



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

**CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RIESGO DE LOS JALES DE UNA ZONA
MINERA DEL ESTADO DE DURANGO, MÉXICO**

TESIS
QUE PARA OBTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
I.Q. GUADARRAMA GUZMÁN PEDRO

TUTOR PRINCIPAL
DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ, FI-UNAM

COMITÉ TUTORAL
DRA. MARÍA TERESA ALARCÓN HERRERA, CIMAV-Durango
M.I. JOSÉ LUIS MARTÍNEZ PALACIOS, II-UNAM
M. en C. PATRICIA ROMERO MARES, IIMAS
M.I. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ, Sist. de Ing. y Cont. Ambiental

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

septiembre 2019

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Sánchez Gómez Jorge

Secretario: M. en C. Romero Mares Patricia Isabel

Vocal: M. I. Martínez Palacios José Luis

1^{er}. Suplente: Dra. Alarcón Herrera María Teresa

2^{do}. Suplente: Dra. Fernández Villagómez Georgina

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería

TUTOR DE TESIS:

Dra. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ

FIRMA

Agradecimientos

Para todos los que hicimos está tesis:

A mis Padres y mis hermanos por ser el aljibe de mi vida, henchido de alegría. A Diana, consorte despistado, lleno de aventura y amor. A la Dra. Georgina por prestarme sus ojos de guía y sus alas para brincar charcos. A la Dra. Teresa por ser el vínculo para respirar jales además por sus valiosos consejos. Al grupo Minero del Norte unidad Cerro de Mercado por permitirnos husmear en su patio trasero y obsequiarnos un poco de sus desechos. A todos aquellos que me enseñaron los dientes, con las coyunturas de lúpulo, que son los nacieron en un registro, vivieron en rocas y murieron en un suburbio. Al bondadoso laboratorista ignoto de la Facultad de Química por mantener viva la hermandad universitaria. Al Maestro Francisco Sánchez por destruir mi trabajo para generar uno nuevo, aparte de envejecer el trabajo de este alfarero. A la Dra. Ana Elisa por ayudarme a utilizar el equipo de AA. Al Dr. Luis Antonio por invitar al Dr. Javier Ilarrí y salvar la parte de riesgo de esta tesis. A los Maestros José Luis, Jorge y Patricia por sus ideas para enriquecer este escrito, a ésta última, gracias por enseñarme que los experimentos “científicos” están casados con la señora estadística. A Livia por ser cornucopia y manual de laboratorio. En fin, este trabajo es también de ustedes, ¡¡¡GRACIAS POR SU AYUDA!!!

Entre creer y no creer,
El corazón se trastorna
Lleno de nada saber

Y, ajeno a lo que sabía
Por no saber lo que es,
Sólo un instante le cabe
Que es el conocer la fe-

Fe que los astros conocen
Porque es la araña que está
En la tela que ellos tejen,
Y es vida que había ya.

F. Pessoa

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada así como al proyecto PAPIIT_IA1108117.

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Justificación.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Hipótesis	2
1.4 Alcances y limitaciones.....	3
2 Antecedentes.....	4
2.1 Residuo y residuo peligroso.....	4
2.2 Tratamiento de residuos peligrosos	4
2.3 Generación de residuos mineros (jales) en México	5
2.3.1 Manejo, tratamiento y valorización.....	7
2.4 Solidificación/ estabilización.....	8
2.4.1 Geopolímeros	10
2.5 Toxicología de los jales.....	11
2.5.1 Daños a la salud de los EPT más comunes en las minas mexicanas ...	12
2.6 Análisis de riesgo en zonas mineras.....	13
Capítulo 3. Marco Jurídico.....	16
3.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	17
3.2 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR)	17
3.3 Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (RLGPGIR).....	18
3.4 Normas Oficiales Mexicanas.....	18
3.5 Zona de estudio	20
3.5.1 Ubicación geográfica.....	20
3.5.2 Clima.....	20
Capítulo 4. Metodología.....	21
4.1 Muestreo	21
4.2 Diseño de experimentos	23
4.2.1 Unidad Experimental.....	23

4.2.2 Variables de respuesta	23
4.2.3 Definición de factores y niveles.....	23
4.2.4 Modelo estadístico	24
4.3 Proceso de elaboración de ladrillos	25
4.4 Molienda del vidrio	27
4.5 Material puzolánico	27
4.6 Preparación de las mezclas	28
4.7 Elaboración de ladrillos	29
4.8 Análisis de riesgo	30
4.8.1 Limitaciones.....	30
4.8.2 Vías de exposición.....	31
Capítulo 5. Resultados y su evaluación	34
5.1 Muestreo	34
5.1.1 Materiales usados.....	34
5.1.2 Plan de muestreo.....	34
5.1.3 Transporte y cadena de custodia.....	35
5.2 Tratamiento de las muestras.....	36
5.2.1 Secado.....	36
5.2.3 Cuarteo	37
5.2.2 Granulometría de los jales	37
5.3 Análisis de las muestras	37
5.3.1 Determinación de pH	38
5.3.2 Determinación del potencial de neutralización.....	39
5.3.3 Determinación del potencial de acidez	40
5.3.4 Determinación de metales y metaloides en la muestras.....	42
5.3.5 Determinación del estado de oxidación de cromo	43
5.4 Extracto PECT de los jales	45
5.5 Dimensiones de los ladrillos.....	46
5.6 Prueba de absorción de agua	46
5.7 Cabeceo de Ladrillos	49
5.8 Resultados de las pruebas de compresión	50
5.9 Prueba de intemperismo acelerado	53

5.10 Extracto PECT de los tratamientos	55
Capítulo 6. Análisis de riesgo	59
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones	66
Referencias	69

Listado de figuras

Figura 2.1 Generación de jales en una mina de hierro.....	6
Figura 2.2 Ladrillo y celosías hechos a partir de jales.....	7
Figura 3.1 Jerarquía Jurídica en México, modificado de González (2016).....	16
Figura 3.2 Ubicación del Municipio de Durango en Durango (INEGI, 2010)	20
Figura 4.1 Metodología General.....	22
Figura 4.2 Dispositivo para elaborar los ladrillos	26
Figura 4.3 Molde para elaborar los ladrillos.....	26
Figura 4.4 A) Molinos en operación y B) Vidrio después de la molienda	27
Figura 4.5 A) Punto de recolección de la tefra y B) Secado de la tefra	28
Figura 4.6 A) Mezcla en seco, B) Mezcla con agua	29
Figura 4.7 A) Molde con mezcla dentro, B) Molde montado en el dispositivo para elaborar ladrillos, C) Ladrillos después de retirar el molde.....	29
Figura 4.8 Ladrillos en el proceso de curado.....	30
Figura 4.9 Información requerida por el Software así como sus limitaciones.....	31
Figura 4.10 Vía de exposición considerada para la evaluación del riesgo en el software SADA	31
Figura 5.1 Puntos donde se tomaron las muestras	34
Figura 5. 2 A) Oniscideas presentes en los jales, B) Raíces presentes a 30 cm de profundidad en la presa de jales	35
Figura 5.3 A) Acomodo de los jales dentro de los cilindros, B) Contenedores para el transporte	36
Figura 5.4 A) Secado de jales en papel Kraft, B) Secado de jales en plástico.....	36
Figura 5.5 pH de las muestras de jales	38
Figura 5.6 Potenciómetro utilizado para medir el pH de las muestras de jales	38
Figura 5.7 Potencial de neutralización de los jales.....	40
Figura 5.8 Equipo utilizado para la determinación de azufre en los jales.....	41
Figura 5.9 Relación PN/PA en cada muestra de jales.....	41
Figura 5.10 Metales y metaloides presentes en los jales	43
Figura 5.11 A) Curva de calibración, B) Muestras durante prueba, C) Muestras para leer en espectrofotómetro	44
Figura 5. 12 A) Muestras durante extracción, B) Equipo de ICP utilizado, C) Equipo de AA utilizado	45

Figura 5.13 Ladrillos durante prueba de absorción de agua	46
Figura 5.14 Valores de absorción de agua de los tratamientos	47
Figura 5.15 Ladrillo con eflorescencias	49
Figura 5.16 A) Molde para cabeceo, B) Ladrillo con pasta para cabecear, C) Ladrillo cabeceado	49
Figura 5.17 A) Ladrillo en prueba de compresión, B), C) Ladrillos después de la prueba de compresión.....	50
Figura 5.18 Valores promedio de resistencia a la compresión.....	51
Figura 5.19 A) Equipo utilizado para la prueba, B) ladrillos dentro de la cámara..	53
Figura 5.20 Valores de resistencia a la compresión de los tratamientos con y sin intemperismo acelerado	54
Figura 5.21 Concentración de antimonio en los lixiviados.....	56
Figura 6.1 Parámetros de exposición para el escenario seleccionado.....	60
Figura 6.2 Vías y escenario utilizados en SADA	61
Figura 6.3 Valores objetivos seleccionados	61

