cemento y cal	15,524.66
Comunicaciones	268.48
Congelación, hielo y productos	887.97
Construcción	18,497.76
Equipos y artículos electrónicos	87,661.90
Exploraciones y explotaciones mineras	527.47

Tabla II. Generación estimada de residuos peligrosos reportada por empresas registradas, según sector industrial, 2004 - 2017.

Sector	Generación estimada (t)
Explotación de bancos de materiales	5,436.09
Forestal	205.86
Generación de energía eléctrica	14,496.57
Madera y productos	5,328.70
Marítimo	1,370.19
Metalúrgica	264,221.24
Minero	2,617.58
Petróleo y petroquímica	139,731.72
Pinturas y tintas	63,266.49
Prendas y artículos de vestir	17,126.63
Química	240,827.66
Servicios mercantiles que generan residuos peligrosos (SMGRP)	148,771.74
Servicios en manejo de residuos peligrosos (SMRP)	44,367.53
Prestadores de servicios que generan residuos peligrosos (PSGRP)	883,087.78
Siderúrgica	525.52
Textil	9,528.15
Vida silvestre	36.48
Vidrio	8,742.44
Total	2,447,596.57

Fuente: SEMARNAT, 2021.

Como se observa en la tabla anterior, los sectores que reportaron una mayor generación de residuos peligrosos para el periodo 2004–2017, fueron: Prestadores de Servicios que Generan Residuos Peligrosos (PSGRP) con 883,087.78 toneladas; Servicios Mercantiles que Generan Residuos Peligrosos (SMGRP) con 148,771.74 toneladas; y Servicios de Manejo de Residuos Peligrosos (SMRP) con 44,367.53 toneladas. Los giros productivos que se encuentran dentro de estos sectores son, por mencionar algunos, la reparación y mantenimiento de equipos; máquinas y vehículos industriales; servicios forenses, servicios hoteleros; estaciones de gas carburante; centros comerciales y/o tiendas departamentales; farmacias; gasolineras; e inclusive centros integrales de manejo de residuos peligrosos.

Como se expone estos giros comerciales suelen ser muy variados, y a la vez son los más comunes, lo que explica porque ocupan los primeros lugares en la generación de residuos peligrosos en los últimos años.

En cuanto a los sectores relacionados a la industria minera, se encuentran el mismo sector minero con una generación estimada de 2,617.58 toneladas, y el sector metalúrgico con 264,221.24 toneladas. Además, podrían sumarse el sector de exploraciones y explotaciones mineras con una generación de 527.47 toneladas y el sector de explotación de bancos de materiales (como una parte de la minería no metálica) con una aportación de 5,436.09 toneladas durante los años 2004 – 2017.

Con base en el Artículo 50 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), la SEMARNAT establece la autorización para el manejo de los residuos peligrosos que incluye transporte, reciclado, aprovechamiento, co-procesamiento, reutilización, tratamiento, incineración, confinamiento, almacenamiento y acopio, con el objetivo de su control y la prevención de los impactos negativos asociados a un mal manejo y recuperar los materiales que sean útiles por medio del reciclado y reutilización.

La información del sistema de manejo se encuentra organizada en nueve fases las cuales se presentan a continuación:

- Recolección y transporte de residuos peligrosos.
- Almacenamiento y acopio de residuos peligrosos.
- Reciclado de residuos peligrosos industriales.
- Co-procesamiento de residuos peligrosos industriales.
- Tratamiento de residuos peligrosos industriales.
- Incineración de residuos peligrosos industriales.
- Confinamiento de residuos peligrosos industriales.
- Aprovechamiento de residuos peligrosos industriales.
- Reutilización de residuos peligrosos industriales.

En este sentido, corresponde a todas las entidades generadoras de residuos peligrosos, implementar los mecanismos necesarios para la correcta disposición de los mismos, o en su caso, contratar los servicios de un agente externo que se encargue de esta tarea, haciendo el seguimiento conforme a ley, con el fin de mitigar los impactos negativos que se pudiesen presentar de no seguir con el sistema de manejo establecido por la LGPGIR.

Generación y manejo de residuos mineros en México.

México es uno de los países de Latinoamérica que se encuentra localizado en una región volcánica rica en minerales. La tradición minera en el país se remonta a la época prehispánica. Dicha actividad adquirió una gran relevancia económica y social hasta el periodo de la colonia, convirtiéndose entonces en el motor del crecimiento económico y modernización de la Corona española (Volke, Velasco, & De la Rosa, 2005).

En los diferentes tipos de yacimientos, ocurren tanto los minerales económicos (mena), como los minerales no económicos (ganga) y con el fin de separarlos son sometidos a diferentes procesos físicos, físico-químicos y químicos. El avance de la tecnología en la industria minera mundial propició la introducción en México de procesos metalúrgicos como la flotación y la cianuración a inicios del siglo XX, lo que ha permitido explotar mayores volúmenes de mineral con valor comercial, a la vez que propició la generación de mayores cantidades de residuos mineros (Magdalena, 2014).

Existen varios tipos de residuos mineros de acuerdo a la etapa de la minería que se realiza; en el proceso de extracción encontramos tepetates y terreros, los cuales son el producto de las especies minerales extraídas que no son consideradas económicamente atractivas o de baja ley; en el proceso de beneficio tenemos los jales, donde la Universidad de Arizona (2008), los define como los apilamientos de rocas molidas que quedan después de que los minerales de interés como el plomo, zinc, cobre, plata y otros han sido extraídos de las rocas que los contienen; por último en los procesos metalúrgicos (procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos) encontramos cenizas, escorias y lodos (precipitados). En la Figura 1 se puede observar los residuos generados en cada una de las etapas de minado y del proceso de beneficio, de acuerdo con la clasificación de la NOM-157-SEMARNAT-2009.

Aunque el DAM no es considerado dentro de la clasificación de residuos de la SEMARNAT, la producción de este va de la mano de la operación de la actividad minera; el ácido se genera en las minas cuando se oxidan los minerales de sulfuro metálico.

Los minerales de sulfuro metálico están presentes en la roca huésped asociados con la mayoría de los tipos de actividad minera de metales. Antes de la minería, la oxidación de estos minerales y la formación de ácido sulfúrico era una función de los procesos naturales de meteorización. Ahora, las operaciones de extracción y beneficio asociadas con la actividad minera aumentan la tasa de estas mismas reacciones químicas al exponer grandes volúmenes de material rocoso de sulfuro con mayor área de superficie al aire y al agua (EPA, 1994).

El potencial de una mina para generar ácido y liberar contaminantes depende de muchos factores y en específico del sitio. Ferguson y Erickson (1988) identificaron factores primarios, secundarios y terciarios que controlan la generación del drenaje ácido. Estos factores proporcionan una estructura conveniente para organizar la discusión sobre la formación de ácidos en el entorno minero. Los factores primarios involucran la producción del ácido, como las reacciones de oxidación. Los factores secundarios actúan para controlar los productos de la reacción de oxidación, como las reacciones con otros minerales que consumen ácido. Los factores secundarios pueden neutralizar el ácido o reaccionar con otros minerales. Los factores terciarios se refieren a los aspectos físicos de la unidad de gestión de residuos (por ejemplo, las paredes de un tajo, las pilas de roca estéril o los depósitos de jales) que influyen en la reacción de oxidación, la migración del ácido y el consumo. Otros factores aguas abajo cambian el carácter del drenaje por reacción química o dilución.

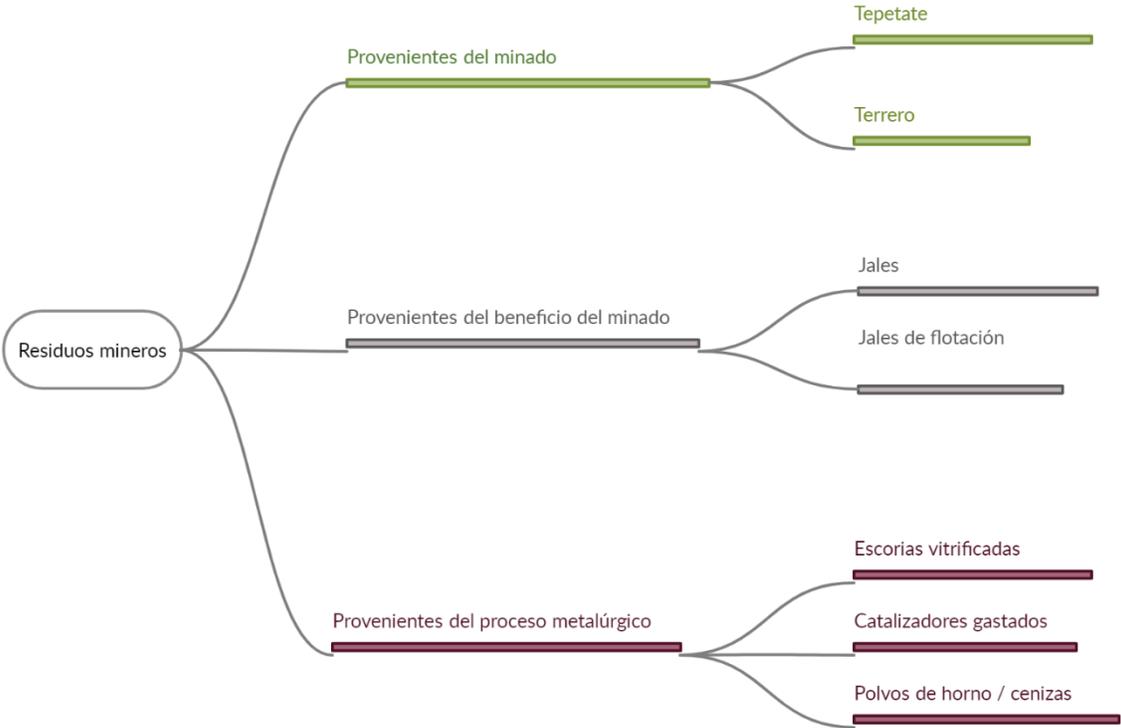


Figura 1. Clasificación de los residuos mineros, según la NOM-157-SEMARNAT-2009.

CAPÍTULO 3. MARCO REGULATORIO

La Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano, mejor conocida como Conferencia de Estocolmo de 1972, fue el evento que, por primera vez, concentró la atención internacional en temas medioambientales. A partir de la década de 1970, la legislación ambiental empezó a cambiar en México, siguiendo la tendencia mundial. Se empezó a considerar al Medio Ambiente como un sistema, y se abandonó la visión aislada de los recursos y el enfoque de usufructo puro (Gómez, 2009).

Las leyes mexicanas en materia ambiental son diversas, en el marco federal existen la Constitución Política, las Leyes Federales, los Tratados y Acuerdos Internacionales, las Normas Oficiales Mexicanas (Gómez, 2009). En la Figura 2 se muestra la jerarquía de la legislación mexicana en temas ambientales.

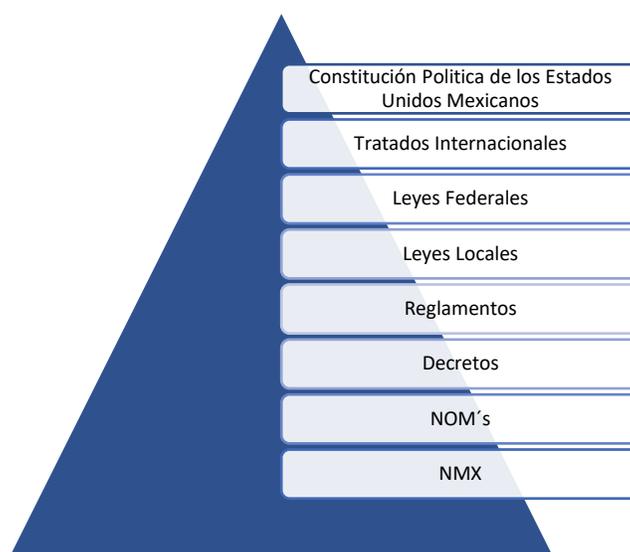


Figura 2. Jerarquía jurídica de México, modificado de González (2016).

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos contiene diversas disposiciones que en forma expresa aluden al medio ambiente o a los recursos naturales que lo integran, el cual se denomina constitucionalización del medio ambiente. Algunos de los preceptos constitucionales son:

En el artículo 4º, mediante una reforma hecha en 1999 se adicionó un quinto párrafo en el que se establece como garantía constitucional que, toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará

responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley (DOF, 2019).

El artículo 25, en sus párrafos primero y sexto, establece que: el Estado, como rector de desarrollo nacional, garantizará que éste sea integral y sustentable y que el Estado apoyará e impulsará a las empresas de los sectores social y privado, sujetándolos a las modalidades que dicte el interés público y al uso, en beneficio general, de los recursos productivos cuidando su conservación y el medio ambiente (López & Ferro, 2006).

El artículo 27, en su tercer párrafo establece el fundamento constitucional más importante para nuestra legislación ambiental, es decir las bases para la regulación del aprovechamiento y cuidado de los elementos naturales susceptibles de apropiación, para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección de los elementos naturales (López & Ferro, 2006).

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

La ley es el inicio de una tendencia dentro del derecho administrativo mexicano, a su vez, es el fundamento de lo que podemos llamar la legislación ambiental mexicana, que se integrará por: esta Ley, las treinta y una leyes estatales de ecología, los reglamentos de estas leyes, las normas técnicas, y los reglamentos y bandos municipales (Carmona, 1995).

La LGEEPA cuenta actualmente con siete reglamentos expedidos por el presidente de la República. Estos reglamentos son:

- El Reglamento en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental.
- El Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos.
- El Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera.
- El Reglamento para la Protección del Ambiente contra la Contaminación Originada por la Emisión del Ruido.
- El Reglamento en Materia de Auditoría Ambiental.
- El Reglamento en Materia de Áreas Naturales Protegidas.
- El Reglamento en Materia de Ordenamiento Ecológico.

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

Uno de los problemas ambientales más graves y complicados de resolver tanto en México como en el mundo es la generación y disposición de residuos peligrosos que contaminan los elementos naturales. No obstante, la regulación que ofrece la LGEEPA al respecto ha resultado insuficiente para controlar de manera efectiva el manejo de los residuos peligrosos, pues tiene lagunas jurídicas que ni el reglamento ni las normas oficiales mexicanas relativas a residuos peligrosos han podido resolver. En respuesta a las deficiencias de la normativa aplicable a los residuos peligrosos, el 8 de octubre de 2003 se expidió la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) (López & Ferro, 2006).

La LGPGIR refuerza la política ambiental en materia de residuos peligrosos, poniendo énfasis en la promoción de: la prevención de la generación, su valorización y aprovechamiento, así como el manejo integral, considerando incluso, solo de no ser posible ninguna de las opciones anteriores, la disposición final de los mismos en confinamientos controlados para que dicha actividad sea ambientalmente adecuada debiéndose respetar en todas las etapas del manejo los principios fundamentales de la gestión integral de los residuos peligrosos (SEMARNAT, 2008).

Normas Oficiales Mexicanas

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por las dependencias competentes, que tienen como finalidad establecer las características que deben reunir los procesos o servicios cuando estos puedan constituir un riesgo para la seguridad de las personas o dañar la salud humana; así como aquellas relativas a terminología y las que se refieran a su cumplimiento y aplicación (Secretaría de Salud, 2015).