Listado de Tablas

Tabla 2.1 Ejemplos de procesos para el tratamiento de residuos peligrosos.....	5
Tabla 2.2 Sustancias tóxicas producidas en la extracción de algunos metales. ...	12
Tabla 2.3 Principales efectos a la salud de los metales comúnmente presentes en los jales de minas mexicanas.....	12
Tabla 2.4 Criterio número 1 de peligro.	13
Tabla 2.5 Criterio número 2 de peligro	14
Tabla 2.6 Criterio número 3 de peligro.	14
Tabla 2.7 Niveles de peligro.....	14
Tabla 3.1 Normas Oficiales Mexicanas de la SEMARNAT referentes a residuos peligrosos	18
Tabla 3.2 Norma Oficial Mexicana de la Secretaria de Salud referente a residuos peligrosos	19
Tabla 3.3 Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes referentes a residuos peligrosos	19
Tabla 4.1 Factores, tratamiento y niveles.....	23
Tabla 4.2 Aleatorización de los tratamientos.....	25
Tabla 4.3 Cantidades de cada factor usado en los tratamientos.....	28
Tabla 4.4 Términos de la ecuación de la vía de ingestión.....	32
Tabla 4.5 Términos de la ecuación de la vía de inhalación	33
Tabla 4.6 Términos de la ecuación de la vía dérmica	33

Tabla 5.1	Coordenadas de los puntos de muestreo	35
Tabla 5. 2	Determinación de granulometría de los jales	37
Tabla 5.3	Medición cualitativa de carbonatos.....	39
Tabla 5.4	Concentración de cromo VI en las muestras de jales.....	44
Tabla 5.5	Medidas promedio de los ladrillos de cada tratamiento.....	46
Tabla 5.6	Comparaciones de absorción de agua entre tratamientos	48
Tabla 5.7	Valores de resistencia a la compresión	50
Tabla 5.8	Valores de resistencia a la compresión después de la prueba de intemperismo acelerado	53
Tabla 5.9	Comparaciones entre cámara de intemperismo y tratamientos	55
Tabla 5.10	Concentraciones de antimonio y cromo en el extracto PECT	56
Tabla 5.11	Comparaciones de encapsulación entre tratamientos.....	57
Tabla 6.1	Cálculos realizados por el software SADA	62
Tabla 6.2	Determinación de riesgo por exposición a jales para niños.....	63
Tabla 6.3	Cálculos para efectos carcinogénicos por arsénico y concentración de referencia	63
Tabla 6.4	Cálculos de riesgo para escenario residencial	64
Tabla 6.5	Cálculos de riesgo para exposición a jales en niños en escenario residencial	65
Tabla 6.6	Cálculos de riesgo a la población por exposición a arsénico en escenario residencial	65



Capítulo 1. Introducción

1.1 Justificación

El incremento desmesurado de la población mundial y su constante demanda por diversos materiales (metales, plásticos etc.), enseres, alimentos, medicamentos entre otros, está acompañado del aumento de residuos peligrosos generados por diversas industrias como la petrolera y la minera principalmente. Dichos residuos por sus características y porque no son tratados de una manera adecuada representan un riesgo a la salud mundial así como a los ecosistemas (Wilson et al., 2002).

La minería es 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, 2007).

En México y el mundo, debido a la actividad minera hay cientos de millones de toneladas de residuos, los cuales son conocidos como jales en México y relaves o colas alrededor del mundo, estos se producen durante los procesos de recuperación de metales (Megchún, 2014), y pueden generar escurrimientos y arrastre de residuos minero-metalúrgicos peligrosos, de alto impacto ambiental así como la descarga de aguas residuales en cuerpos receptores (INECC, 2007).

El manejo y la disposición inadecuada de dichos residuos, aunado a las condiciones climáticas del sitio, han ocasionado que se dispersen y movilicen en una extensa área ya sea urbana o rural, originando problemas de contaminación de suelos por metales pesados con alto potencial contaminante (EPT) como: plomo, zinc y cadmio, arsénico, selenio, antimonio; principalmente (Urbano et al., 2007).

Las técnicas de Solidificación/ Estabilización (S/E) de residuos están consideradas como una de las mejores tecnologías disponibles para el tratamiento de residuos, cuyo principal problema es la presencia de metales pesados, razón por la cual tienen la categoría de residuos peligrosos (Pérez, 2016). Se puede definir a estos procesos como tratamientos diseñados para mejorar cualquier característica física y de manejo de los residuos peligrosos; disminuir el área superficial a través de la cual los contaminantes logran transferirse o lixiviarse, limitar su solubilidad, o detoxificar los constituyentes peligrosos (Moreno, 2017).



1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo General*

Realizar la caracterización y análisis de riesgo de los jales de una zona minera del Estado de Durango, México, de acuerdo a la legislación mexicana y considerando la mitigación de la toxicidad de los jales después de la aplicación de la técnica de solidificación/estabilización.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Consultar la legislación nacional y el estado del arte sobre el manejo, tratamiento y disposición de residuos mineros.
- Determinar la composición química y posible generación de drenaje ácido de los jales de la mina Cerro de Mercado, Durango, México, previamente muestreados con base en lo establecido en la NMX-AA-132-SCFI-2016, utilizando la técnica analítica de fluorescencia de rayos X así como la NOM-141-SEMARNAT-2003 para la determinación del riesgo asociado a los jales.
- Analizar el posible aprovechamiento de los jales de la mina Cerro de Mercado y otros agregados para la elaboración de ladrillos, empleando un diseño estadístico de experimentos y posteriormente la determinación del potencial de mitigación del riesgo asociado a los jales, así como las variables críticas del proceso de la estabilización/solidificación.
- Proponer el método de estabilización/solidificación más apropiado considerando los resultados obtenidos de las pruebas experimentales.
- Investigar el riesgo inherente de los jales de la mina Cerro de Mercado y su influencia sobre la salud de la población aledaña utilizando el paquete computacional Spatial Analysis of Decision Assistance (SADA) ver. 5.0.

1.3 Hipótesis

La solidificación/estabilización permite el encapsulamiento de los EPT presentes en los jales y con ello el reúso de los mismos.

Debido a su contenido de EPT, los jales de la mina Cerro de Mercado, pueden ser potencialmente riesgosos para el ecosistema.



1.4 Alcances y limitaciones

El muestreo se realizó en una sola ocasión y en una sola presa de jales de la mina Cerro de Mercado, presa "Boleo Estrella"

No se incluyeron en esta tesis análisis de costos, evaluaciones de impacto ambiental así como la valoración de los beneficios ambientales.

Para experimentar con la técnica de solidificación/estabilización se utilizarán distintos componentes: vidrio de borosilicato molido, un agente puzolánico (material volcánico) y cemento Portland.

Las concentraciones de los metales y metaloides presentes en los jales previamente determinadas, se alimentaron al software utilizado, ya que éste no incluye modelos de flujo y de transporte.



Capítulo 2. Marco Teórico

2 Antecedentes

2.1 Residuo y residuo peligroso

En artículo 3° fracción XXXII de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente 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.

2.2 Tratamiento de residuos peligrosos

Existe una amplia variedad de tecnologías que han sido desarrolladas para tratar los residuos peligrosos a fin de modificar sus propiedades físicas y químicas, así como de disminuir su volumen, inmovilizar sus componentes tóxicos o detoxificarlos antes de su disposición final (SEMARNAT, 2002).

Los tratamientos físico-químicos involucran tanto los procesos físicos como químicos, razón por la cual se modifican las propiedades químicas o físicas de un residuo. Estos tratamientos cumplen con varias funciones en un sistema de gestión de residuos (Martínez, 2005):

- Permitir la recuperación de un compuesto para su posterior utilización como materia prima en otro proceso.
- Separar los constituyentes peligrosos de la masa total del residuo.
- Reducir la peligrosidad del residuo mediante la transformación de sus componentes, transformándolos en compuestos menos peligrosos o reduciendo su movilidad en el medio ambiente.
- Transformar el residuo en un material que cumpla con las condiciones para ingresar a otro sistema de tratamiento o al sistema de disposición final.