Las NOM del sector ambiental se expiden con el fin de establecer las características y especificaciones, criterios y procedimientos, que permitan proteger y promover el mejoramiento del medio ambiente y los ecosistemas, así como la preservación de los recursos naturales (SEMARNAT, 2015).

Respecto a la generación, el manejo y la disposición de Residuos Peligrosos existen varias normas (Tabla III) que establecen la regulación en materia ambiental que debe seguir la entidad generadora de estos.

Tabla III. Comparativo de las principales Normas Oficiales Mexicanas referentes a Residuos Peligrosos.

Clave de la norma	Descripción
NOM-052-SEMARNAT-2005	Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
NOM-053-SEMARNAT-1993	Establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de la extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NOM-055-SEMARNAT-1993	Establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado de residuos peligrosos previamente estabilizados.
NOM-141-SEMARNAT-2003	Establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales.
NOM-147-SEMARNAT-2003	Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio.
NOM-155-SEMARNAT-2007	Establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.
NOM-157-SEMARNAT-2003	Establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.
NOM-159-SEMARNAT-2011	Establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre.

Fuente: (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), 2020)

NOM 141- SEMARNAT- 2003

El principal objetivo de esta norma es establecer las especificaciones para la caracterización del jal y la caracterización del sitio, así como los criterios para la mitigación de los impactos ambientales por la remoción de la vegetación para el cambio de uso del suelo. Asimismo, señala especificaciones y criterios ambientales para las etapas de preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales, y para el monitoreo como lo indica la misma.

Parte importante de esta norma es que instituye la metodología a seguir para determinar si un residuo minero es considerado peligroso, dicha norma utiliza como solución extractante agua en equilibrio con dióxido de carbono. Este método permite obtener un extracto acuoso para estimar la cantidad de los metales metaloides presentes en los jales bajo condiciones de laboratorio, y no pretende simular el tipo de lixiviado que se produce bajo condiciones específicas de campo (García Arreola, Soriano Pérez, Flores Vélez, Cano Rodríguez, & Alonso Dávila, 2015).

NOM-052-SEMARNAT-2005

Establece que los residuos pueden considerarse como peligrosos atendiendo a enfoques distintos (Cortinas de Nava, 2006):

- Por definición, tratándose de aquellos que aparecen expresamente en los listados de la norma citada y que derivan de diferentes fuentes, procesos o productos desechados.
- Mediante caracterización, atendiendo a sus propiedades CRETIB, tres de las cuales pueden comprobarse mediante pruebas directas de laboratorio (corrosividad, reactividad e inflamabilidad); ya que la toxicidad se determina mediante una prueba indirecta de lixiviación (y no por estudios de capacidad tóxica) que permite cuantificar la presencia en los residuos de las sustancias tóxicas contenidas en el listado correspondiente incluido en la NOM-052 para conocer si rebasan los límites máximos establecidos en él.
- Por resultar de mezclas, derivar de distintas modalidades de manejo o por contaminación de equipos y construcciones que involucren a residuos peligrosos.

Esta norma contiene dos tablas que hacen referencia a los Códigos de Peligrosidad de los Residuos (CPR) y a los Límites Máximos Permisibles (LMP) para la Prueba del Extracto de Constituyentes Tóxicos (PECT), además comprende los listados que se enumeran a continuación (Cortinas de Nava, 2006):

- Listado 1: Clasificación de residuos peligrosos por fuente específica.
- Listado 2: Clasificación de residuos peligrosos por fuente no específica.
- Listado 3: Clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos Agudos).
- Listado 4: Clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos Crónicos).
- Listado 5: Clasificación por tipo de residuos, sujetos a Condiciones Particulares de Manejo.

NOM-157-SEMARNAT-2009

Establece los elementos y procedimientos que se deben considerar al formular y aplicar los planes de manejo de residuos mineros, con el propósito de promover la prevención de la generación y la valorización de los residuos, así como alentar su manejo integral a través de nuevos procesos, métodos y tecnologías que sean económica, técnica y ambientalmente factibles (DOF, 2009).

Esta norma presenta cierta relevancia ya que clasifica los residuos mineros generados a lo largo del ciclo productivo y de beneficio de minerales; de igual forma enumera los elementos básicos que deben contener el Plan de Manejo correspondiente para la correcta disposición de dichos residuos.

Parte de los procedimientos incluidos en dicha norma son las pruebas de extracción de los constituyentes tóxicos, algunas de estas pruebas son descritas en los anexos normativos de esta misma, mientras que otros pueden ser consultados de los anexos normativos de la NOM-141-SEMARNAT-2003.

Define, además, LMP para los constituyentes tóxicos, y la clasificación correspondiente para determinar la peligrosidad de los residuos en base a su composición y su potencial generador de DAM.

CAPÍTULO 4. ZONA DE ESTUDIO

Ubicación geográfica

El Estado de Guanajuato (Figura 3) es una de las 32 entidades federativas de los Estados Unidos Mexicanos, colinda al norte con Zacatecas y San Luis Potosí; al este con Querétaro; al sur con Michoacán de Ocampo; y al oeste con Jalisco. Tiene 46 municipios y 11 458 localidades (INEGI, 2017).



Figura 3. Ubicación geográfica del Estado de Guanajuato (INEGI, 2010).

El municipio de Guanajuato (Figura 4) se localiza en la región I-Noreste de la entidad, limitando al norte con San Felipe; al este con Dolores Hidalgo; al sur con Salamanca e Irapuato y al oeste con Silao y León (INAFED, 2001).



Figura 4. Ubicación geográfica del Municipio de Guanajuato (INAFED, 2001).

El Mineral de San Pedro Gilmonene se localiza en el municipio de Guanajuato, en el Estado de Guanajuato, México, dentro del distrito minero “La Luz”. La zona de estudio se ubica en la parte noroeste del municipio de Guanajuato (véase Figura 5), a unos 7 km del centro de Guanajuato. En las coordenadas 21° 01' 51.62" N y 101° 19' 29.44" O.

La población total de Mineral de San Pedro Gilmonene es de 86 personas, de cuales 36 son masculinos y 50 femeninas (Quezada *et. al.*, 2019). El acceso a esta comunidad se realiza vía terrestre por un camino de terracería, que pasa por un lado de la Unidad Minera San Ignacio y de la Mina conocida como Rampa Lucero, perteneciente a la Unidad Bolañitos.

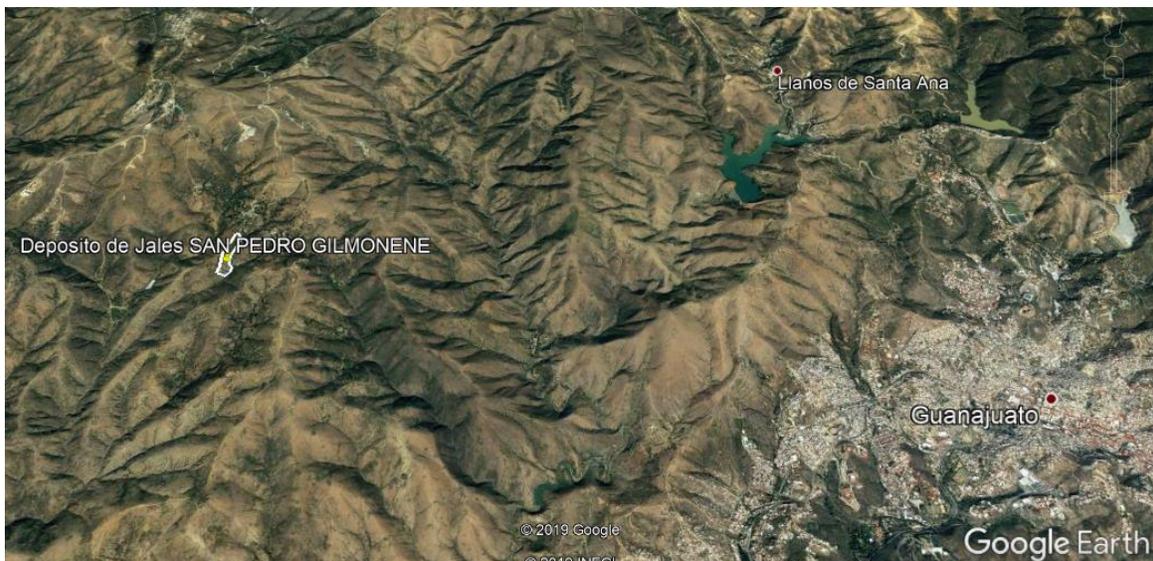


Figura 5. Ubicación geográfica del Depósito de Jales de San Pedro Gilmonene, Gto. (Google, 2019).

Topografía

La zona de estudio se encuentra dentro de una región fisiográfica denominada cuenca de la Soledad, en la sierra de Guanajuato. Cuenta con una superficie de 2,782.0167 hectáreas, con un rango altitudinal entre los 2,200 metros sobre el nivel del mar hacia el Sur, coincidiendo con la parte baja de la Presa La Soledad, hasta los 2,750 metros sobre el nivel del mar hacia el extremo norte del área, cerca de la localidad de Mesa Cuata.

Dicha cuenca forma parte del límite de la provincia fisiográfica de la Mesa Central. Presenta una topografía accidentada y pendientes que varían entre el 10 y 30%, con escasas zonas de terrenos planos, registrándose elevaciones como: Cerro Prieto, Cerro Pelón, Cerro El Puerto Alto, Cerro Chichimeca y el Cerro El Alfiler.

Clima

Existen dos tipos de climas, semicálido en la zona sur y sureste, y templado subhúmedo en las zonas restantes del municipio. Alcanza una temperatura máxima de 36°C en verano y una mínima de 3°C en invierno, dándose una temperatura media anual de 18.5°C, a su vez la precipitación pluvial varía de 600 a 840 milímetros anuales, siendo el promedio anual de 697 milímetros. En los meses de julio y agosto se observa una mayor incidencia de lluvias alcanzando un valor de 217 milímetros cada uno (INAFED, 2001).

Geología

La geología del distrito minero Guanajuato se divide en rocas de edad Mesozoica y rocas Cenozoicas. Las rocas de edad Mesozoica conocidas como el basamento del distrito Guanajuato está conformado por rocas sedimentarias marinas como son: areniscas, calizas y lutitas. Se presentan intercalaciones de rocas volcánicas marinas tales como andesitas y basaltos. Dicho basamento ha sufrido metamorfismo regional de bajo grado el cual se puede observar en las pizarras de la Formación Esperanza (Martínez-Reyes, 1992).

Las rocas de edad Cenozoica consisten en sedimentos continentales tales como: areniscas y conglomerados. También existen rocas volcánicas como andesitas, riolitas y basaltos; cortando a todas las unidades previas hay rocas plutónicas que solo han sufrido fallamiento normal. A continuación, se describen las unidades litológicas basadas en el trabajo de Martínez – Reyes, J. (1992) y la columna estratigráfica modificada por Randall, Saldaña, & Clark, (1994).

- Tonalita Cerro Pelón (JsTon):

La localidad tipo está en el cerro Pelón de donde toma su nombre, y es donde se encuentra mayormente expuesta formando las partes altas correspondientes a las rocas mesozóicas.

La unidad presenta gran cantidad de diques de composición ácida, totalmente caolinizados y oxidados, dioríticos y cuarzdioríticos en juegos de fracturas conjugadas, así como doleríticos similares a los del Complejo Filoniano Santana. Con base en las observaciones de campo se tienen dos localidades, en donde la roca se presenta sana, una de ellas en la falda sur de Cerro Prieto al norte de Agua Colorada y la otra al suroeste de cerro Pelón sobre el arroyo de El Tecuán. Martínez Reyes (1992) describe a estas rocas como masiva, leucócrata, color crema, cristalina, textura fanerítica, formada por plagioclasa, cuarzo, clorita y epidota.

- Complejo Filoniano Santa Ana (JsD):

Corresponde a un enjambre de diques de dolerita, basalto y granófico, que cortan a gabros, dioritas (143 ± 9.6 Ma, K/Ar en roca entera) y plagiogranitos (157.1 ± 8.8 Ma, K/Ar en roca entera). El enjambre de los diques, que se intersectan en todas direcciones son los rasgos más comunes del complejo Filoniano. La localidad tipo de esta unidad se localiza en los alrededores de Santa Ana y Presa de La Soledad.

- Formación La Luz - Lavas basálticas La Luz (KiB):

Esta unidad sobreyace a la formación Esperanza. Fue estudiada y descrita por Ortiz-Hernández (1992) en su estudio “el arco interoceánico aloctono”, tiene un espesor de 1000 m. Es del Cretácico inferior y está constituida por una secuencia Volcano – Sedimentaria de rocas clásticas sedimentarias intercaladas con lavas de composición andesítica, típicamente las lavas presentan textura almohadillada.

- Formación Esperanza (KsV):

Esta unidad está representada por una secuencia volcano sedimentaria pelágica muy deformada, se trata de calizas micríticas en estratos delgados, lutitas negras, pedernales, areniscas y lutitas. Presentan metamorfismo en grado de facies esquistos verdes por lo cual es posible encontrar pizarras, filitas y esquistos con foliación bien marcada. El espesor de esta unidad es de aproximadamente 2800 m.

- Conglomerado Guanajuato:

Esta unidad fue nombrada por Edwards (1955) en su estudio “Studies of some early Tertiary red conglomerates of central México”, la describe como un conglomerado polimíctico de color rojo que, en algunos lugares varía a verde, es un conglomerado mal clasificado con clastos angulares de andesita, basalto, riolita, diorita, tonalita, caliza, filita y lutitas, cuyos tamaños varían desde menos de 1 cm hasta 1 m, generalmente presenta intercalaciones de areniscas.

El espesor de esta unidad es ampliamente discutido; ya que no se ha podido calcular debido a que la base de esta no queda expuesta. Edwards (1955), le asignó un espesor de 1500 m y Gross (1975), le asigna un espesor de 1400 m basado en una medición que se hizo en el tiro Guanajuato de la Mina Las Torres. Sin embargo, los afloramientos en otros lugares arrojan espesores menores a 400 m.

- Formación Loseros:

Esta unidad descansa concordantemente sobre el conglomerado Guanajuato, fue descrita por Echegoyen-Sánchez, *et. al.*, (1970) como un material volcánico clástico, la mayoría de sus granos son de cuarzo, plagioclasas y fragmentos líticos. Es descrita como un depósito mezclado que en transición hacia arriba cambia desde una arenisca bien clasificada, en estratos delgados a medianos de color rojo oscuro a un intervalo de estratos rojos de origen sedimentario interestratificados con láminas verdosas de oleadas piroclásticas que predominan en la parte superior. Esta variación, indica un cambio transicional desde un régimen sedimentario a otro predominantemente volcánico. En cuanto a espesor, Randall *et. al.*, (1994) observó cerca de la mina las torres esta unidad con un espesor de 52 metros, dándole una edad del Oligoceno.