Los factores que intervienen al seleccionar las mejores formas para tratar los residuos peligrosos (tabla 2.1) son diversos y comprenden, entre otros, la disponibilidad y efectividad de las tecnologías, el grado de cumplimiento de la normatividad de seguridad aplicable, la ubicación de la infraestructura de servicios respecto de las fuentes generadoras y áreas vulnerables, así como el costo de dichos servicios (SEMARNAT, 2002).

Tabla 2. 1 Ejemplos de procesos para el tratamiento de residuos peligrosos (SEMARNAT, 2008)

Tratamientos Físicos	Tratamientos Químicos	Tratamientos Biológicos	Pretratamiento de sólidos o de alquitrantes
Absorción de resinas	Calcinación y sinterización		
Congelamiento de suspensiones	Catálisis, Clorinólisis	Lodos activados	
Cristalización por congelamiento	Electrólisis	Lagunas de aereación	
Diálisis	Fotólisis	Lagunas de estabilización	Criogénesis
Electrodiálisis	Hidrólisis	Digestión anaerobia	Disolución
Electroforesis	Neutralización	Compostaje	Rompimiento y molido
Evaporación	Oxidación	Tratamiento enzimático	
Extracción de orgánico líquido-líquido	Estabilización y Solidificación		

2.3 Generación de residuos mineros (jales) 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, 2005).

Los jales generalmente contienen sulfuros metálicos residuales como piritita (FeS_2), pirrotita (Fe_{1-x}S), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS), los cuales son la fuente de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como el As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, etc. (Romero, Armienta, & González, 2007), (Volke & Velasco, 2002).

El destino final de este tipo de residuos es de dos tipos: el de las presas de jales (figura 2.1) para los residuos del proceso de beneficio y el de los terrenos para los materiales de descapote. Ambos, presas de jales y terrenos deben reunir ciertos requisitos en cuanto a normas de construcción y distancia a los asentamientos humanos (Coll, Sánchez, & Morales, 2002).



Figura 2.1 Generación de jales en una mina de hierro (Arraras, 2014)

En el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos se menciona lo siguiente en cuanto a las cantidades de jales generados en México (Gutiérrez et al., 2012):

- 16 entidades federativas generan el 100% de los residuos mineros, resaltando por su volumen de generación, los siguientes: Sonora, Zacatecas, Chihuahua, Durango, Querétaro y Coahuila, debido a que en conjunto generan el 94.40%.
- Los jales son los residuos mineros más importantes tanto por su cantidad, 2 millardos de toneladas, como por sus características mecánicas y químicas.



2.3.1 Manejo, tratamiento y valorización

El manejo inadecuado de dichos residuos puede tener como consecuencia la contaminación de suelos y cuerpos de agua en los alrededores, ya sea como resultado de eventos inesperados que provoquen su vertimiento accidental o su liberación continua al ambiente. Esto puede considerarse como un peligro potencial para la flora y fauna de la región, así como para la población humana (Alvarado & Volke, 2004). El reaprovechamiento de los jales tiene el potencial de reducir los peligros ambientales, limpiar el ambiente, así como disminuir su cantidad, lo que resulta en una mejor gestión (Oliveira et al, 2011; Bellenfant et al, 2013).

Algunos de los principales riesgos ambientales asociados con los residuos mineros son: contaminación por metales pesados, generación de drenaje ácido y ruptura de las presas como las ocurridas en Canadá en 2015 y Brasil en 2017 (Breytenbach, 2017).

Una actividad común es utilizar jales (inertes) como material de construcción en el sitio minero, incluso en la construcción de carreteras, como material de relleno en minas subterráneas y como material de soporte de presas (Kauppila et al, 2011). Además han sido investigados y utilizados en menor escala como materiales de construcción, para fabricar ladrillos (Vite et al, 2005 ; Ahmari & Zhang, 2012), diversos productos cerámicos y geopolímeros (Shao et al, 2005 ; Ahmari & Zhang, 2013). En la figura 2.2 se muestran algunos ejemplos de aprovechamiento de jales.



Figura 2.2 Ladrillo y celosías hechos a partir de jales (AG Roadway Products, 2012; Vite, et al 2005)

La valorización de los jales está contemplada en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, mencionando que la minería puede contribuir con éste tipo de residuos a la construcción de ciudades y comunidades sostenibles, disminuyendo de esta manera la cantidad éstos (World Economic Forum, 2016).



2.4 Solidificación/ estabilización

Las técnicas de solidificación/estabilización (S/E) se aplicaron inicialmente al tratamiento de los residuos radiactivos y posteriormente fueron aplicadas a los residuos peligrosos. Estas técnicas están diseñadas para la obtención, mediante la mezcla del residuo con aglomerantes y aditivos adecuados, de un producto final, que tras un tiempo de fraguado y curado, se convierta en un residuo inerte de deposición admisible en vertederos controlados (Moreno, 2017).

La (S/E) tiene por objetivo limitar la solubilidad o movilidad de un contaminante presente en el suelo disminuyendo así su toxicidad o eliminando su lixiviación. La solidificación es un proceso que encapsula los contaminantes dentro de una matriz sólida formando un bloque monolítico de alta integridad estructural, constituido por una mezcla del contaminante, el suelo y un agente puzolánico dentro de una matriz sólida (Becerril & Navarrete, 1993) citado por (Volke et. al., 2005), (Sellers 1999, EPA 2001). La estabilización implica la adición de materiales o sustancias que limiten la reactividad, volatilidad y/o solubilidad (movilidad) de un contaminante. En este caso existe una reacción del contaminante con el aditivo para formar compuestos menos solubles y móviles (Becerril y Navarrete, 1993) citado por (Volke et al., 2005)

La S/E puede realizarse tanto in situ como ex situ. Para la S/E ex situ, el residuo a tratar debe extraerse, de manera que el material resultante sea dispuesto. En la S/E in situ pueden utilizarse sistemas para cubrir los suelos contaminados sin necesidad de excavar, de manera que el material se deja en el mismo sitio (EPA 2001) citado por (Volke & Velásco, 2002).

Existen reportes de autores que han probado la utilización de la S/E con cemento portland como una aplicación exitosa para el tratamiento de residuos tóxicos con metales residuos de la industria siderúrgica, cenizas de incineración, cenizas de madera o lodos industriales (Lara & Melgoza, 2009). En algunos trabajos sobre el tema se ha reportado lo siguiente: González (2016) propone las siguientes mezclas de jal cemento y zeolita para la inmovilización de sustancias peligrosas a través de solidificaciones monolíticas, jal (29,34y 37%), cemento (24, 34 y 32%) y zeolita (47, 33 y 32 %). Gutiérrez (2018) experimentó con las siguientes mezclas de jal, cemento y cal para el tratamiento de jales de una mina de Zimapán; jal (68.75, 56.25 y 43.75%), cemento (5, 15 y 25%) y cal (1.25, 3.75 y 6.25%). Además de la mezcla de jal, cemento y zeolita con las proporciones de: jal (65, 45 y 25%), cemento (5, 15 y 25 %) y zeolita (5, 15 y 25%).

Diversos investigadores han utilizado el proceso de S/E para la elaboración de ladrillos a partir de jales, a continuación se describen someramente algunos trabajos:



- **Romo & Flores (2010).** Con jales provenientes de una mina polimetálica, elaboraron ladrillos mezclando jales (14-70% en peso total de la mezcla y granulometría de 75 μ m), cemento (40-70%) y cal (1-10%). Agregaron agua hasta obtener una mezcla homogénea, la cual se puso en moldes. El curado consistió en dejar secar los ladrillos a condiciones de temperatura ambiente durante un periodo de 26 a 30 días.
- **Malatse & Ndlovu (2015).** Emplearon para fabricar ladrillos jales de una mina de oro en cantidades de 2 a 14 kg y cemento en cantidades de 1 a 10 kg. Hicieron 8 mezclas distintas, con las cantidades de jal y cemento mencionados, los volúmenes de agua utilizados fueron de 0.6 a 3. Jal, cemento y agua fueron incorporaron mediante una mezcladora convencional durante 15 minutos, posteriormente la mixtura fue colocada en moldes de plástico y se dejó secar en un lugar con sol para posteriormente curarlos con agua.
- **Shreekant et al (2015).** Mezclaron jales de una mina hierro (granulometría 4.75 mm) con cemento y cenizas volantes en cinco distintas combinaciones en base a peso, 2.5 kg de mezcla por ladrillo; 70% de jal, cemento del 10 al 30% y ceniza volante del 0 al 20%. Los investigadores utilizaron 600 ml de agua por ladrillo. La mezcla hidratada fue puesta en un molde de plástico y posteriormente se le aplicó entre 15 a 18 kN con una prensa mecánica. Los ladrillos se dejaron secar 24 horas a la intemperie una vez que estuvieron fuera del molde. El curado fue mediante aspersion de agua durante 7, 14, 21 y 28 días.
- **Alves et al (2018).** Hicieron ladrillos mezclando jales de una mina de hierro con cemento y lodos provenientes del proceso de refinación del acero. Se utilizó un tamaño de partícula menor a 0.15 mm. La composición de los ladrillos fue: 10 y 15% de jal, 85% lodos y 5% cemento, base peso. El agua usada se reportó como el 10% del peso total de la mezcla seca. Las mezclas hidratadas se moldearon a presión (20 MPa) en una prensa manual. Finalmente el secado duró 14 días.