- Riolita Bufa:

Constituye una unidad que aflora exclusivamente en el Distrito Minero Guanajuato. Los primeros en mencionarla fueron Wandke & Martínez (1928) en su estudio (The Guanajuato mining district, Guanajuato, Mexico. Economic Geology) la mencionan como una lava riolítica rica en cuarzo, que cubre la formación Loseros y le asignaron un espesor de 400 m, Echegoyén (1970) propone el nombre riolita la Bufa y le asigna una edad del Mioceno

- Formación Calderones:

Wandke y Martínez (1928) se refieren a esta unidad como brechas y flujos andesíticos, posteriormente Echegoyén (1970) la designa como Formación Calderones y la describe como una secuencia de depósitos piroclástico y clástico que originalmente se tomaron como conglomerados y areniscas. se describen como una unidad compleja que incluye un número indeterminado de ignimbritas andesíticas y dacíticas, así como también, capas de material volcanoclástico, proponiendo como ambiente de depósito un lago somero.

- Andesita Cedros:

Echegoyén (1970) describe esta unidad como lavas andesíticas que sobreyacen a la formación Calderones, atribuyéndole una edad de 30 M.a. Esta unidad consiste en derrames de lava de composición andesítica. En la base tiene intercalaciones de tobas andesíticas de grano fino. Las lavas contienen fenocristales de andesina y minerales máficos como hornblenda, augita e hiperestena en una matriz microcristalina de plagioclasas y minerales máficos, ocasionalmente se observan algunos cristales de cuarzo. Su espesor varía entre los 100 y los 640 m.

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

En el desarrollo del presente trabajo se tomaron en cuenta diferentes aspectos para tener una base sólida en el planteamiento de la metodología, como son la consulta de bibliografía especializada y de la normatividad aplicable, así como un diseño estadístico experimental que permita dar fiabilidad a los resultados obtenidos.

Las muestras se obtuvieron de un antiguo depósito de jales ubicado en el municipio de Guanajuato, Guanajuato, colectadas y resguardadas de manera responsable para continuar con una serie de tratamientos químicos y físicos con el fin de determinar ciertas características básicas como lo son granulometría, pH, densidad real, y porcentaje de humedad; posteriormente fueron enviadas al LICAMM - UG, para determinar la concentración de diversos EPT mediante el método de fluorescencia de rayos X. Estas pruebas ayudan a determinar las características de cómo puede comportarse los jales como material de relleno, refiriéndose a la determinación de granulometría, porcentaje de humedad y densidad real (Niroshan *et. al.*, 2017, Fall *et al.*, 2008, Benzaazoua *et. al.*, 2004), cuanto a la determinación de pH este indica la potencialidad de la formación de DAM, el cual favorece la lixiviación de los EPT (Hernández & Padilla, 2010).

Muestreo

La recolección de las muestras se llevó a cabo de acuerdo con la *NMX-AA-132-SCFI-2016 “Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.”* Debido a que el muestreo tal y como se pide realizar en la *NOM-141-SEMARNAT-2003*, esta indica realizarse de dos formas, de acuerdo con los apartados 5.1 y 5.2. de dicha norma.

“5.1. Muestras provenientes de la evaluación del proceso en pruebas piloto en proyectos nuevos o de incorporación de nuevas reservas.

5.2. Muestras provenientes de la operación diaria de una planta de beneficio.”

Lo cual deja fuera al muestreo en depósitos de jales antiguos, esto se entiende debido a que la mayoría de las nuevas legislaciones en nuestro país se hacen de manera retroactiva, de forma que, en este caso, no aplica para residuos depositados antes de la entrada en vigor de la legislación, como lo es el nuestro. Sin embargo, esto no significa que dicho depósito no represente un problema ambiental; es bien sabido que muchas leyes y normas mexicanas necesitan alguna actualización o reforma que indique como actuar en casos como este.

No obstante, el número de muestras fue calculado como lo pide la NOM-141-SEMARNAT-2003 y después corroborado con la norma NMX-AA-132-SCFI-2016, resultando en el siguiente plan de muestreo.

Plan de muestreo.

a) Objetivo.

Colectar y resguardar de manera responsable las porciones de jal de muestra para la realización de este trabajo de tesis.

b) El lugar y la fecha de elaboración.

Depósito de Jales de San Pedro Gilmonene, Guanajuato, México, realizado el 11 de septiembre de 2019.

c) Nombre de los responsables de su elaboración.

González Hernández Diego Ediel, Sierra Vega Gabriela, con la supervisión del Dr. Quezada Aguilera Víctor Manuel.

d) Descripción de actividades y los tiempos estimados de ejecución (Tabla IV).

e) Definición de las responsabilidades del personal involucrado en cada actividad (Tabla IV).

Tabla IV. Descripción de actividades para el muestreo, con tiempos y responsables.

Actividad	Tiempo de ejecución	Responsables
1. Primera inspección para reconocimiento del lugar y análisis de riesgo.	2 h	GHDE, QAVM.
2. Consulta del cálculo de volumen y tonelaje del depósito.	3 h	QAVM
3. Cálculo del número de muestras	1 h	GHDE, SVG.
4. Determinación de la malla de muestreo y de los puntos a muestrear.	1 h	GHDE, SVG.
5. Levantamiento de muestras superficiales	1.5 h	GHDE, SVG.
6. Levantamiento de muestras verticales en laderas	2 h	GHDE, SVG.
7. Embolsado y etiquetado de muestras	1 h	GHDE, SVG.
8. Transporte y resguardo de muestras	El necesario	QAVM

GHDE: González Hernández Diego Ediel; QAVM: Quezada Aguilera Víctor Manuel; SVG: Sierra Vega Gabriela.

f) Características del área de estudio.

Corresponde a un área de cuenca, denominada “Cuenca de la Soledad” con rocas predominantes de edad Cenozoica, las cuales consisten en sedimentos continentales tales como: areniscas y conglomerados. También existen rocas volcánicas como andesitas, riolitas y basaltos.

g) La superficie del área de estudio.

4 hectáreas

h) Los metales y metaloides a cuantificar y los métodos de medición correspondientes.

Cromo (Cr), Arsénico (As), Selenio (Se), Plata (Ag), Cadmio (Cd), Antimonio (Sb), Bario (Ba), Mercurio (Hg) y Plomo (Pb), utilizando el método de Fluorescencia de rayos X.

i) El o los tipos de muestreo a realizar y su justificación.

Muestreo vertical (muestreo exploratorio), debido al perfil del depósito, estamos hablando de un ambiente muy erosionado por acción del viento y de las corrientes de agua, además hay una cubierta vegetal que cubre parte importante del depósito, lo que significa que hay una cierta porción del suelo que se ha descompuesto para comenzar los horizontes A y B, partes importantes, ya que se sabe estos dan cabida al crecimiento de plantas y microorganismos. En el muestreo vertical se permite realizar pozos de determinada profundidad para obtener muestras más frescas o menos intemperizadas del jal.

j) El o los métodos para la distribución de los puntos de muestreo y su justificación.

Muestreo aleatorio simple, con este tipo de muestreo garantizamos la representatividad de las muestras ya que todos los puntos de muestreo tienen la misma oportunidad de ser elegidos, además no toma en cuenta la información propia del sitio ni de la contaminación, ni tampoco el conocimiento del profesionalista que se encarga de la ejecución. Además, se observa que puede realizarse en áreas de hasta 4 hectáreas, por lo que se cumple con el requisito establecido en la norma NMX-AA-132-SCFI-2016.

k) El número y distribución de los puntos de muestreo, el número de muestras y su cantidad, por tipo de muestreo, incluyendo las muestras para el aseguramiento de la calidad. La cantidad de las muestras debe ser conforme al numeral 4.2.4. de la NMX-AA-132-SCFI-2016.

Como se establece en la actividad 2, de la Tabla IV, de acuerdo con Quezada *et al.*, (2019) se obtuvo el volumen del depósito en m³ y el tonelaje utilizando el perfil topográfico (curvas de nivel) del sistema de información geográfica proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) correspondiente a la carta geográfica con clave: F14C43 escala 1:50 000 del año 2016 (carta en donde se ubica el depósito).

En la información extraída del INEGI se presenta un archivo en Formato de Intercambio de Dibujo (.dxf por sus siglas en inglés) en el cual viene las curvas de nivel de toda la zona (véase Figura 6). Utilizando un modelo de referencia

(véase Figura 7) se calculó el volumen del depósito utilizando el software MineSight, el cual permite realizar cálculos entre dos superficies en este caso las curvas topográficas del terreno. Y usando una densidad promedio de 2.7 t/m³ calculó el tonelaje. Obteniendo los siguientes resultados (véase Tabla V).

Tabla V. Datos calculados del volumen y tonelaje del depósito de jales.

Volumen	390,451.56 m ³
Tonelaje	1054219.22* t

*Suponiendo una densidad de 2.7 t/m³ del material ahí depositado.

Fuente: Modificado de Quezada, *et. al.* (2019).

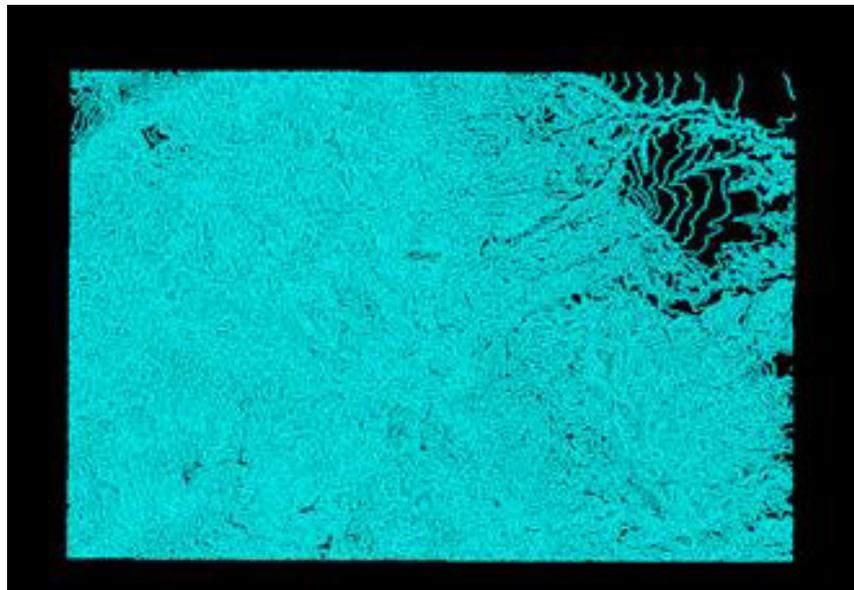


Figura 6. Curvas de nivel de la carta geográfica con clave: F14C43 Fuente: INEGI (2016).

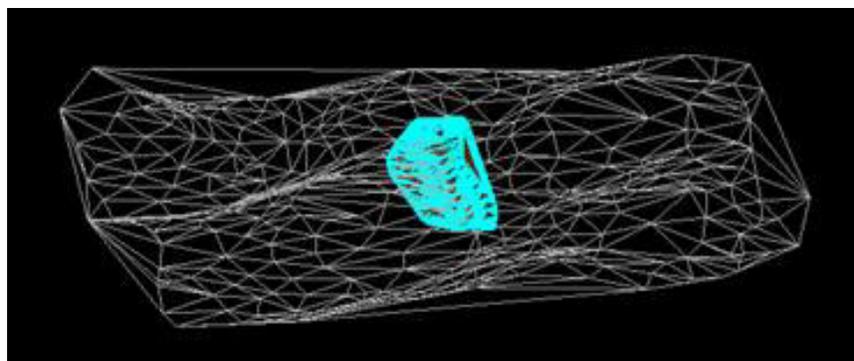


Figura 7. Modelo de la topografía inicial del depósito (en color gris las curvas actuales y en azul el modelo creado).

Hecho esto, obtuvimos el número de muestras de acuerdo con la guía (véase Figura 8) obtenida de la NOM-141-SEMARNAT-2003, la cual nos indica que son necesarias un mínimo de 10 muestras para representar una masa de unidad geológica de 1,054,219.2 toneladas de jal.

De igual forma, recalculamos usando la Tabla VI obtenida de la NMX-AA-132-SCFI-2016 en la cual sugiere tomar mínimo 19 muestras (16 superficiales y 3 verticales) para obtener la representatividad de una superficie de 4 hectáreas. Para efectos de garantizar mejores resultados tomaremos este valor y redondearemos a 20 el número de muestras (todas del tipo vertical) para el aseguramiento de la calidad en el muestreo. En cuanto a la cantidad de cada muestra, se recolectaron entre 2000 y 3000 gramos por muestra, el apartado 4.2.4 de la NMX pide recolectar por lo menos 500 gramos.

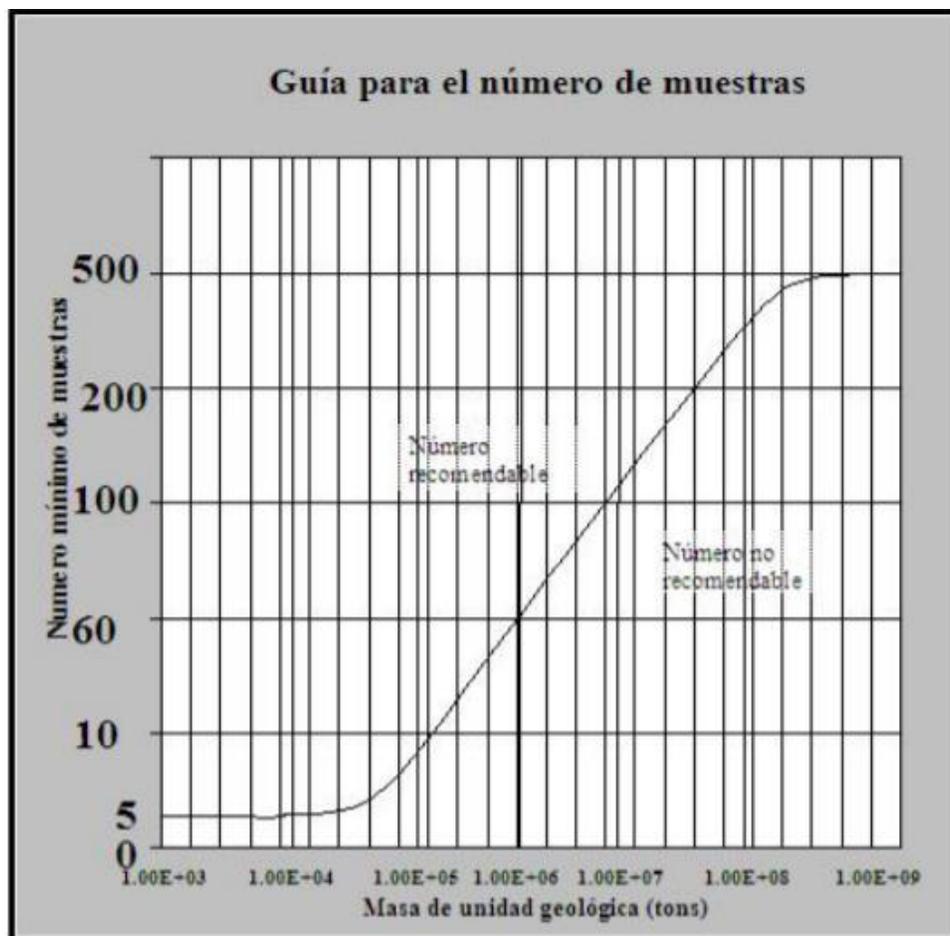


Figura 8. Guía para el número de muestras.