Es de resaltar que en las investigaciones anteriores, el volumen de agua utilizado está en función de las medidas requeridas por los ladrillos o de la consistencia de la mezcla y no de la cantidad de la cantidad de cemento o agregados utilizados para la elaboración del mismo. Por otro lado, el proceso de elaboración de ladrillos es generalmente sencillo, poniendo las mezclas hidratadas en moldes (plástico o madera), ejerciendo presión y dejando secar para su posterior curado.



2.4.1 Geopolímeros

Los geopolímeros son materiales basados en polímeros inorgánicos derivados de una reacción química llamada geopolimerización, este tipo de materiales fue descubierto por J. Davidovits en 1972. Recientemente los geopolímeros están siendo estudiados por su potencial de encapsulación de residuos radiactivos, mineros, lodos entre otros, ofreciendo una encapsulación química segura de los contaminantes (Hermann et al., 1999).

Este tipo de materiales ofrecen un método efectivo de inmovilización de metales pesados y buena resistencia al ataque de los ácidos, además de una larga durabilidad (Eswed et al., 2015). Metales como cromo Cr, Co, Pb, As, Cd, Ni, Zn, Pd, Ra, U, entre otros, son incorporados a la red tridimensional geopolimérica disminuyendo la movilidad de los iones metálicos a través de la precipitación como hidróxidos, sustitución por otros metales en la red cristalina o encapsulación física (Zheng et al., 2010), (Guo et al., 2014), (Robayo & Mejía, 2015). (Giannopoulou & Panias, 2004).

Las diversas ventajas que hacen de estos materiales atractivos y competitivos ante otro tipo de materiales son las siguientes:

i) Bajo costo de producción. Los geopolímeros se basan en materiales de aluminosilicatos los cuales se encuentran de manera natural y en cantidades abundantes en la corteza terrestre, principalmente como minerales, también pueden derivar como residuos de procesos industriales; cenizas volantes, escorias etc. (Xu & Van Denever, 2000).

ii) La energía de fabricación de materiales cerámicos mediante geopolímeros es menor en un 16% comparado con los procesos convencionales de fabricación de materiales cerámicos (Davidovits, 1999).

iii) El proceso de fabricación de geopolímeros reduce la emisión de gases de efecto invernadero. Un cemento fabricado a base de geopolímeros emite 80% menos CO₂ en comparación con la fabricación del cemento Portland (Davidovits, 1999).

Además de los geopolímeros basados en aluminosilicatos se pueden emplear otros materiales como aquellos compuestos de borosilicatos, lo cual tiene una gran ventaja ya que con desechos de vidrio de botellas, material de laboratorio roto, etc. se pueden desarrollar geopolímeros con características similares a aquellos geopolímeros desarrollados a base de aluminosilicatos (Abood et al., 2017), (Bagheri et al., 2017).



La sustitución de aluminosilicatos por borosilicatos implica cambios en las propiedades mecánicas estructurales, en particular la resistencia a la compresión. En los geopolímeros la adición de boro tiene un efecto positivo ya que aumenta la resistencia a la compresión (Bagheri et al., 2017). El boro presente en el vidrio de borosilicatos con granulometría menor a 45 μm induce el mismo efecto que el silicio en los aluminosilicatos. Una granulometría fina brinda una alta reactividad puzolánica, además un incremento de la temperatura durante el proceso de curado (Torres-Carrasco et al., 2015), (Toniolo & Boccaccini, 2017), (González, 2012), (Quintero, 2011).

Las cenizas volcánicas son un tipo de material natural que consisten en fragmentos de roca pulverizada, que debido a sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas son usadas en la industria del cemento como materiales puzolánicos para mejorar la durabilidad del cemento (Meddah, 2015). La ceniza volcánica es un tipo de aluminosilicato con cierto porcentaje de Al_2O_3 y SiO_2 , que permite que ésta sea usada en la síntesis de geopolímeros (Tchakoute et al., 2012), (Risdaneri et al., 2015), (Yankwa et al., 2016).

2.5 Toxicología de los jales

La minería es una de las principales causas de contaminación por metales pesados, debido principalmente al manejo inadecuado de sus residuos. Ya que los jales están expuestos al intemperismo, los metales que contienen se pueden ver afectados por diferentes procesos, como reacciones de óxido-reducción, de ácido-base, hidrólisis, adsorción-desorción, etc., que pueden modificar la movilidad, biodisponibilidad y toxicidad de estos, derivando en su liberación y subsecuente acumulación e infiltración (Ramos et al., 2012).

Los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) que pueden estar presentes en presas de jales mineros, representan un riesgo ambiental por la posibilidad de lixiviación e incorporación a cuerpos de agua, así como la movilización a otros ecosistemas por dispersión eólica o hídrica. Los elementos presentes en los jales que pueden ocasionar problemas por su alta toxicidad son: arsénico, cadmio, cobre, plomo, mercurio, cromo, selenio y zinc. Algunos otros como el Fe y el Mn aunque representan riesgo menor, se considera que podrían tener efectos adversos a la salud (Medel et al., 2008). En la tabla 2.2 se muestran los residuos producidos de acuerdo a la extracción de algunos metales.



Tabla 2.2 Residuos producidos en la extracción de algunos metales (CENAPRED, 2018)

Metal	Proceso	Tipo de residuo
Oro	Amalgamación con mercurio y tratamiento con una solución de cianuro potásico	Residuos de mercurio o de cianuro
Plata	Extracción por cianuración y la amalgamación.	Residuos de mercurio o de cianuro.
Cu	La lixiviación con ácido sulfúrico.	Residuos ácidos y elementos asociados como plomo.
Zinc	Lixiviación con ácido sulfúrico y flotación.	Residuos ácidos y elementos asociados.
Cadmio	Varios, dependiendo el metal al que este asociado (Pb o Zn).	Cadmio o plomo.
Plomo	Por flotación para reducir el óxido plumboso para separar el estaño, níquel, cobalto y arsénico.	Estaño, níquel, cobalto arsénico y plomo.
Arsénico	El arsénico se encuentra como impureza en casi todas las menas metálicas, por ejemplo en las piritas y las menas sulfuradas de cobre y plomo.	Actualmente hay montañas de ganga de este material.
Hierro	Por imantación y flotación.	Residuos ácidos y elementos asociados como fenoles y cresoles.

2.5.1 Daños a la salud de los EPT más comunes en las minas mexicanas

En las minas mexicanas los EPT más comúnmente presentes son: plomo, cadmio, arsénico, selenio y mercurio (Covarrubias & Peña , 2017). En la tabla 2.3 se describen sucintamente sus principales efectos a la salud para cada uno de estos metales.

Tabla 2.3 Principales efectos a la salud de los metales comúnmente presentes en los jales de minas mexicanas

Metal	Daños a la salud	Fuente
Plomo	<ul style="list-style-type: none">Una exposición elevada ataca al cerebro y al sistema nervioso central, pudiendo provocar coma, convulsiones e incluso la muerte.	(OMS, 2016)
Cadmio	Daño hepático moderado y, por tanto, disminución de la capacidad metabólica del hígado	(Ramírez, 2002)
Arsénico	Puede provocar cáncer en pulmón y piel, e inclusive puede causar otros tipos de cánceres.	(ATSDR, 2010)
Selenio	Insuficiencia renal y taquicardia, incluyendo temblores, irritabilidad y mialgia.	(Thomas, 2016)
Mercurio	<ul style="list-style-type: none">Tras la inhalación o ingestión de distintos se pueden observar trastornos neurológicos y del comportamiento.	(ATSDR, 2016)



2.6 Análisis de riesgo en zonas mineras

El riesgo ambiental se define como la probabilidad de que ocurran accidentes mayores que involucren a los materiales peligrosos que se manejan en las actividades altamente riesgosas, que puedan trascender los límites de sus instalaciones y afectar adversamente a la población, al ambiente y los ecosistemas. La evaluación de dicho riesgo comprende la determinación de los alcances de los accidentes y la intensidad de los efectos adversos en diferentes radios de afectación (Secretaría de Economía, 2009).

La actividad minera afecta cada año a la salud de un número significativo de personas, con patologías como: tuberculosis, silicosis o una combinación de ambas. Paralelamente, la contaminación minera incrementa exponencialmente el número de personas en riesgo sanitario al comprometer la salud de los pobladores de comunidades situadas en las áreas de influencia de las zonas mineras o aguas abajo (Aparicio, 2009).

Las zonas mineras deberían ser consideradas como sitios potencialmente peligrosos para la salud, y sería necesario establecer una metodología especial para su estudio que incluyera la evaluación de tres factores: a) la caracterización de la biodisponibilidad de los metales; b) el estudio de la toxicidad de los residuos, bajo la perspectiva de que su toxicidad dependerá de la interacción de los metales presentes en ellos, y c) el análisis de la contaminación de los medios del ambiente a fin de determinar las rutas de mayor riesgo para la comunidad afectada (Mejía et al., 1999).

Como consecuencia se presentan afecciones a la salud humana, de animales y plantas, que no se perciben al principio, pero comienzan a ser evidentes al cabo de varios años de iniciada la explotación. Entre las enfermedades que se detectan primero son: el aumento de los índices de cáncer, especialmente entre los niños, las afecciones broncopulmonares y las enfermedades de la piel (Rostagno, 2017).

El Centro Nacional para la Prevención de Desastres, CENAPRED, (2018) establece los siguientes criterios para determinar el índice de peligro para los jales. El primer criterio es de acuerdo al proceso de extracción, lo cual se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Primer criterio de peligro

Proceso	Criterio 1 de peligro	Proceso	Criterio 1 de peligro
Trituración	1	Flotación	3
Gravimetría	1	Lixiviación	4
Magnética	1	Cianuración	4
Fundición	2	Amalgamación	4



El criterio número dos está relacionado con la producción en toneladas al día de metal, en la tabla 2.5 se muestra el criterio de peligro asociado a las toneladas producidas.

Tabla 2.5 Segundo criterio de peligro

Toneladas/día	Criterio 2 de peligro
1 a 99	1
99.1 a 999	2
999.1 a 9999	3
10000 a 89999	4
90000 en adelante	5

El criterio número tres es llamado "Estatus de la planta de beneficio", se refiere al estatus de operación de la mina, el peligro asociado a este criterio se muestra en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Tercer criterio de peligro

Estatus	Criterio 3 de peligro
Pasivo ambiental	1
Temporal	2
Inactiva	2
Activa	3

Los criterios de peligro establecidos por CENAPRED son subjetivos, ya que esta misma dependencia menciona que para poder precisar lo peligrosa que puede ser una instalación es necesario tomar en cuenta otros aspectos que en este momento no están al alcance, sin embargo, proporcionan puntos de alerta para los responsables de protección civil. El último paso es sumar los puntos de cada criterio y compararlos con los de la tabla 2.7 para decidir el nivel final de peligro.

Tabla 2.7 Niveles de peligro

Suma de los criterios	Nivel final
3 -5	Bajo
6 y 7	Medio
8 y 9	Alto
10 al 12	Muy Alto

Por otro lado, diversos investigadores, hacen uso de distintos softwares computacionales para realizar análisis de riesgo a la salud y al ambiente, consiguiendo un panorama general de sitios contaminados con residuos peligrosos o algún otro tipo de residuos. A continuación se mencionan algunos trabajos

- **Wcislo, Dlugosz, & Korcz (2005)** emplearon el software NORISC para determinar el riesgo a la salud por presencia de agroquímicos en una zona de la toscana en Italia.



- **Wang & Yi Hu (2012)** utilizaron el software GeoDetector para investigar áreas con riesgos potenciales a la salud.
- **Li et al, en 2014** con ayuda del software Crystal ball determinaron el riesgo al que estaba expuesta la población en China debido a 72 áreas mineras.
- **Miri et al. (2017)** para determinar el impacto a la salud debido a partículas PM10 en Irán utilizaron el software AirQ.

En los trabajos anteriores se menciona la importancia del software en el análisis de riesgos, ya sea a la salud o al ambiente debido a que brindan un panorama general del estado del sitio contaminado así como los posibles efectos a la salud y al ambiente. Estos paquetes cuentan con múltiples herramientas como sistemas de información geográficos, herramientas estadísticas así como ecuaciones y parámetros para cálculos de riesgo establecidos por la EPA, además de que en algunos casos son de acceso libre.



Capítulo 3. Marco Jurídico

La actual problemática ambiental por la que atraviesa nuestro planeta se deriva de una serie de perturbaciones resultado de las actividades humanas, sobre todo en los países altamente industrializados de Europa y Norteamérica, debido a la acumulación de desechos producidos por las actividades industriales, se contaminan el agua, aire y suelo, lo que repercute en la salud humana y al ambiental (Nájera , 2010).

La Conferencia de Estocolmo de 1972, fue el evento en que, por vez primera, se concentró la atención internacional en temas ambientales. En dicho evento, se hizo un llamado a los gobiernos para que orientaran sus esfuerzos a la preservación del medio ambiente, subrayando la importancia de establecer un sistema jurídico que contribuyera a revertir las tendencias que amenazaban a éste y garantizara a las generaciones futuras su derecho a un entorno apropiado (Gómez, 2009).

En México, y a nivel mundial, los riesgos al ambiente y a la salud causados por los residuos peligrosos son un foco de atención, que ha propiciado que se generen disposiciones regulatorias (leyes, reglamentos y normas), que establecen las pautas de conducta para evitar la generación de este tipo de residuos así como las medidas a seguir para lograr el manejo seguro a fin de prevenir riesgos, a la vez que fijan límites de exposición o alternativas de tratamiento y disposición final para reducir su volumen y peligrosidad (PROFEPA, 2014).

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 3.1 se muestra la jerarquía de la legislación mexicana en temas ambientales.



Figura 3. 1 Jerarquía Jurídica en México, modificado de González (2016)



3.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

Dado el carácter supremo de la Constitución se han incorporado en ella diversas disposiciones referentes al ambiente con la finalidad de que, al elevarse al máximo rango jurídico, se ejerza un control efectivo de la conducta humana que perjudica el ambiente, así como realizar acciones que fomenten e impulsen el aprovechamiento sustentable, la preservación y la conservación de sus recursos naturales con el propósito de lograr la continuidad de la vida, el bienestar actual y futuro de todos los habitantes del país (López & Ferro, 2006).

El Artículo 4° en su primer párrafo se refiere a la protección y promoción del desarrollo de los recursos a través de la ley. 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 (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2006).

Existen, además del artículo 4°, párrafo quinto, otras bases constitucionales para la protección del ambiente, las cuales sirvieron para que antes de la reforma de 1999 pudiese legislarse en materia ambiental. Además de reconocer el derecho de todos a disfrutar de un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar, señala en el artículo 25: “Corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable” (García, 2007).

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

A nivel nacional la urgente necesidad de resolver los problemas ocasionados por los residuos fue la razón para la expedición de la Ley General para la Prevención y Gestión integral de los residuos (LGPGIR), la cual entró en vigencia el 8 de abril del 2004 y plantea entre otros conceptos básicos la sustentabilidad del manejo de residuos, de tal manera que dicha gestión sea ambientalmente efectiva, económicamente viable y socialmente aceptable (Calva, 2007).

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).



3.3 Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (RLGPGIR)

El Reglamento precisa los criterios establecidos en la LGPGIR para sustentar la identificación de un residuo como peligroso, en los términos expresados en su artículo 35. Dicho reglamento reconoce que los residuos pueden considerarse como peligrosos atendiendo a enfoques distintos, los cuales se describen a continuación (Cortinas de Nava, 2006) :

- **Por definición:** se trata de aquellos contenidos en los listados comprendidos en la norma citada y que derivan de diferentes fuentes, procesos o productos desechados.
- **Mediante caracterización:** atendiendo a sus propiedades CRETIB.
- **Por resultar de mezclas:** derivar de distintas modalidades de manejo o por contaminación de equipos y construcciones que involucren a residuos peligrosos.

3.4 Normas Oficiales Mexicanas

En materia de identificación de residuos peligrosos además de la LGPGIR y su reglamento en México se tienen las siguientes normas oficiales mexicanas, las cuales se describen brevemente en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT):

Tabla 3.1 Normas Oficiales Mexicanas de la SEMARNAT referentes a residuos peligrosos

Clave de norma	Descripción
NOM-052-SEMARNAT-2005	Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligroso.
NOM-053-SEMARNAT-1993	Establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de 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-157-SEMARNAT-2003	Establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.