Fuente: [NOM-141-SEMARNAT-2003] Bruce Dowing, M. Sc., P. Geo. "ARD Sampling and Sample Preparation"

Tabla VI. Número de muestras de acuerdo al muestreo exploratorio.

Superficie del área de estudio (Hectáreas)		Número mínimo de puntos de muestreo superficial	Número mínimo de pozos verticales
De	Hasta superficies menores a		
0.1	0.2	6	1
0.2	0.3	7	1
0.3	0.4	8	2
0.4	0.5	9	2
0.5	0.7	10	2
0.7	1	11	2
1	2	12	2
2	3	14	3
3	4	16	3
4	5	18	4
5	6	19	4
6	7	20	4
7	8	21	4
8	9	22	4
9	11	23	5
11	12	24	5
12	14	25	5
14	16	26	5
16	18	27	5
18	20	28	6
20	22	29	6
22	25	30	6
25	28	31	6
28	30	32	6

Fuente: DOF, NMX-AA-132-SCFI-2016 (2016).

- l) La justificación para la ubicación de los puntos de muestreo y de la profundidad de las muestras, los criterios utilizados y la selección del equipo, manual o mecánico, para la toma de las muestras.

Para la ubicación de los puntos se trazó una malla (véase Figura 9) usando el software Google Earth Pro, en la cual se trazó una cuadrícula de 9 x 8 cuadros de 15.00 metros de lado cada uno. Posteriormente se eligieron 20 de estos cuadros realizando un experimento aleatorio y se tomaron las coordenadas de los puntos de muestreo correspondientes. La profundidad se seleccionó con el fin de superar el grosor de la capa de suelo fértil, por lo que se fijó en un promedio de 25 a 30 cm. El equipo utilizado fue manual (véase Figura 10), consistió en equipo básico de campo como lo es una pala redonda de 102 x 22 cm, un pico de jardinería de 92 cm, bolsas herméticas de diferentes tamaños, equipo de protección personal (calzado cómodo antiderrapante, ropa con reflejante, guantes, gafas y protección solar) y material

didáctico (rotuladores, etiquetas, lápiz, bitácora), además de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés), para la ubicación de las muestras en campo.



Figura 9. Malla de muestreo realizada en Google Earth Pro, 2018.



Figura 10. Equipo personal y de uso para el muestreo.

m) Los planos georreferenciados en coordenadas Geográficas o UTM, en los cuales se indique la superficie del área de estudio, la ubicación de puntos de muestreo, las vías de acceso al área, así como edificaciones y estructuras en el área.

El plano se encuentra en la Figura 11, georreferenciado en coordenadas geográficas, además en la Tabla VII se enlistan los veinte puntos de muestreo georreferenciados con sus respectivas coordenadas.

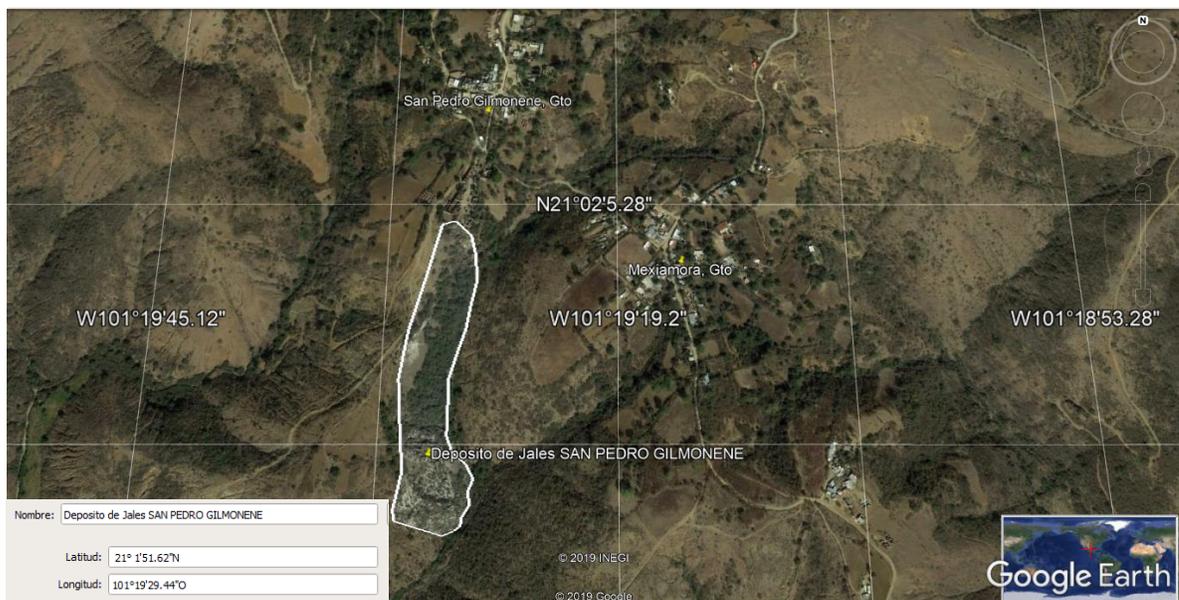


Figura 11. Ubicación georreferenciada del depósito de jales. Fuente: Google Earth Pro, 2019.

Tabla VII. Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo.

ID Muestra	Latitud	Longitud	ID Muestra	Latitud	Longitud
1	21° 1'51.00"N	101°19'30.50"O	11	21° 1'50.33"N	101°19'30.01"O
2	21° 1'51.00"N	101°19'29.99"O	12	21° 1'50.01"N	101°19'29.60"O
3	21° 1'51.00"N	101°19'28.15"O	13	21° 1'50.01"N	101°19'29.16"O
4	21° 1'50.33"N	101°19'30.50"O	14	21° 1'50.05"N	101°19'27.45"O
5	21° 1'50.33"N	101°19'30.48"O	15	21° 1'49.63"N	101°19'29.13"O
6	21° 1'50.96"N	101°19'29.20"O	16	21° 1'49.42"N	101°19'27.91"O
7	21° 1'51.12"N	101°19'28.38"O	17	21° 1'48.80"N	101°19'30.30"O
8	21° 1'50.40"N	101°19'27.82"O	18	21° 1'49.08"N	101°19'27.53"O
9	21° 1'50.40"N	101°19'27.42"O	19	21° 1'48.64"N	101°19'27.94"O
10	21° 1'50.00"N	101°19'29.99"O	20	21° 1'48.08"N	101°19'28.12"O

Fuente: Elaboración propia.

- n) Los tipos de envases, la identificación, la preservación y el transporte de las muestras y el tiempo máximo previo al análisis.

Los envases usados fueron bolsas de cierre hermético, de diferentes tamaños, e inclusive en el tratamiento después de este, las muestras, se guardaron en bolsas y se resguardaron en desecadores para mantener sus condiciones de origen.

El tiempo de preparación de las muestras duró de 4 a 6 semanas y durante todo ese tiempo los especímenes fueron apartados de la exposición a la luz solar, aislados de la humedad y de cambios de temperatura haciendo uso de desecadores y bolsas.

- o) Las medidas y equipo de seguridad.

Durante el muestreo se utilizó siempre el equipo de protección personal enlistado en el inciso l); a continuación, se muestran algunas fotografías en donde se observa del muestreo y del uso de equipo de seguridad (véase Figura 12).



Figura 12. Uso del equipo de protección personal (izquierda) y de las bolsas para resguardo del material (derecha).

- p) Las medidas de aseguramiento de la calidad del muestreo, incluyendo la cadena de custodia.

Se certificó que la profundidad de cada muestreo sobrepasara la capa de suelo que sostiene el medio biótico, es decir rebasando los 25 cm. En algunos casos por las condiciones del terreno (erosión y sistemas de tubificación presentes en el depósito) se tomaron muestras en taludes y laderas, situación que favorece la confiabilidad del muestreo ya que permite obtener ejemplares a mayor profundidad con solo realizar pequeñas excavaciones en forma de canal (véase Figura 13).

El etiquetado de cada muestra incluía un identificador numérico, la relación de sus coordenadas (Tabla VII), el cuadro del que fue tomada (en la malla elaborada en el inciso I), los datos de la persona que levantó el material, lugar y fecha. El resguardo de las muestras se realizó en un maletín al que solamente los responsables del proyecto tenían acceso.



Figura 13. Pozo de muestreo con escala (izquierda), aprovechamiento de laderas para levantar especímenes con muestreo de canal (derecha).

Tratamiento y preparación de las muestras.

Una vez que son trasladados cada uno de los ejemplares de suelo al laboratorio, es necesario realizar una serie de procedimientos que permita mejorar la calidad del material y prepararlo para cada una de las reacciones químicas y los tratamientos físicos a los que se sometieron en las pruebas de balance ácido-base, en la caracterización química de los EPT y demás ensayos a las que se especifican más adelante.

De acuerdo con la NMX-AA-132-SCFI-2016, el correcto tratamiento de las muestras debe realizarse de acuerdo con los siguientes puntos:

a) Recepción y registro.

Al llegar las muestras al laboratorio estas se registraron con la clave de identificación de campo, indicada en la etiqueta y la lista de las mediciones señaladas en la cadena de custodia (véase Figura 14). El número de muestra en campo se realizó en base a la malla de muestra (con números no seriados, resultado del muestreo de tipo aleatorio simple), sin embargo, para fines de una mejor interpretación de datos en este documento se renombro el número de muestra por un identificador de muestra (ID Muestra) como se muestra en la Tabla VII, haciendo uso de números seriados (ID Muestra del 1 al 20). No obstante, esta nueva forma de registro se mantiene correlacionada con la clave de identificación de campo.

Hecho esto, parte de la recepción de muestras incluye una limpieza de cada una de estas, para ello se retiró la fracción gruesa del material, como lo son piedras, hierbas secas, basura, etc., prácticamente todos aquellos elementos que no son considerados suelo y que contaminan nuestro espécimen.



Figura 14. Registro, limpieza, etiquetado y resguardo de las muestras.

b) Secado.

El secado se realiza con el propósito de facilitar el manejo de las muestras, mejorar la homogeneización y disminuir los cambios químicos no deseados. La NMX-AA-132-SCFI-2016 recomienda un secado a temperatura ambiente (no mayor a 35 °C), con una humedad relativa de entre 30 y 70%. Sin embargo, en el apartado 9.2.3 de la Prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO₂, presente en el Anexo Normativo 5 de la NOM-141-SEMARNAT-2003 solicita secar las muestras de 16 a 20 horas a una temperatura constante de 104 ± 2 °C, esto como parte del procedimiento para la determinación del contenido de sólidos detallado a continuación:

- I. Se obtuvo, en primer lugar, el peso constante del recipiente en donde se colocó después la muestra para el secado. Para ello, dicho recipiente (de tamaño adecuado) se colocó en una estufa a una temperatura de 104 ± 2 °C, posteriormente se dejó enfriar en un desecador y se pesó en una balanza analítica con una precisión mínima de ± 0.1 g. Se registró el peso del recipiente (Figura 15, imagen i).
- II. A cada recipiente se le colocaron aproximadamente 100 g de la muestra a analizar (de algunas muestras se tomaron 200 g), después se pesaron los recipientes para determinar el peso de la muestra ± 0.1 g y se registró en peso como P_H (Figura 15, imagen ii).
- III. Se secaron las muestras durante 20 horas a 104 ± 2 °C. Al terminar este tiempo, se dejaron enfriar en desecador a temperatura ambiente y se registró el peso ± 0.1 g como P_S (Figura 15, imagen iii).
- IV. Se calculó la fracción de sólido utilizando la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{P_S}{P_H}$$

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)

Con la información obtenida también fue posible calcular el porcentaje de humedad usando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{\text{Peso humedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso humedo}} \right) * 100$$



Figura 15. Registro de los pesos en el proceso de secado. De izquierda a derecha: i: Peso del recipiente seco, ii: Peso del recipiente más la muestra húmeda, iii: Peso del recipiente más la muestra seca.

c) Cribado o tamizado (determinación de la granulometría).

Una vez secadas las muestras, se deben disgregar. La disgregación de las muestras puede realizarse manualmente, con un mazo o rodillo de madera, o mecánicamente, con un equipo diseñado para tal efecto para no generar más finos que los que originalmente posee la muestra.

En este caso, para separar las rocas de mayor tamaño y lograr una muestra homogénea el 100% de las muestras pasó por un tamizado en la malla no. 100, con tamaño de abertura de 149 micras. Inclusive algunas muestras fueron tratadas con mallas superiores para terminar con la limpieza del material y lograr separar la mayor cantidad de basura, algunas de las mallas utilizadas fueron la 120, 140 y 170, con tamaño de abertura de 125, 105 y 88 micras respectivamente. El material grueso o retenido en la malla no se considera como suelo y puede desecharse, el material fino contenido en la charola se colocó directamente en el envase seleccionado para continuar con el tratamiento.

De igual forma, Quezada, *et al.* (2019) determinó la granulometría del mineral tomando seis muestras de la zona de estudio, cuyos percentiles 80 de dichos ejemplares se ubicaron como se muestra en la Tabla VIII.

Tabla VIII. Resultados de la granulometría.

No. de muestra	Percentil 80
Muestra 1	43 μm
Muestra 2	48 μm
Muestra 3	59 μm
Muestra 4	59 μm
Muestra 5	65 μm
Muestra 6	64 μm

Fuente: Quezada, *et al.* (2019)

d) Homogeneizado y partición.

Este proceso es necesario para asegurar que la muestra que se analizará posteriormente, representa la composición y la granulometría del suelo y para garantizar que las cuantificaciones se realizarán en muestras homogéneas y representativas de la muestra de suelo recolectada en el campo (DOF, NMX-132, 2016).

El homogeneizado y partición se realizó para todas las muestras, de la siguiente manera:

- I) Se colocó sobre una mesa de cuarteo, previamente aseada y libre de todo tipo de impurezas, el contenido total de la muestra. Se realizaron dos cortes para lograr separar la muestra en cuatro porciones de igual tamaño (véase Figura 16).
- II) Posteriormente se retiran dos de las porciones, preferentemente las ubicadas en los polos opuestos como se muestra en Figura 17 y las dos porciones restantes se homogenizan el número de veces que sea necesario. Se repitió este procedimiento hasta obtener la cantidad de muestra necesaria para el desarrollo de las demás pruebas, como mínimo 50 gramos por muestra.
- III) Por último, se continuo con el resguardo y la cadena de custodia de las muestras, se guardaron en bolsas herméticas con su respectiva etiqueta y en un lugar adecuado.