Es importante mencionar que la NOM-157-SEMARNAT-2003, menciona en el punto 5.3.3 que deben describirse las acciones para el aprovechamiento de este tipo de residuos, puntualizando que, si los jales son peligrosos, la valorización o reciclaje estará sujeta a lo dispuesto en el artículo 57 de la LGPGIR.

Secretaria de Salud (SSA):

Tabla 3.2 Norma Oficial Mexicana de la Secretaria de Salud referente a residuos peligrosos

Clave de norma	Descripción
NOM-087--ECOL-SSA1-2002	Residuos peligrosos biológico-infecciosos, clasificación y especificaciones de manejo.

Secretaria de Comunicaciones y Transporte (SCT):

Tabla 3.3 Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes referentes a residuos peligrosos

Clave de norma	Descripción
NOM-002-SCT/2011	Listado de las sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportado.
NOM-003-SCT/2008	Establece las características, dimensiones, símbolos y colores de las etiquetas que deben portar todos los envases y embalajes, que identifican la clase de riesgo que representan durante su transportación y manejo las sustancias, materiales y residuos peligrosos.
NOM-004-SCT/2008	Establece el sistema de identificación de unidades destinadas al transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
NOM-005-SCT/2008	Establece la información de emergencia para el transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
NOM-010-SCT2/2009	Establece las disposiciones de compatibilidad y segregación para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
NOM-043-SCT/2003	Establece los documentos de embarque de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
NOM-019-SCT2/2015	Establece las especificaciones técnicas y disposiciones generales para garantizar la limpieza en las unidades vehiculares que transportan sustancias materiales y/o residuos peligrosos.



3.5 Zona de estudio

El yacimiento de Cerro de Mercado, pertenece a la región minera número 12. se localiza en el centro del estado de Durango, justo en el límite norte de la actual ciudad capital. Constituye buena parte de un cerro aislado de mediana altura que destaca sobre la gran llanura denominada Valle de Guadiana. Sus coordenadas geográficas son $24^{\circ} 02'48''$ N y $104^{\circ} 40'18''$ W, y su altitud es de 1980 msnm (Corona et al., 2009) (Servicio Geológico Mexicano, 2015).

3.5.1 Ubicación geográfica

El caso de estudio se llevará a cabo en el municipio de Durango, localizado en el Valle del Guadiana y en el centro oeste de la altiplanicie mexicana en el estado de Durango (figura 3.2). Dicho municipio colinda al norte con Canatlán y Pánuco de Coronado, al noreste con Guadalupe Victoria, al sur con Pueblo Nuevo y Mezquital, al este con los municipios de Nombre de Dios y Poanas, finalmente al oeste colinda con los municipios de Pueblo Nuevo y con San Dimas.

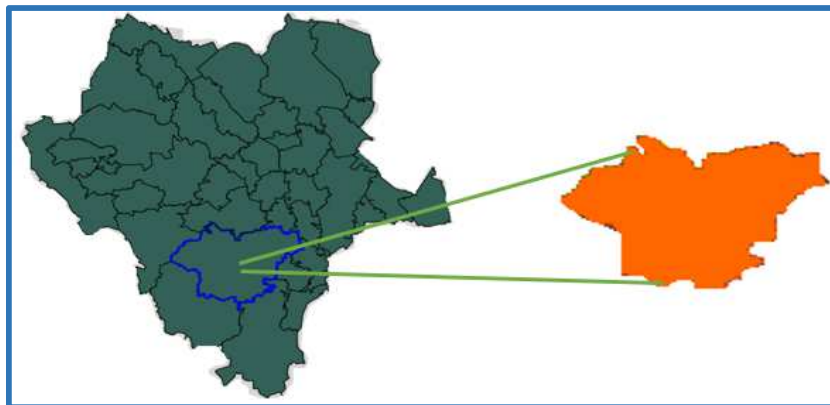


Figura 3.2 Ubicación del Municipio de Durango en Durango (INEGI, 2010)

3.5.2 Clima

El (INEGI, 2010) reporta que la temperatura promedio más alta es mayor a 31°C , se presenta en los meses de mayo y junio y la más baja, alrededor de 1.7°C , en el mes de enero. Las lluvias se presentan en verano, principalmente en los meses de julio y agosto la precipitación media del Estado es de 500 mm anuales. El mes más seco es marzo, con 4 mm. En agosto, la precipitación alcanza su valor máximo, con un promedio de 114 mm.



Capítulo 4. Metodología

Materiales, equipos, condiciones, análisis estadístico, etc.

La metodología para el desarrollo del presente trabajo comenzó con la búsqueda de información específica sobre el tema de jales mineros así como tecnologías de tratamiento para este tipo de residuos como lo es el caso de la solidificación/estabilización.

4.1 Muestreo

La toma de muestras de jales se llevó a cabo en el día 23 de enero de 2018. Los encargados de la mina Cerro de Mercado permitieron muestrear la presa de jales llamada “Boleo Estrella”, dicha presa tiene 15 años fuera de operación, cuenta con un área de 162000 m², 80 metros de profundidad y alberga 3 700 000 toneladas de jales.

La recolección de ejemplares se basó en la NMX-AA-132-SCFI-2006. Se definió que el muestreo sistemático era el más adecuado para llevarse a cabo en la presa Boleo Estrella debido a que, no se contó con ningún estudio previo en esta presa de jales que permitiera dividir en zonas o estratos y obtener información más precisa de los jales. De acuerdo a la norma mencionada se establecieron 27 puntos para tomar las muestras, éstas fueron tomadas a 30 cm de profundidad y de las cuales se colectó una cantidad aproximada de 4 kg.