Figura 16. Cuarteo de la muestra, paso I

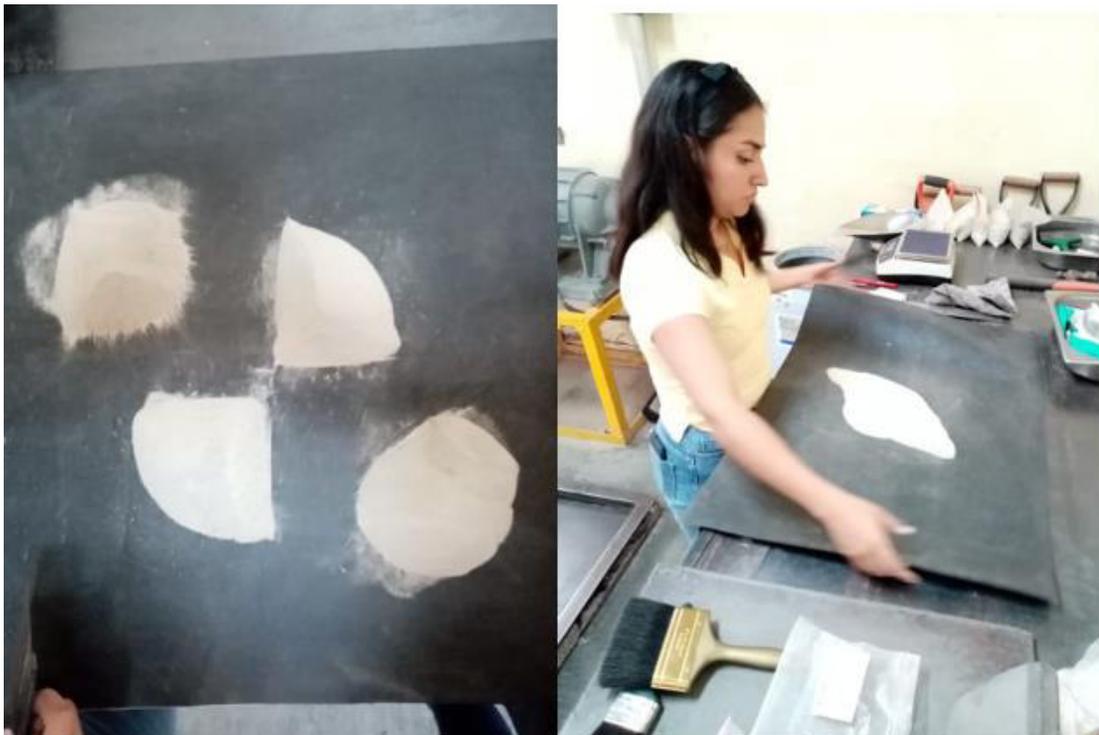


Figura 17. Cuarteo de la muestra, paso II.

e) Incineración y determinación de cenizas.

Este procedimiento se realizó con una pequeña porción de la muestra que ya pasó por todos los tratamientos previos, con el objetivo de ser preparada para la Prueba de Balance Ácido-Base.

La incineración pretende eliminar el resto de las partículas orgánicas que puede presentar la muestra y que no alcanzaron a ser disgregadas por los otros tratamientos, para ello se siguió el proceso indicado en la Figura 18.



Figura 18. Proceso de incineración y determinación de cenizas.

Para calcular el porcentaje de cenizas se usó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{(\text{Peso del crisol} + \text{Peso de la muestra}) - \text{Peso final}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100$$

Prueba de Balance Ácido-Base para jales que contienen sulfuros de metales.

La peligrosidad de los jales debida a su reactividad está determinada por la oxidación de los sulfuros, los cuales, según la bibliografía consultada, se sabe están presentes en la zona de estudio. El producto de la oxidación de los sulfuros metálicos es ácido sulfúrico, que, si no es neutralizado por minerales con una reacción básica, produce DAM que contiene disueltos metales y metaloides potencialmente tóxicos (DOF, NOM-141, 2003).

Considerando que la capacidad de los jales para generar DA depende del balance entre los minerales productores potenciales de ácido (sulfuros) y los minerales consumidores potenciales de ácido (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos), se han desarrollado diversos procedimientos para medir esta relación y determinar si los jales que contienen sulfuros de metales, son potenciales generadores de DA.

Los procedimientos más comúnmente utilizados para detectar la posible generación de DA es la denominada "Prueba de Balance Ácido-Base (ABA)" (Sobek, Schuller, Freeman, & Smith, 1978) y la "Prueba Modificada de Balance Ácido-Base (PM-ABA)" (Lawrence & Wang, 1997).

Por tratarse de un procedimiento relativamente simple y de fácil interpretación se optó por evaluar la peligrosidad de los jales de acuerdo a lo lineamientos de la PM-ABA. Se sabe que produce mejores resultados que la ABA, ya que no sobreestima la cantidad de los minerales que producen ácido sulfúrico, ni los que pueden consumirlo. Además, es el procedimiento que sugiere usar la NOM-141-SEMARNAT-2003. Dicha prueba se realiza calculando el Potencial de Acidez (PA) y el Potencial de Neutralización (PN), la metodología se realizó como se desglosa a continuación:

Potencial de Neutralización (PN).

En la prueba modificada se mide el PN mediante la reacción de los jales con ácido clorhídrico (HCl), a temperatura ambiente y agitando durante 24 horas. Además, señala que se determine el pH al término de la reacción de neutralización, con el fin de comprobar que no sea adicionado HCl en exceso (DOF, 2004).

El procedimiento se realiza en dos partes, las cuales se detallan a continuación:

a) Medición cualitativa de carbonatos (Figura 19):



Figura 19. Procedimiento A para la determinación del Potencial de Neutralización.

b) Medición del poder de neutralización (Figura 20).

En este procedimiento se usó el Ácido Clorhídrico 1 N y una solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) 0.1 N.

I. Se colocaron 2 g de muestra homogenizada seca en un vaso de precipitado y agregaron 90 ml de agua destilada (mezcla 1).

II. Se agregó al inicio de la prueba "Tiempo 0" el volumen de HCl indicado en la tabla VIII, de acuerdo al grado de reacción (mezcla 2). Se registró el volumen añadido como V_a

III. Se agitó la mezcla 2 durante 2 h, se agregó el volumen de HCl indicado en la tabla VIII para el tiempo de 2 horas (mezcla 3). Se registró el volumen añadido como V_b

IV. Se agitó la mezcla 3 durante 22 h y al termino se midió su pH, si fue mayor a 2.5 se le añadió mas HCl hasta un valor de pH de 2.0 a 2.5, continuó la agitación 2 h más. Se registró el volumen añadido como V_c

V. Se adicionó agua destilada al vaso hasta un volumen de 125 ml, se tituló con una solución de NaOH, hasta un pH final de 8.3. Se registró el volumen de la titulación como V_{NaOH}

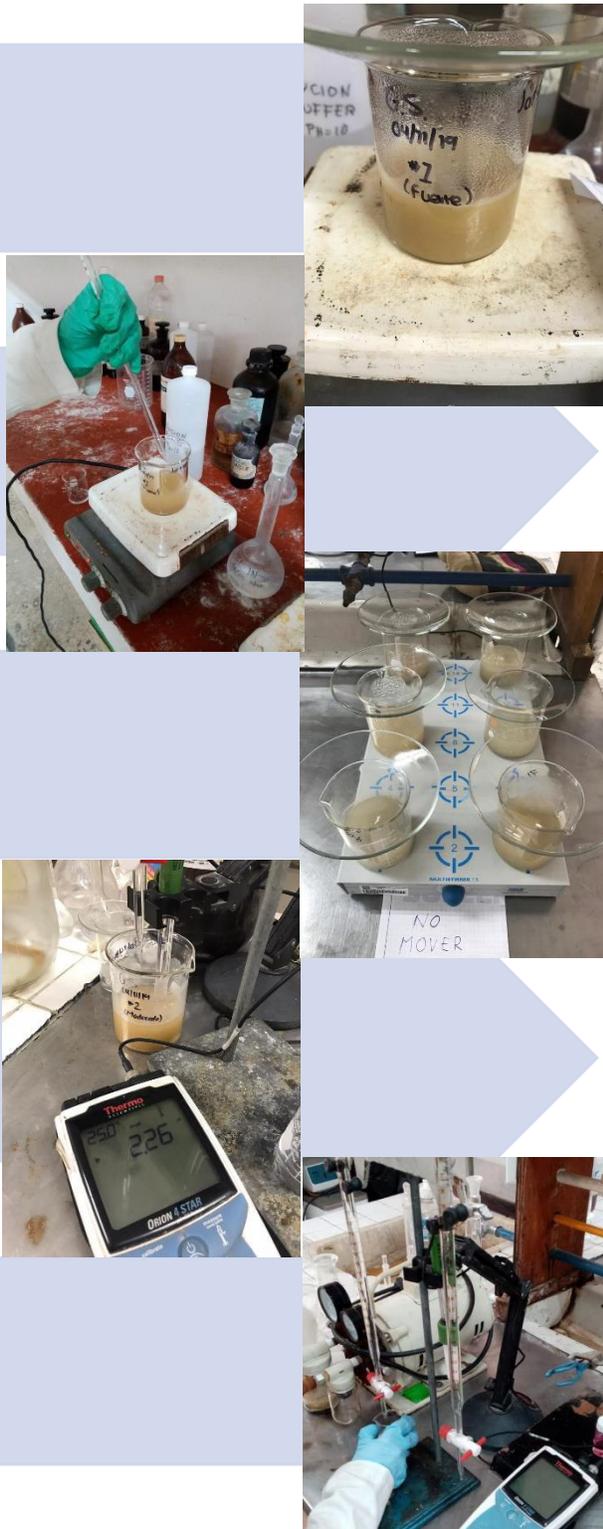


Figura 20. Procedimiento B para la determinación del Potencial de Neutralización.

Tabla IX. Cálculo del volumen de HCl para determinar el PN.

Grado de reacción (neutralización de carbonatos)	HCl solución 1.0 N (ml)	
	"Tiempo 0"	"Tiempo 2 horas"
Nulo	1.0	1.0
Bajo	2.0	1.0
Moderado	2.0	2.0
Fuerte	3.0	2.0

Fuente: DOF, 2004 (NOM-141-SEMARNAT-2003)

Se calculó el total de ml gastados de HCl 0.1 N usando la siguiente ecuación:

$$V_f = V_a + V_b + V_c$$

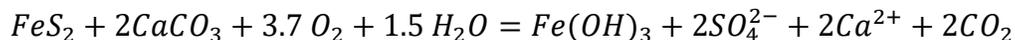
Se calculó el PN de los jales, expresado como kg_{CaCO3}/ton, utilizando la siguiente fórmula:

$$PN = \frac{(V_f \text{ en mL de HCl}) - (0.1 * \text{vol en mL de NaOH})}{\text{peso de la muestra (g)}} \times 50$$

Potencial de Acidez (PA)

Para esta prueba se determina el azufre total de acuerdo a la NMX-B-400-1970 o mediante la combustión del S en un ambiente rico en oxígeno, con la detección del dióxido de azufre por IR u otras técnicas; por otro lado, se determina el azufre que está en forma de sulfatos. Para ello se realiza la extracción de los sulfatos de acuerdo a lo señalado en el punto 7.1.1. de la NMX-B-021-1982 y se cuantifican los sulfatos por el método turbidímetro EPA-9038 (DOF, 2004).

El PA es calculado como la diferencia entre el azufre total (S_{total}) y el azufre como sulfatos ($S_{SO4^{2-}}$) y se multiplica por 31.25; valor que se obtiene de la siguiente reacción de neutralización de los sulfuros (Skoulsen, Simmons, Ma Donald, & Ziemkiewicz, 2002).



Interpretando la estequiometría de esta reacción, 1 tonelada de jales que contiene 10 kg de S (1%) requiere de 31.25 kg CaCO₃ para no producir acidez.

Dado esto, el PA expresado como kg requeridos de CaCO₃/ton de jales, se calcula usando la siguiente fórmula:

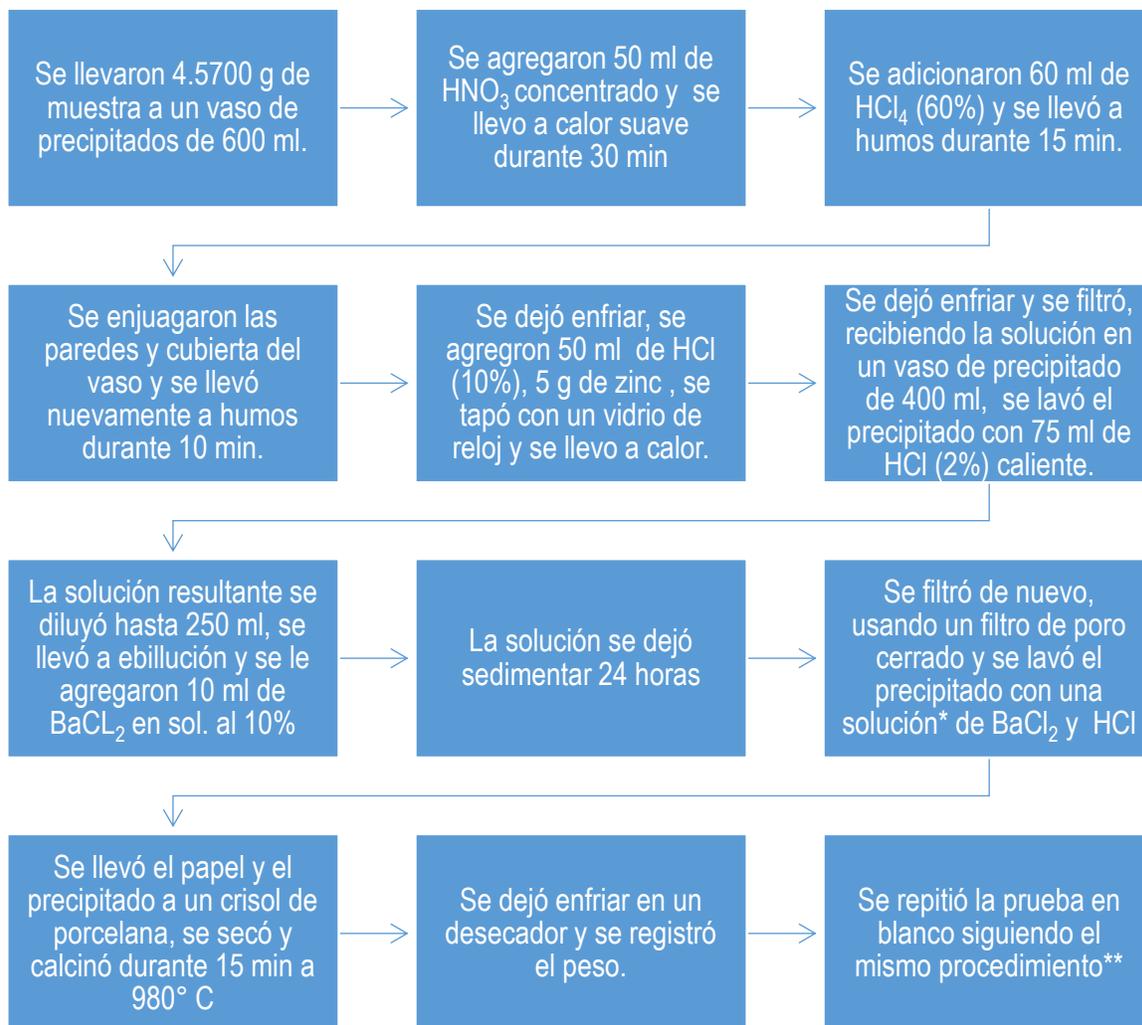
$$PA = \%S^{2-} \times 31.25$$

$$\%S^{2-} = (\%S_{total} - \%S_{sulfatos})$$

Los procedimientos seguidos para las determinaciones de las formas del azufre se explican a continuación:

a) Determinación de azufre total (% S_{total}).

Se realizó este procedimiento conforme a la Norma Mexicana NMX-B-400-1970, el cual se detalla en la Figura 21.



*La solución de lavado se preparó mezclando 10 ml de $BaCl_2$ al 10% con 10 ml de HCl concentrado, diluyendo esta mezcla hasta 1000 ml con agua desionizada.

**Para la prueba en blanco se utilizan las mismas porciones de los reactivos, pero sin utilizar la muestra.

Nota 1: En todas las diluciones se debe usar agua desionizada, a menos que se indique lo contrario.

Nota 2: La solución resultante de la segunda filtración se guardó para usarse como solución muestra en la prueba de Determinación de Sulfatos, ya que en esta solución fue donde se dispersó esta forma del azufre.

Figura 21. Procedimiento para la determinación del porcentaje de azufre total en sulfuros.

Posteriormente se calculó el contenido de azufre siguiendo la ecuación:

$$\%S_{total} = (A - B)^3$$

Donde:

A= Peso en g del precipitado de sulfato de bario contenido en la muestra.

B= Peso del precipitado de sulfato de bario obtenido en la prueba en blanco.

b) Determinación de azufre en forma de sulfatos (% S_{sulfatos}).

Para la cuantificación del azufre en forma de sulfatos se siguió el método por turbidimetría tomado de la Norma 9038 de la Environmental Protection Agency (EPA) del Gobierno de los Estados Unidos.

A diferencia del método establecido, el equipo utilizado, fue un espectrofotómetro UV de espectro visible (SMART Water Analysis Lab, La Motte Model SCL-05), ver Figura 22, el cual, al ser un equipo diseñado para trabajos de campo, no necesita de una curva de calibración como se indica en la EPA-9038, lo cual simplificó más el procedimiento seguido, dando como resultado el que se indica en la Figura 23.



Figura 22. Espectrofotómetro utilizado para la determinación de los sulfatos (Fishersci.com, 2020).



Se colocaron 10 ml de la muestra en un vaso de precipitado de 50 ml.



Se agregaron 0.5 ml de la solución condicionante*.



Se agregaron 0.1 g de cristales de BaCl₂ y se agitó a velocidad constante por 1 min exacto (mezcla 1).



En una celda de ensayo se colocó agua desionizada y se realizó la lectura de prueba de blanco.



Se colocó la mezcla 1 en otra celda de ensayo y se tomó la lectura de la concentración de sulfatos cada 30 seg en un periodo de 4 min.



Se registró el valor más alto en la concentración de sulfatos obtenido para cada muestra (en ppm).

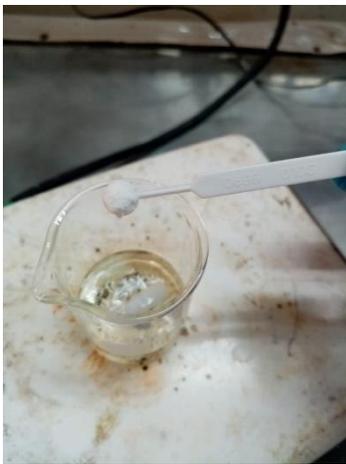
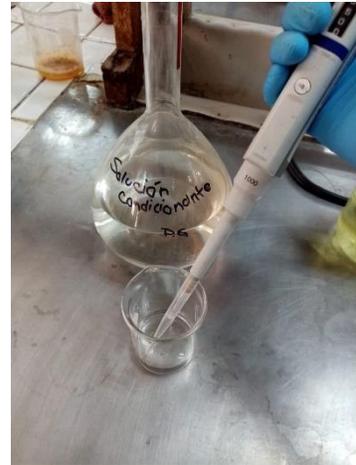


Figura 23. Procedimiento para la determinación de sulfatos por el método de turbidimetría EPA-9038.

Para la preparación de la solución condicionante se agregaron 30 ml de HCl concentrado a 300 ml de agua desionizada, después se adicionaron 100 ml de etanol y 75 g de NaCl diluidos en 50 ml de agua desionizada. Por último, se agregaron 50 ml de glicerina y se mezcló.

Dado esto, se calculó el porcentaje de azufre usando la siguiente ecuación.

$$\%S_{sulfatos} = \frac{\text{Lectura de la muestra en ppm}}{10,000}$$

Para finalizar, se calculó el PA expresado como kg requeridos de CaCO₃/ton de jales como se indica en la segunda ecuación presentada con anterioridad (numeral 5.3.2).

Caracterización de los EPT mediante el método de fluorescencia de rayos X.

Para este método fue necesario realizar un tratamiento extra a cada una de las muestras, esto con el objetivo de disminuir el tamaño de partícula, para ello se tomaron aproximadamente 3 g de muestra y se molieron manualmente en un mortero de ágata (Figura 24), aprovechando la dureza y poca porosidad del material de fabricación del mortero con el fin de lograr fracturar las partículas de la muestra y evitar la contaminación de la muestra con elementos externos.

Gracias a este postratamiento se logró cumplir con el tamaño de partícula de las muestras, el cual fue de <75 micras (polvo), como solicitó el LICAMM - UG, lugar donde fueron enviadas para ser analizadas.

Ya en el LICAMM - UG, para determinar la concentración de los EPT presentes en los jales se usó el método de fluorescencia de rayos X, en el cual las muestras se analizaron con un espectrómetro de fluorescencia de rayos X Rigaku NEX CG utilizando dispersión de energía (EDXRF). El espectrómetro tiene un tubo de rayos X de ánodo de Paladio (Pd), una potencia máxima de 50 W con un voltaje máximo de 50 kV -2 mA y en atmosfera de Helio (He).



Figura 24. Molienda de la muestra para cumplir con los requisitos de prueba de fluorescencia por rayos X.

Determinación de la gravedad específica de los jales.

Una vez entregados los resultados del LICAMM – UG, fue necesario determinar la gravedad específica de las muestras, esto para poder convertir los datos arrojados del laboratorio de ppm a mg/kg y lograr una correcta comparación entre los LMP para los constituyentes tóxicos base seca (Tabla X) y los valores obtenidos como concentración de cada muestra.

Tabla X. Límites máximos permisibles (LMP) para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT y base seca.

Elemento contaminante	LMP (mg/l)	LMP (mg/kg)
	PECT	Base seca
Antimonio	0.53	10.6
Arsénico	5	100
Bario	100	2000
Berilio	1.22	24.4
Cadmio	1	20
Cromo	5	100
Mercurio	0.2	4
Plata	5	100
Plomo	5	100
Selenio	1	20

Fuente: DOF, 2004 (NOM-141-SEMARNAT-2003).

Para este procedimiento se siguió una metodología muy conocida, haciendo uso de un picnómetro, ya que es un medio relativamente sencillo en el cual se obtienen resultados más precisos en comparación con otros métodos gravimétricos.

Para ello se realizaron las siguientes pesadas (Figura 25), usando una balanza analítica con precisión de 0.0001 g:

- I. Peso del picnómetro vacío, a este valor lo registramos como "A".
- II. Peso del picnómetro, más una porción del mineral, registrado como "M".
- III. Peso del picnómetro, más la misma porción del mineral y lleno de agua, cuidando de eliminar todas las burbujas presentes en la muestra y siendo demasiado minuciosos para mantener las paredes externas del picnómetro completamente secas, registrado como "S".
- IV. Peso del picnómetro, lleno de agua y con paredes externas completamente secas, registrado como "P".

Se repitió el proceso 3 veces por muestra y se obtuvo el valor promedio de la gravedad específica (G.E.) haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$G.E. = \frac{M - A}{P + M - A - S}$$



Figura 25. Determinación de la gravedad específica de las muestras, toma de pesos "A", "M", "S" y "P".

Por último, para interpretar los resultados del LICAMM - UG, a cada valor obtenido de concentración por elemento en cada muestra, fue multiplicado por el valor de la gravedad específica de la muestra respectiva y de esta forma, se logró la conversión de unidades para lograr identificar si los elementos analizados superaban los LMP establecidos en la NOM-141-SEMARNAT-2003 y la NOM-052-SEMARNAT-2005. Los resultados obtenidos se detallan en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

Fracción de sólidos y porcentaje de humedad.

En la siguiente tabla se observa la secuencia de resultados obtenidos tras el pesado de cada una de las muestras de acuerdo con los pasos establecidos en el procedimiento para la determinación de la fracción de sólidos.

Tabla XI. Resultados del proceso de secado y determinación de la Fracción de Sólidos.

ID Muestra	Peso del recipiente (PR)	Peso húmedo de la muestra (PH)	Peso seco de la muestra (PS)	Fracción de sólidos (FS)
1	101.40	100.00	100.00	1.0000
2	96.90	100.00	99.90	0.9990
3	100.10	200.00	198.90	0.9945
4	101.90	100.00	98.30	0.9830
5	93.55	100.00	99.65	0.9965
6	100.40	100.00	99.70	0.9970
7	100.00	100.00	99.50	0.9950
8	98.70	200.00	200.00	1.0000
9	102.20	200.00	198.30	0.9915
10	100.00	100.00	99.90	0.9990
11	102.20	200.00	196.70	0.9835
12	101.25	100.00	99.80	0.9980
13	97.30	100.00	99.90	0.9990
14	94.50	200.00	199.70	0.9985
15	97.30	100.00	99.50	0.9950
16	102.25	200.00	197.75	0.9888
17	100.60	100.00	99.70	0.9970
18	100.10	100.00	98.90	0.9890
19	100.50	100.00	99.50	0.9950
20	93.80	100.00	99.00	0.9900

Datos de los pesos en gramos, usando una balanza granataria con precisión de 0.1 g

A continuación, los valores de porcentaje de humedad obtenidos para cada una de las muestras, dichos valores (redondeados) se encuentran en el rango del 0 al 2 por ciento, siendo el valor promedio 0.6 por ciento.

Tabla XII. Resultados del porcentaje de humedad.

ID Muestra	Peso húmedo de la muestra (PH)	Peso seco de la muestra (PS)	Porcentaje de Humedad
1	100.00	100.00	0%
2	100.00	99.90	0%
3	200.00	198.90	1%
4	100.00	98.30	2%
5	100.00	99.65	0%
6	100.00	99.70	0%
7	100.00	99.50	1%
8	200.00	200.00	0%
9	200.00	198.30	1%
10	100.00	99.90	0%
11	200.00	196.70	2%
12	100.00	99.80	0%
13	100.00	99.90	0%
14	200.00	199.70	0%
15	100.00	99.50	0%
16	200.00	197.75	1%
17	100.00	99.70	0%
18	100.00	98.90	1%
19	100.00	99.50	1%
20	100.00	99.00	1%

Datos de los pesos en gramos, usando una balanza granataria con precisión de 0.1 g

Determinación de porcentaje de cenizas.

En la Tabla XIII se encuentran los datos arrojados del cálculo del porcentaje de cenizas para las muestras, así como los valores del pesado de cada una de las muestras, antes y después del proceso de determinación de cenizas. El porcentaje de cenizas promedio fue de 6.004 por ciento, con valores que van desde el 3.262 al 9.670 por ciento.

Tabla XIII. Resultados del porcentaje de cenizas.

ID Muestra	Pc	Pm	Pc+Pm	Pf	% Cenizas
1	38.7745	25.0001	63.7746	62.2836	5.964%
2	47.2945	25.0002	72.2947	71.3527	3.768%
3	37.8059	25.0001	62.8060	61.0536	7.010%
4	54.9939	25.0001	79.9940	78.7592	4.939%
5	49.2309	25.0000	74.2309	72.5506	6.721%
6	40.6279	25.0001	65.6280	63.9111	6.868%
7	37.7598	25.0002	62.7600	61.4233	5.347%
8	39.0522	25.0000	64.0522	62.6845	5.471%
9	38.7786	25.0000	63.7786	62.4015	5.508%
10	47.4141	25.0000	72.4141	70.4771	7.748%
11	38.7755	25.0002	63.7757	62.2801	5.982%
12	37.7761	25.0001	62.7762	61.1221	6.616%
13	38.7529	25.0002	63.7531	62.6755	4.310%
14	49.2331	25.0002	74.2333	72.8440	5.557%
15	37.7976	25.0001	62.7977	60.9813	7.266%
16	39.0700	25.0000	64.0700	62.4806	6.358%
17	44.0651	25.0001	69.0652	67.4260	6.557%
18	44.0688	25.0001	69.0689	66.6515	9.670%
19	53.0665	25.0002	78.0667	77.2513	3.262%
20	40.6260	25.0000	65.6260	64.3348	5.165%

Pc= peso del crisol, Pm= peso de la muestra, Pf= peso final

Determinación de pH

Determinación del potencial de neutralización (PN)

A continuación, los valores obtenidos de potencial de neutralización expresados en kgCaCO₃/tonelada de jal para cada una de las muestras; así como sus respectivos valores de cálculo previos, como peso de la muestra, nivel de efervescencia, potencial de Hidrogeno al final de las 24 horas de estudio y los mililitros de soluciones de HCl y NaOH agregados durante el estudio.

Estos valores servirán más adelante para calcular la relación PN/PA.

Tabla XIV. Resultados del Potencial de Neutralización (PN).

ID Muestra	Efervescencia	Peso (g)	pH final 24 h	HCl (ml)				NaOH (ml)	PN (kgCaCO ₃ /ton jal)
				Va	Vb	Vc	Vf		
1	B	2.0001	7.67	2.00	1.00	1.30	4.30	7.1	89.75
2	B	2.0056	5.47	2.00	1.00	0.40	3.40	4.8	72.80
3	F	2.0003	5.07	3.00	2.00	0.30	5.30	4.1	122.23
4	M	2.0043	6.97	2.00	2.00	0.35	4.35	3.3	100.28
5	F	2.0002	2.59	3.00	2.00	0.05	5.05	5.3	112.99
6	F	2.0004	3.28	3.00	2.00	0.30	5.30	4.6	120.98
7	M	2.0007	7.02	2.00	2.00	0.40	4.40	4.1	99.72
8	M	2.0001	3.00	2.00	2.00	0.20	4.20	5.7	90.75
9	M	2.0018	5.86	2.00	2.00	0.40	4.40	4.2	99.41
10	F	2.0004	4.95	3.00	2.00	0.40	5.40	4.7	123.23
11	B	2.0000	7.60	2.00	1.00	1.50	4.50	10.9	85.25
12	M	2.0004	7.52	2.00	2.00	0.50	4.50	5.1	99.73
13	B	2.0002	2.75	2.00	1.00	0.10	3.10	4.4	66.49
14	B	2.0007	7.42	2.00	1.00	0.50	3.50	6.7	70.73
15	F	2.0010	5.98	3.00	2.00	0.30	5.30	3.5	123.69
16	F	2.0004	2.18	3.00	2.00	0.00	5.00	8.0	104.98
17	M	2.0002	7.67	2.00	2.00	1.10	5.10	7.8	107.99
18	M	2.0010	8.10	2.00	2.00	1.50	5.50	8.3	116.69
19	F	2.0011	7.84	3.00	2.00	1.80	6.80	6.0	154.91
20	B	2.0019	7.79	2.00	1.00	1.30	4.30	7.4	88.92

B= baja, M=moderada, F=fuerte, Va=volumen añadido a las 0 horas, Vb=volumen añadido a las 2 horas, Vc=volumen añadido a las 22 horas, Vf=Va+Vb+Vc

Determinación del potencial de acidez (PA)

i. Determinación del porcentaje de azufre total.