La metodología seguida se muestra en la figura 4.1

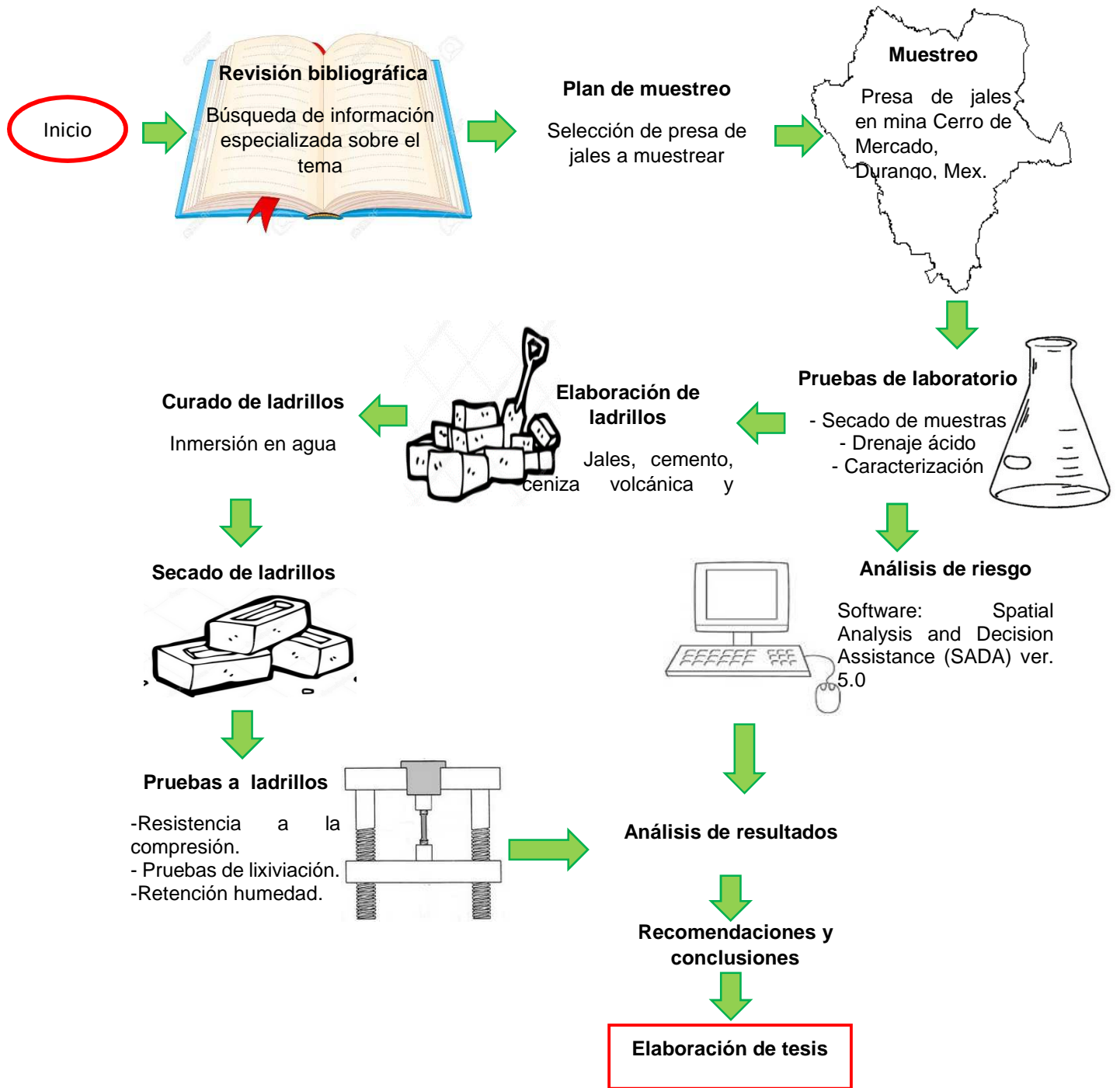


Figura 4.1 Metodología General



4.2 Diseño de experimentos

4.2.1 Unidad Experimental

La norma mexicana NMX-C-441-ONCCE-2005, define de la misma manera a tabiques y ladrillos de uso no estructural; componentes de forma prismática, fabricados mediante arcillas comprimidas o extruidas, mediante un proceso de cocción o de otros materiales con procesos diferentes que pueden ser usados como muros de división, revestimiento o cualquier otro uso no estructural. Por otro lado, (Collado, 2005) define a los tabiques como elementos verticales que solo cumplen con la función de dividir un espacio y a los ladrillos como unidades de pequeñas dimensiones capaz de realizar un elemento mayores dimensiones (tabiques, muros, etc.).

Para esta tesis se utilizó como unidad experimental ladrillos, con el mismo tamaño, homogéneos en su composición, elaborados con Jal, cemento, vidrio y puzolana. Se elaboraron 3 ladrillos por cada nivel de tratamiento.

4.2.2 Variables de respuesta

Las variables de respuesta que se establecieron son:

- La resistencia a la compresión
- Concentración de metales pesados en el lixiviado
- Absorción máxima inicial de agua

4.2.3 Definición de factores y niveles

Los factores que se definieron fueron 4: Contaminante (jal), cemento, vidrio y puzolana, cada uno con tres niveles, los cuales fueron las distintas proporciones de mezclado. En la tabla 4.1 se muestran los tratamientos, factores así como los niveles de estos.

Tabla 4.1 Factores, tratamiento y niveles

Tratamiento	Factor jal	Factor cemento	Factor vidrio	Factor puzolana
1	60%	40%	-	-
2	70%	30%	-	-
3	80%	20%	-	-
4	60%	20%	20%	-
5	70%	15%	15%	-
6	80%	10%	10%	-
7	60%	20%	-	20%
8	70%	15%	-	15%
9	80%	10%	-	10%



4.2.4 Modelo estadístico

El modelo estadístico que se ajustó al experimento para describir el efecto que tuvo la adición de vidrio molido y puzolana en la encapsulación de metales pesados así como en la absorción de agua es un completamente al azar. El modelo de efectos implica que se empieza el experimento con unidades experimentales (u.e.) con la misma capacidad de respuesta (μ) y con la misma varianza. La aplicación de los tratamientos tiene el efecto de alterar las medias, pero supone que no cambia la varianza. La ecuación del modelo es la siguiente (Montgomery, 2005):

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \begin{array}{l} i=1, \dots, 9 \\ j=1, 2, 3 \end{array}$$

En donde:

y_{ij} = Observación de la j -ésima u.e. del i -ésimo tratamiento

μ = Media general común a todas las unidades u.e.

τ_i = Efecto del i -ésimo tratamiento

ε_{ij} = Error experimental

Las hipótesis a probar son:

$$H_0; \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_i = 0$$

$$H_a; \tau_i \neq 0 \quad \text{Para al menos una } \tau$$

Por otro lado se realizó otro experimento con el fin de conocer la influencia del intemperismo acelerado sobre los tratamientos. Se utilizó un modelo estadístico factorial, en donde un factor fue los nueve tratamientos definidos anteriormente y el otro es si se usó o no la cámara de intemperismo. El modelo es el siguiente (Montgomery, 2005):

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{array}{l} i = 1, \dots, 9 \\ j = 1, 2 \\ k = 1, 2, 3 \end{array}$$

En donde:

y_{ijk} = respuesta para la k -ésima u.e. del nivel i de tratamiento y el j de la cámara de intemperismo

μ = media general

τ_i = efecto del tratamiento

β_j = efecto de cámara de intemperismo



$(\tau\beta)_{ij}$ = interacción tratamiento-cámara de intemperismo

ε_{ijk} = error experimental

Las hipótesis a probar son:

$$H_{01} : \tau\beta_{ij} = 0 \quad \forall_{ij}$$

$$H_{02} : \tau_i = 0 \quad \forall_i$$

$$H_{03} : \beta_j = 0 \quad \forall_j$$

Con el fin de aleatorizar el orden de los 9 tratamientos se utilizó el paquete R, lo cual tuvo el fin de equilibrar el efecto de condiciones externas o no controlables que pueden influir en el resultado del experimento. La programación para aleatorizar se encuentra en el apéndice 1 y en la tabla 4.1 se muestran los tratamientos ordenados.

Tabla 4.2 Aleatorización de los tratamientos

Ladrillo	Tratamiento	Ladrillo	Tratamiento	Ladrillo	Tratamiento
1	3	10	8	19	7
2	9	11	1	20	6
3	9	12	1	21	9
4	7	13	8	22	5
5	3	14	4	23	5
6	2	15	7	24	6
7	2	16	4	25	3
8	2	17	4	26	5
9	8	18	6	27	1

La tabla anterior indica que el ladrillo número 1 fue elaborado mediante la adición de 80% jal y 20% cemento que es el tratamiento número 3, el ladrillo dos le corresponde al tratamiento 9 y sucesivamente para la elaboración de los demás ladrillos de acuerdo al tipo de composición de jal, cemento, vidrio y puzolana que involucre el número de tratamiento. Se elaborarán en total 54 ladrillos, la prueba de resistencia a la compresión fue aplicada a todos los ladrillos. Por motivos de materiales y tiempo, las pruebas de absorción de agua, intemperismo acelerado y el extracto PECT fueron aplicadas solo en 27 ladrillos.

4.3 Proceso de elaboración de ladrillos

Para la elaboración de ladrillos se construyó un dispositivo con la capacidad de ejercer presión y mediante ésta dar forma a los ladrillos. Dicho dispositivo se muestra y describe en la figura 4.2.

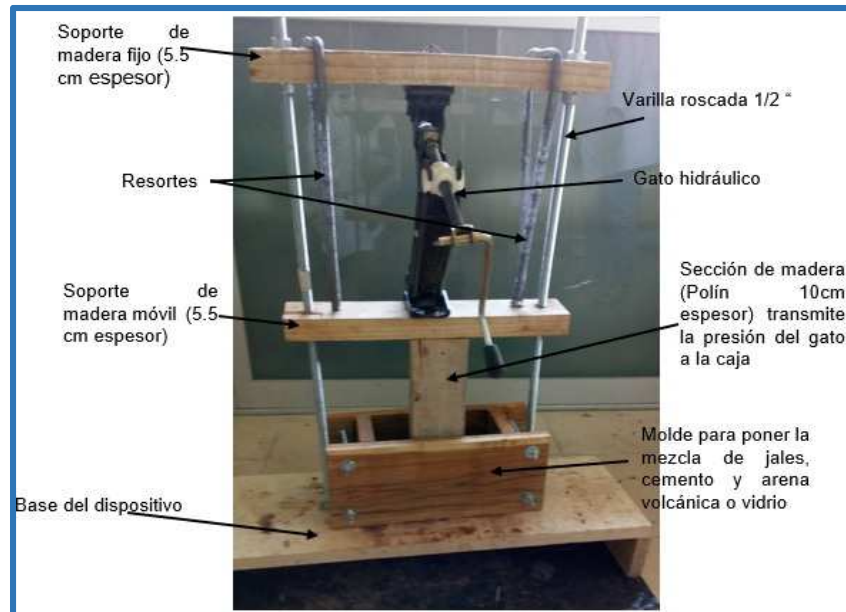


Figura 4.2 Dispositivo para elaborar los ladrillos

El molde en el cual se pusieron las mezclas de los diversos tratamientos se construyó con las medidas necesarias para que los ladrillos cumplieran con lo establecido en la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013. Dicho molde constó de tablas ranuradas por sus extremos, unidas por varillas roscadas de 3/8" las cuales se apretaban mediante tuercas, esto con el fin de asegurar que no se desarmara una vez que se ejercía presión mediante el gato hidráulico y evitar que el ladrillo perdiera su forma rectangular. El molde y sus características se muestran en la figura 4.3.