En la Tabla XV se listan los pesajes obtenidos con los que se llegaron a obtener los resultados del porcentaje de azufre total; el valor promedio de dicho porcentaje es de 0.1259 por ciento. Los valores de este porcentaje son usados más adelante para el cálculo del potencial de acidez.

Tabla XV. Resultados de las pruebas para la determinación del porcentaje de azufre total.

ID Muestra	Peso inicial de la muestra	Peso del crisol	Peso inicial (Pm+Pc)	Peso final (Pm+Pc)	Peso final de la muestra	%S Total
1	4.5700	55.2397	59.8097	59.4207	4.1810	0.029460683
2	4.5700	39.0411	43.6111	43.0592	4.0181	0.104987048
3	4.5700	38.8035	43.3735	43.0375	4.2340	0.016747742
4	4.5703	49.1831	53.7534	53.4815	4.2984	0.007050276
5	4.5700	39.0609	43.6309	43.2749	4.2140	0.020990315
6	4.5701	47.4678	52.0379	51.6780	4.2102	0.021893252
7	4.5702	26.9792	31.5494	30.9714	3.9922	0.123394424
8	4.5702	40.7267	45.2969	44.8674	4.1407	0.042636568
9	4.5701	49.6353	54.2054	53.9622	4.3269	0.004334734
10	4.5700	55.0708	59.6408	59.2140	4.1432	0.041655621
11	4.5700	40.6678	45.2378	44.7675	4.0997	0.059387471
12	4.5701	55.1430	59.7131	59.4158	4.2728	0.010239518
13	4.5702	44.0305	48.6007	48.1245	4.0940	0.062122661
14	4.5700	47.6297	52.1997	51.7012	4.0715	0.073218246
15	4.5701	47.5132	52.0833	51.6395	4.1263	0.048089557
16	4.5701	55.2838	59.8539	59.4446	4.1608	0.035660020
17	4.5700	41.2323	45.8023	45.3889	4.1566	0.037009266
18	4.5700	37.8040	42.3740	41.7952	3.9912	0.123990231
19	4.5702	47.4293	51.9995	51.0204	3.5911	0.726451476
20	4.5701	27.0208	31.5909	31.2097	4.1889	0.027284493

Pm+Pc, indica la suma de ambos pesos, peso de la muestra y peso del crisol. Todos los pesos indicados en gramos.

ii. Determinación del factor de corrección por ensayo de blancos.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras la determinación del factor de corrección con el que se ajustaron los resultados del porcentaje de azufre total tras una serie de ensayos de blancos.

Tabla XVI. Determinación del factor de corrección usado por el ensayo de blancos para el ensayo de azufre total.

ID Muestra	Peso inicial de la muestra	Peso del crisol	Peso inicial (Pm+Pc)	Peso final (Pm+Pc)	Peso final de la muestra
Blanco 1	0.0000	40.6770	40.6770	40.7585	0.0815
Blanco 2	0.0000	41.1494	41.1494	41.2410	0.0916
Blanco 3	0.0000	40.7537	40.7537	40.8293	0.0756
Blanco 4	0.0000	41.2776	41.2776	41.3495	0.0719
Factor de corrección por ensayo de blancos (promedio):					0.0801

Pm+Pc, indica la suma de ambos pesos, peso de la muestra y peso del crisol. Todos los pesos indicados en gramos. Se realizaron 5 ensayos de muestra por cada ensayo de blanco.

iii. Determinación de azufre presente en sulfatos y potencial de acidez.

En sucesiva, se muestra la tabla con los valores obtenidos de la determinación de azufre presente en sulfatos expresada en partes por millón y porcentaje, posteriormente se encuentra la diferencia de azufre total menos el azufre presente en sulfatos, para finalizar con el cálculo del potencial de acidez expresado en kg CaCO₃/tonelada de jal para cada una de las muestras.

Tabla XVII. Resultados de la determinación del azufre presente en sulfatos y del Potencial de Acidez (PA).

ID Muestra	%S Total	SSO ₄ ²⁻ (PPM)	SSO ₄ ²⁻ (%)	% S ²	PA (kgCaCO ₃ /ton jal)
1	0.029460683	11	0.0011	0.028360683	0.886271356
2	0.104987048	10	0.001	0.103987048	3.249595265
3	0.016747742	25	0.0025	0.014247742	0.44524194
4	0.007050276	28	0.0028	0.004250276	0.132821125
5	0.020990315	50	0.005	0.015990315	0.499697357
6	0.021893252	7	0.0007	0.021193252	0.66228914
7	0.123394424	28	0.0028	0.120594424	3.768575744
8	0.042636568	20	0.002	0.040636568	1.269892761
9	0.004334734	21	0.0021	0.002234734	0.069835424
10	0.041655621	24	0.0024	0.039255621	1.226738157
11	0.059387471	10	0.001	0.058387471	1.824608479
12	0.010239518	20	0.002	0.008239518	0.257484928
13	0.062122661	28	0.0028	0.059322661	1.853833168
14	0.073218246	32	0.0032	0.070018246	2.188070183
15	0.048089557	28	0.0028	0.045289557	1.415298654
16	0.03566002	72	0.0072	0.02846002	0.889375614
17	0.037009266	28	0.0028	0.034209266	1.069039569
18	0.123990231	50	0.005	0.118990231	3.718444728
19	0.726451476	52	0.0052	0.721251476	22.53910861
20	0.027284493	15	0.0015	0.025784493	0.805765419

%S Total: Azufre total tomado de la tabla 7, SSO₄²⁻ (PPM): Azufre en sulfatos expresado en partes por millón, SSO₄²⁻ (%): Azufre en sulfatos expresado en porcentaje, % S²: Diferencia de azufre total menos azufre en sulfatos.

Relación PN/PA

Para la evaluación e interpretación los índices de potencial de neutralización y potencial de acidez se encuentra la siguiente tabla con los resultados de dicho cálculo, donde, en correspondencia con la NOM-141-SEMARNAT-2003, se establece que cuando la relación entre estos índices es PN/PA mayor a 1.2, los jales son considerados NO potencialmente generadores de drenaje ácido, situación que se presentó en la totalidad de las muestras. Dicha relación oscilo entre los valores de 5.18 hasta 1423.50.

Tabla XVIII. Resultados de la evaluación de los jales para determinar si son generadores de DAM.

ID Muestra	PN/PA	Resultado
1	101.26	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
2	22.40	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
3	274.53	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
4	755.03	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
5	226.11	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
6	182.66	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
7	26.46	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
8	71.46	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
9	1423.50	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
10	100.45	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
11	46.72	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
12	387.32	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
13	35.87	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
14	32.32	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
15	87.39	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
16	118.04	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
17	101.02	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
18	31.38	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
19	5.18	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido
20	192.26	Jal NO potencialmente generador de drenaje ácido

La norma NOM-141-SEMARNAT-2003 establece que cuando la relación PN/PA > 1.2 los jales no son potenciales generadores de Drenaje Ácido.

Determinación de los EPT de base seca en las muestras.

En la Tabla XIX se encuentran los resultados arrojados por el método de fluorescencia de rayos X, realizado en el LICAMM-UG, con el fin de conocer la concentración de los EPT en las muestras analizadas y su comparación con los LMP (base seca) establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-2005.

En dicha tabla se señalan en rojo aquellas concentraciones por encima de los LMP y en verde aquellas por debajo de los mismos; además de señalar en este mismo color aquellas concentraciones no detectadas (ND).

Tabla XIX. Resultados de la concentración de los EPT y su comparación con los LMP de la NOM-052-SEMARNAT-2005.

Elemento	Cr	As	Se	Ag	Cd	Sb	Ba	Hg	Pb
LMP Base Seca (mg/kg)	100	100	20	100	20	10.6	2000	4	100
Muestra	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
1	ND	112.41	1.86	36.42	ND	61.68	77.01	ND	39.42
2	ND	281.95	ND	60.15	ND	69.55	77.44	ND	78.95
3	ND	116.21	ND	38.97	ND	75.86	101.03	ND	63.79
4	ND	82.84	ND	31.79	ND	66.42	88.81	ND	62.31
5	ND	114.92	2.61	18.10	ND	28.60	43.17	ND	67.62
6	ND	ND	11.33	64.51	ND	78.84	70.65	ND	86.01
7	ND	90.18	ND	38.18	ND	89.09	ND	ND	11.82
8	ND	86.12	ND	43.77	ND	72.60	144.84	ND	95.37
9	13.18	233.18	ND	100.00	ND	86.82	249.09	ND	133.64
10	ND	117.73	1.86	20.61	ND	60.47	100.58	ND	114.24
11	ND	40.29	ND	60.07	ND	85.35	ND	ND	58.97
12	ND	87.40	ND	53.82	ND	76.72	137.40	ND	20.61
13	ND	91.51	6.46	47.23	ND	64.58	ND	ND	23.14
14	ND	99.62	ND	77.74	ND	84.91	ND	ND	104.15
15	ND	ND	ND	241.89	ND	107.55	384.91	ND	498.11
16	ND	139.46	3.51	26.05	ND	57.85	114.18	ND	249.04
17	ND	136.12	11.50	25.77	ND	82.38	ND	ND	ND
18	ND	183.33	ND	98.11	ND	85.85	99.69	ND	150.00
19	ND	194.74	21.17	89.85	ND	103.01	ND	ND	18.23
20	ND	90.32	28.55	31.65	ND	91.94	84.27	ND	79.84

LMP: Límite máximo permisible, en verde los valores que se encuentran debajo de los LMP de la norma, los valores en rojo sobrepasan a estos.

En las figuras sucesivas se muestra la relación entre las concentraciones de algunos elementos y los LMP establecidos para cada uno de ellos; cabe resaltar que se encuentran solo las gráficas de aquellos elementos en donde se encontraron valores por encima de los límites máximos permisibles, esto con el objetivo de observar su distribución con respecto a estos.

En el caso del arsénico, el selenio y el plomo podemos observar comportamientos similares, donde existe un gran porcentaje de muestras cercanas a sus concentraciones máximas permisibles y son pocas las muestras que mantienen valores muy elevados con respecto al LMP establecido para cada elemento.

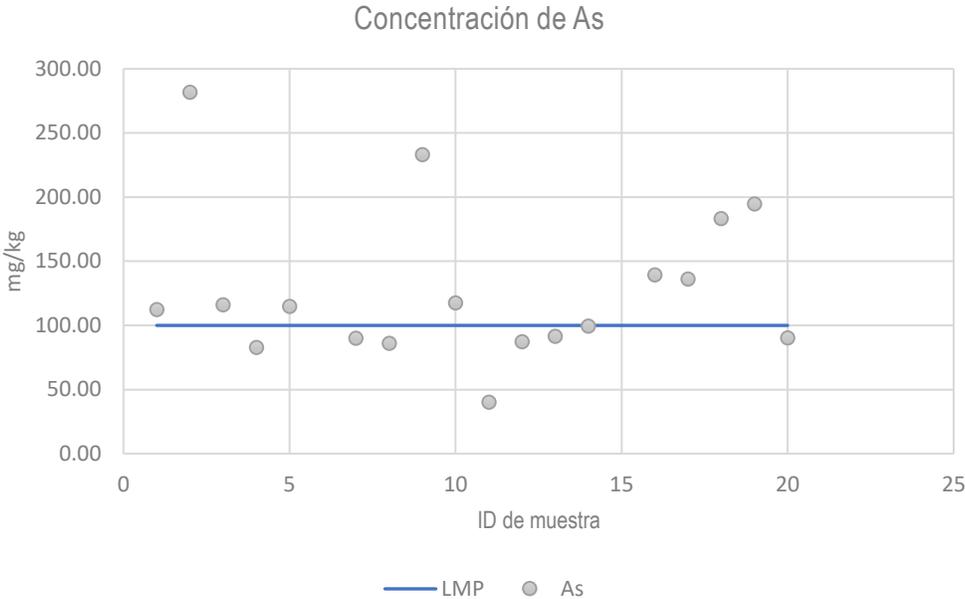


Figura 26. Distribución de la concentración de arsénico en las muestras estudiadas y su límite máximo permisible.

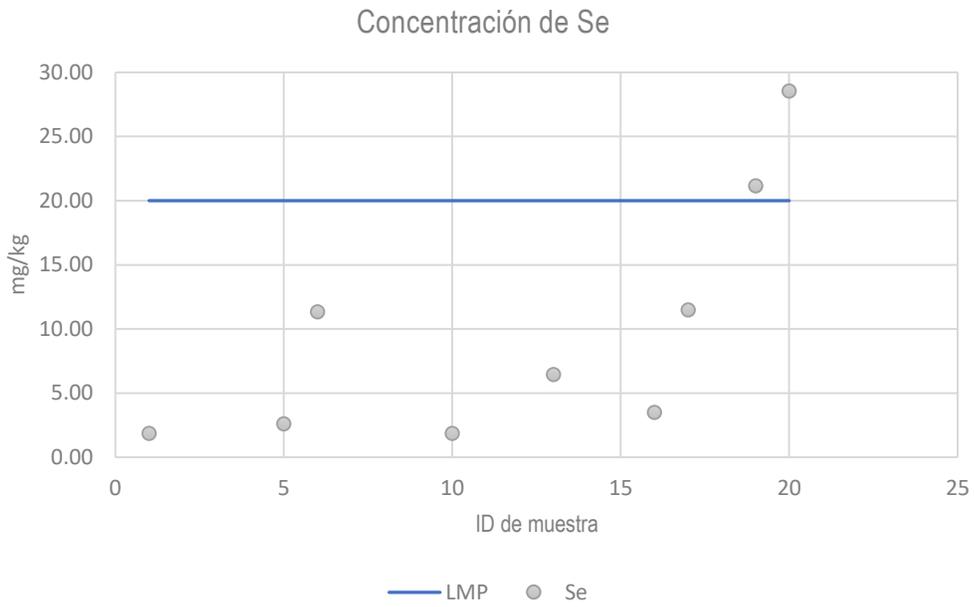


Figura 27. Distribución de la concentración de selenio en las muestras estudiadas y su límite máximo permisible.

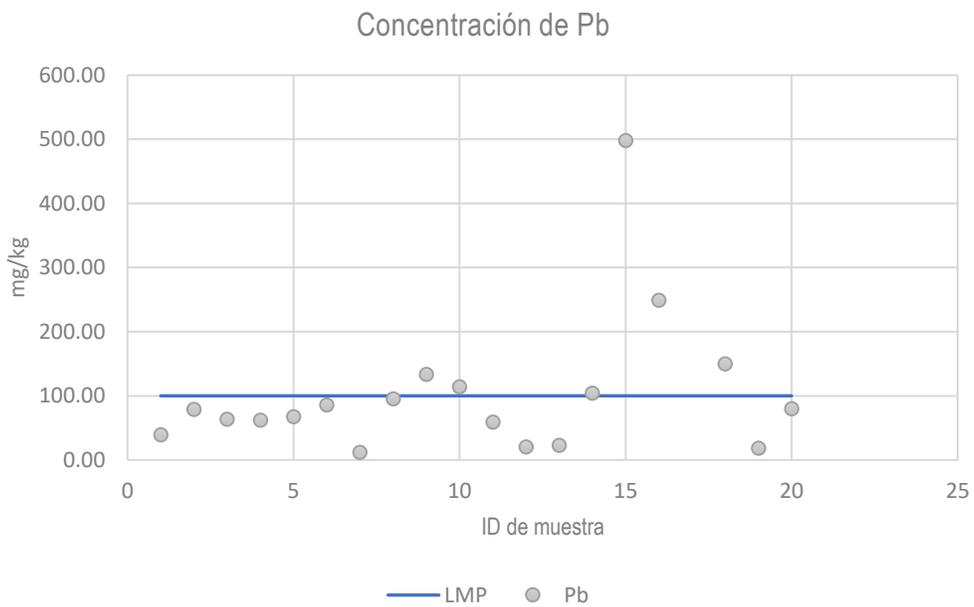


Figura 28. Distribución de la concentración de plomo en las muestras estudiadas y su límite máximo permisible.

Un caso muy distinto se observa en las lecturas del antimonio, donde la totalidad de las muestras registra un valor superior a la concentración máxima permisible establecida por la norma, la mayoría de estas se encuentra en rangos de entre 500% y 1000% por arriba de su LMP.

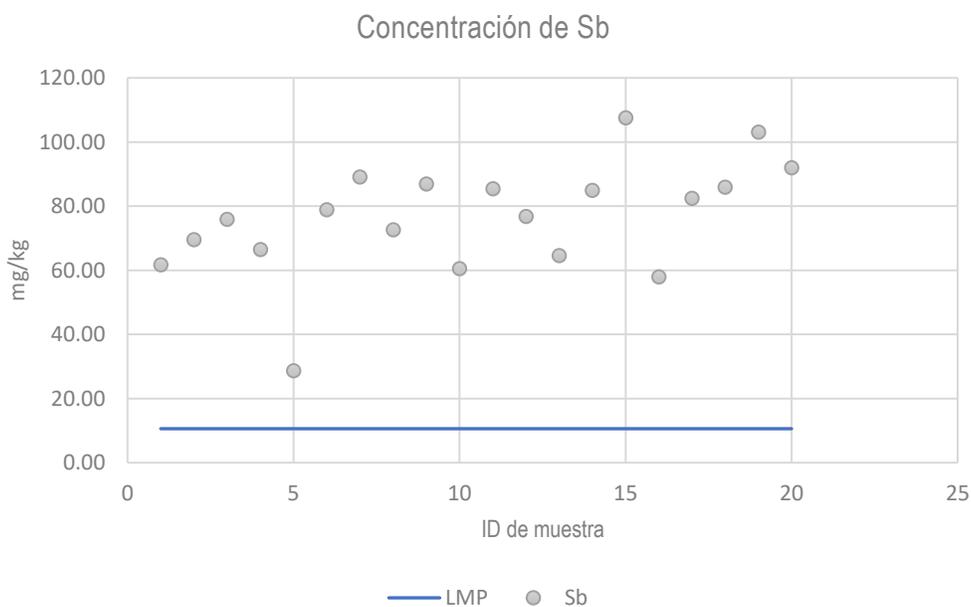


Figura 29. Distribución de la concentración de antimonio en las muestras estudiadas y su límite máximo permisible.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Considerando que la capacidad de los jales para generar DAM depende del balance entre los minerales productores potenciales de ácido (sulfuros) y los minerales consumidores potenciales de ácido (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos) y dadas las características físicas y químicas del depósito de jales ubicado en la comunidad de San Pedro Gilmonene, municipio de Guanajuato, se puede determinar el bajo riesgo que tienen estos residuos para generar DAM que pudiera afectar los cuerpos de agua, las especies vegetales y animales, así como la salud de la población que radica en la zona de estudio.

Inclusive, de acuerdo con los resultados de Fluorescencia de RX, sabiendo que las concentraciones de elementos como antimonio, arsénico y plomo en diferentes puntos de muestreo sobrepasan los Límites Máximos Permisibles establecidos en la NOM-120-SEMARNAT-2003 y NOM-157-SEMARNAT-2009, se sabe que al no generar DAM, por ende, la lixiviación no se lleva a cabo en el medio natural, con lo cual no existe un riesgo en la movilidad de estos elementos, se entiende que, de esta forma se mantendrán contenidos en el depósito y que el proceso natural de reintegración al medio se dará de forma paulatina como ya se ha estado desarrollando hasta hoy.

Probablemente, la estabilidad del terreno puede ser el factor de riesgo más importante, en el lugar se llevan a cabo algunas actividades por parte de los pobladores de la comunidad y durante la inspección de la zona de estudio se encontraron evidencias que sugieren que el depósito no es estable, por la presencia de un sistema de tubificación que se desarrolló a consecuencia de la erosión eólica e hídrica que afecta el lugar.

En resumen, los residuos propios de la actividad minera que alguna vez se desarrolló en las cercanías de la comunidad de San Pedro Gilmonene no representan peligro alguno en cuanto a la toxicidad y composición química de estos, sin embargo, se recomienda implementar las medidas de contención que se consideren pertinentes para que, como cualquier otro depósito de jales, quede confinado y estabilizado con el objetivo de evitar que el material se disperse como consecuencia de la erosión eólica o hídrica que ya se presenta en la zona, ya que se desconocen aún los efectos nocivos que los elementos tóxicos existentes puedan causar en el organismo humano cuando ingresan por distintas vías, como la aérea u oral, a través de organismos vivos o por medio de agua contaminada.

BIBLIOGRAFÍA

- Arizona University. (septiembre de 2008). *Jales Mineros*. Obtenido de <http://binational.pharmacy.arizona.edu/content/jales-mineros>
- Baldwin, D. R., & Marshall, W. J. (1999). *Heavy metal poisoning and its laboratory investigation: Annals of Clinical Biochemistry*.
- Barrie, L. D. (1992). *Arctic contaminants sources, occurrence and pathways*. *Sci Total Environ*.
- Benzaazoua, M., Marion, P., Picquet, I., & Bussiere, B. (2004). The use of pastefill as solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage. *Minerals engineering*, 233-243.
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC). (2020). *Medio Ambiente y Sustentabilidad*. Recuperado el 11 de febrero de 2020, de Índice de Normas Oficiales: https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Varios/Leyes_y_Normas_SEMARNAT/NOM/nom.htm#NOMS%20en%20Materia%20de%20Residuos%20Peligrosos
- Carmona, L. (1995). Análisis de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. *CODHEM. Derechos Humanos y Medio Ambiente*. , Año 2 (No. 13.), p. 232- 244.
- Carrillo-Chávez, A. M.–B.–P.–S.–M. (2003). *Environmental geochemistry of the Guanajuato Mining District*. México: Ore Geology Reviews.
- COREMI. (1992). *Monografía Geológico–Minera del Estado de Guanajuato*. Pachuca, Hidalgo: Consejo de Recursos Minerales, 236 p.
- Cortinas de Nava. (2006). *Regulación de los Residuos Peligrosos en México*. México: SEMARNAT.
- DOF. (13 de septiembre de 2004). , Norma Oficial Mexicana NOM–141–SEMARNAT–2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, contracción, operación y post-operación de pre. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 13 de febrero de 2020, de http://www.gobernacion.gob.mx/dof/2004/septiembre/dof_13-09-2004.pdf
- DOF. (4 de diciembre de 2009). NORMA Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009. *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4485/semarnat1/semarnat1.htm>
- DOF. (2019). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Recuperado el 11 de febrero de 2020, de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf_mov/Constitucion_Politica.pdf
- Echegoyen-Sánchez, J., Romero-Martínez, S., & Velázquez-Silva,, S. (1970). *Geología y yacimientos minerales de la parte central del distrito minero de Guanajuato*. Mexico, D.F.: Consejo de Recursos Naturales No renovables.

- Edwards, J. (1955). Studies of some early Tertiary red conglomerates of Central Mexico. *U.S. Geology Survey Professional Paper*,, 153-185.
- EPA, U. E. (1994). *Acid Mine Drainage Prediction*. Washigton, D.C.: Office of Solid Waste, U.S. Government.
- Fall, M., Benzaazoua, M., & Saa, E. G. (2008). Mix proportioning of underground cemented tailings backfil. *Tunneling an Underground space technology*, 80-90.
- Ferguson, K., & Erickson, P. (1988). *Pre-Mine Prediction of Acid Mine Drainage*. Berlin, Alemania: Springer-Verlag.
- García Arreola, M. L., Soriano Pérez, S. H., Flores Vélez, L. M., Cano Rodríguez, I., & Alonso Dávila, P. A. (2015). Comparación de ensayos de lixiviación estáticos de elementos tóxicos en residuos mineros. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 109-117. Recuperado el 12 de febrero de 2020, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=620/62037106010>
- García-Meza. (2003). *Caracterización fisicoquímica del desecho minero (jal) La Valenciana, Guanajuato, previa y posterior a bioensayos diagnósticos enfocados a la generación de propuestas para su remediación*. Mexico, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral.
- Gómez, G. (2009). El Medio Ambiente en el Sistema Jurídico Mexicano. *Revista Amicus Curiae* (3). Recuperado el 10 de febrero de 2020, de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/amicus/issue/view/1316/showToc>
- Gross, W. H. (1975). New ore discovery and source of silver-gold veins, Guanajuato, Mexico. *Economic Geology*, 1175-1189.
- Gutiérrez-Ruiz, M. R.-H. (2007). *Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México*. Recuperado el 4 de febrero de 2020, de *Revista mexicana de ciencias geológicas*: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742007000200005&lng=es&tlng=es
- Hernández, G. M., & Padilla, C. M. (2010). *Movilidad ambiental de metales en residuos mineros de la región de Zimapán, Hidalgo*. México: UNAM.
- INECC. (2020 de febrero de 2020). *Industria Minera*. Obtenido de http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/16/parte3_12.html
- INEGI. (2010). *Minería. Economía*. Recuperado el 4 de febrero de 2020, de <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/secundario/mineria/default.aspx?tema=E>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Conociendo Guanajuato* (Vol. Séptima Edición). Aguascalientes, Ags., México: INEGI. Recuperado el 2020 de febrero de 7, de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/esp/anol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/702825095673.pdf

- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (2001). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. (J. L. Cuellar Franco, Productor) Recuperado el 2020 de febrero de 7, de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM11guanajuato/municipios/11015a.html>
- Jonhson, R. H., Blowes, D. W., Robertson, W. D., & Jambor, J. L. (2000). *The hydrogeochemistry of the Nickel Rim mine tailings impoundment* (Vols. 1–2). Sudbury, Ontario: Journal of Contaminant Hydrology.
- Lawrence, R. W., & Wang, Y. (1997). Determination of Neutralization Potential in the Prediction of Acid Rock Drainage. *Fourth International Conference on Acid Rock Drainage*. Vancouver, Canadá.
- Ledesma, R. M., Arroyo, Y. R., & Grabach, C. (2004). Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México: Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 268-284.
- Lin, Z. (1997). *Mobilization and retention of heavy metals in mill–tailings from Garpenberg sulfide mines*. Sweden: Science of the Total Environment.
- López, S. P., & Ferro, N. A. (2006). *Derecho Ambiental*. México, D.F.: UIRE Editores.
- Magdalena-Rico, C. A. (2014). *Peligrosidad de los residuos mineros históricos del distrito minero San Antonio - El Triunfo en La Paz, BCS., y evaluación de generación de drenaje ácido a través de pruebas estáticas*. México, D.F.: UNAM, Tesis de Licenciatura.
- Manahan, S. E. (1989). *Toxicological Chemistry, A guide to toxic substances in chemistry*. Michigan, USA: Lewis Publishers, Inc.
- Martínez-Reyes, J. (1992). Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato con resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato: México. *Instituto de Geología, Serie cartas Geológicas y Mineras*, 8.
- Moncur, M. C., Ptacek, C. J., Blowes, D. W., & Jambor, J. L. (2004). Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment. *Applied Geochemistry*, 639–659.
- Muir, A., Mitchell, J., Flatman, S., & Sabbagha, C. (2016). *Retreatment of Gold Residues. Gold Ore Processing, Project Development and Operatios*. M. D. Adams, Elsevier.
- Niroshan, N., Sivakugan, N., & Veenstra, R. L. (2017). Laboratory study on strength development in cement paste backfills. *Journal of Material in Civil Engineering*.
- Nriagu, J. O. (1988). *A silent epidemic of enviromental metal poisoning: Enviromental Pollution*.
- Ortiz-Hernández, L. E., Choidi, M., Lapierre, H., Monod, O., & Calvet, P. (1992). El arco intraoceánico alóctono (Cretácico Inferior) de Guanajuato, características petrográficas, geoquímicas, estructurales e isotópicas del complejo filoniano y de las lavas basálticas asociadas. Implicaciones geodinámicas. *Revista del Instituto de Geología*, 126-145.

- Quezada, V. M. (2019). Calculo de la erosión hídrica y determinación de peligro por inestabilidad física del depósito de residuos mineros abandonados en San Pedro Gilmonene, Mineral de la Luz, Gto. *AIMMGM Memorias de la XXXIII Convención Internacional de Minería* (págs. p. 548-554). Acapulco, Gro: Geomin. Recuperado el 17 de febrero de 2020, de <http://www.geomin.com.mx/pdf/AIMMGM-XXXIII-Convencion-Internacional-Mineria.pdf>
- Ramos, Y. R. (2006). Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 23(1), 54-74. Recuperado el 13 de febrero de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742006000100004&lng=es&tlng=es
- Ramos, Y. S. (1998). *Variabilidad espacial de condiciones geoquímicas en presas de jales: Atas INAGEQ*.
- Randall, R. J., Saldaña, A. E., & Clark, K. F. (1994). Exploration in a Volcano-Plutonic Center at Guanajuato, Mexico. *Economic Geology*, 1722-1751.
- Roussel, C., Bril, H., & Fernández, A. (2000). Arsenic speciation: Involvement in evaluation of environmental impact caused by mine wastes. *Journal of Environmental Quality*, 1(29), 182–188.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2008). *Biblioteca Virtual SEMARNAT*. Obtenido de <http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/residuos/bibliovirtual/PNPGIR.pdf>
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (8 de diciembre de 2015). *Normas Oficiales Mexicanas*. Recuperado el 11 de febrero de 2020, de <http://www.semarnat.gob.mx/gobmx/biblioteca/nom.html>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT. (abril de 2021). *Generación estimada de residuos peligrosos según tipo de industria*. Obtenido de <http://cort.as/-K530>
- Secretaria de Salud. (2015). *Normas Oficiales Mexicanas*. Recuperado el 11 de febrero de 2020, de <https://www.gob.mx/salud/en/documentos/normas-oficiales-mexicanas-9705>
- Skoulsen, J., Simmons, J., Ma Donald, L. M., & Ziemkiewicz, P. (2002). *Acid-Base Accounting to Predict Post-mining Drainage Quality on Surface Mines* (Vol. 31). J. Environ.
- Sobek, A. A., Schuller, W. A., Freeman, J. R., & Smith, R. M. (1978). *Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils*. Cincinnati, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
- Urbano, G. R. (2007). *Caracterización electroquímica de suelos contaminados por residuos mineros (jales)*. Pachuca, Hidalgo: Universidad Nacional Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Volke-Sepúlveda, T., Velasco-Trejo, J. A., & De la Rosa-Pérez, D. A. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).

Wandke, A., & Martínez, J. (1928). The Guanajuato Mining District. *Economic Geology*, 1–44.