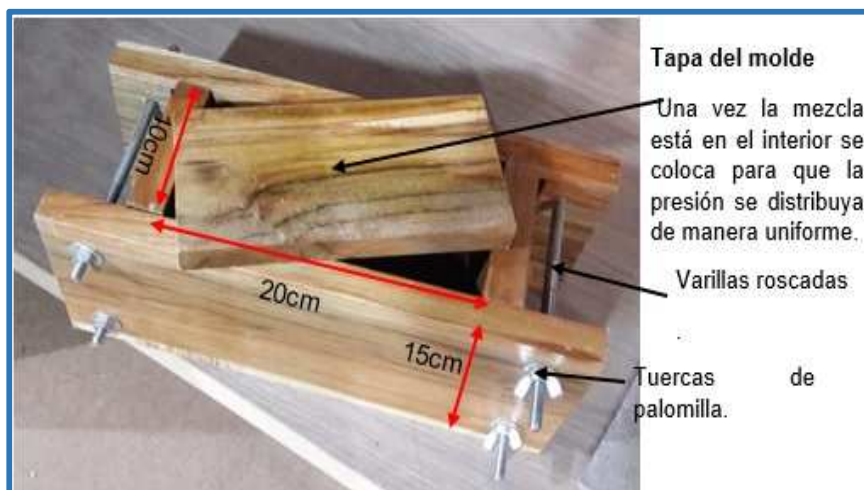


Figura 4.3 Molde para elaborar los ladrillos



4.4 Molienda del vidrio

El vidrio empleado para los tratamientos 4, 5 y 6 fue material de laboratorio roto conocido como vidrios de borosilicato, con una composición estimada de: 76% SiO_2 , 13% B_2O_3 , 4% Al_2O_3 , 5% Na_2O y 1% CaO (Meyer, 2003) el cual se lavó cuidadosamente con agua y jabón, posteriormente se dejó secar. Se utilizó este tipo de vidrio debido a su gran abundancia en los laboratorios de la Facultad de Química de la UNAM. Meyer (2003) menciona que para evitar la reacción álcali-sílice (RAS) mientras más pequeña sea la granulometría del vidrio menor es el efecto de expansión causado por la RAS. Cabe mencionar que Meyer usó vidrio molido como agregados para mortero, mezclando este con vidrio molido y agua.

Dado que los ladrillos en este trabajo no fueron cocidos en horno se optó por usar vidrio con una granulometría 0.149 mm (malla # 100) y así poder integrarlo mejor a la mezcla con jal y cemento y reducir la RAS. La molienda de vidrio se realizó en el laboratorio de beneficio de minerales de la Facultad de Química mediante un molino de bolas. La figura 4.4 muestra algunas etapas del proceso.

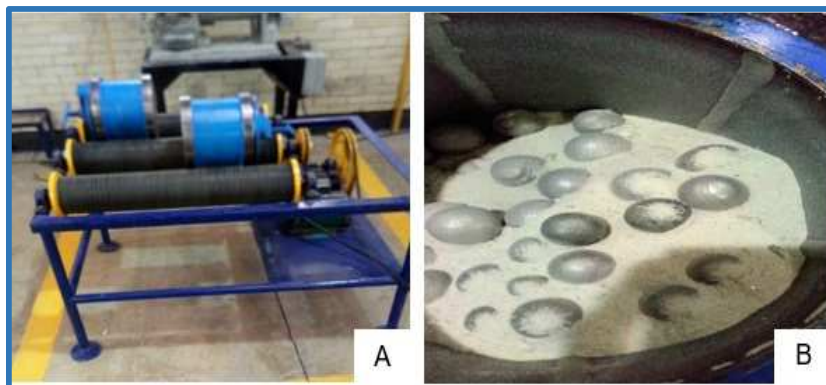


Figura 4.4 A) Molinos en operación y B) Vidrio después de la molienda

4.5 Material puzolánico

El material puzolánico utilizado fue tefra recolectada por el CENAPRED en las zonas aledañas del volcán Popocatepetl (coordenadas: 19° 5'12.58"N, 98°38'41.05"O, 3682 msnm). La tefra, es el conjunto total de partículas fragmentadas de roca ígnea expulsadas durante la actividad volcánica explosiva (Cashman & Rust, 2016). La distancia del cráter al punto donde se recolectó la puzolana es aproximadamente de 7.9 km (determinada con la herramienta de medición de google earth) con base en esta distancia la tefra recibe el nombre de lapilli, generalmente de color negro, de composición basáltica y tamaño de partícula entre 2 a 32 mm (Instituto de Geografía, UNAM & CENAPRED, 2018).

La composición del SiO₂ en el lapilli es aproximadamente entre 44% al 52%, así como otros minerales ricos en hierro y magnesio (Escobar , 2016). En la figura 4.5 se muestran el lugar donde se tomó la tefra (paso de Cortés) y el secado de la misma.

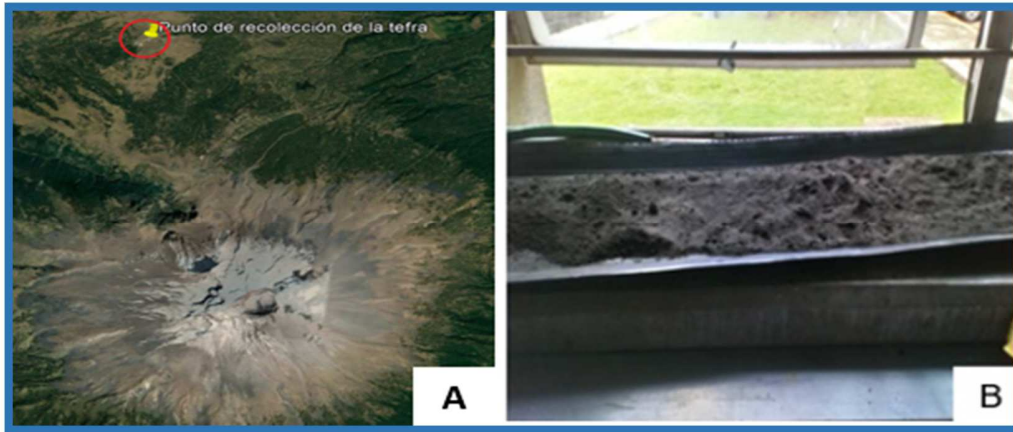


Figura 4.5 A) Punto de recolección de la tefra y B) Secado de la tefra

4.6 Preparación de las mezclas

Para la elaboración de los tratamientos se mezclaron 2.5 kg de cada una de las 27 muestras (previamente secadas) que se recolectaron en la presa de jales Boleo Estrella, se mezclaron perfectamente con ayuda de palas para homogenizar todas las muestras y obtener una mezcla compuesta.

Mediante prueba y error se determinó la cantidad de mezcla necesaria que se tenía que poner en el molde, la presión a la cual los ladrillos obtuvieran un espesor de 5.5 cm y la cantidad de agua necesaria para obtener una mezcla de consistencia adecuada. De acuerdo con lo anterior se determinó la masa total de la mezcla en 1.8 kg, una cantidad de agua de 420 ml y para asegurar que todos los ladrillos tuvieran la misma presión ejercida se pusieron marcas en las varillas roscadas así como en el polín. En la tabla 4.3 se muestra: la masa de jal, cemento, vidrio y puzolana utilizada en los 9 tratamientos.

Tabla 4.3 Cantidades (gramos) de cada factor usado en los tratamientos por repetición

Tratamiento	Jal	Cemento	Vidrio	Puzolana
1	1080	720	-	-
2	1260	540	-	-
3	1440	360	-	-
4	1080	360	360	-
5	1260	270	270	-
6	1440	180	180	-
7	1080	360	-	360
8	1260	270	-	270
9	1440	180	-	180

4.7 Elaboración de ladrillos

El proceso de elaboración de los ladrillos comenzó pesando con ayuda de una balanza electrónica de precisión (Ohaus Pioneer PX 163) las cantidades de acuerdo al tipo de tratamiento, estas cantidades fueron puestas en un contenedor de plástico, posteriormente se incorporaron en seco los componentes con ayuda de una cuchara para albañilería. Una vez se integraron, con una probeta se agregó 420 ml de agua y se mezcló nuevamente. En la figura 4.6 se ilustran las etapas de mezclado en seco y con agua.

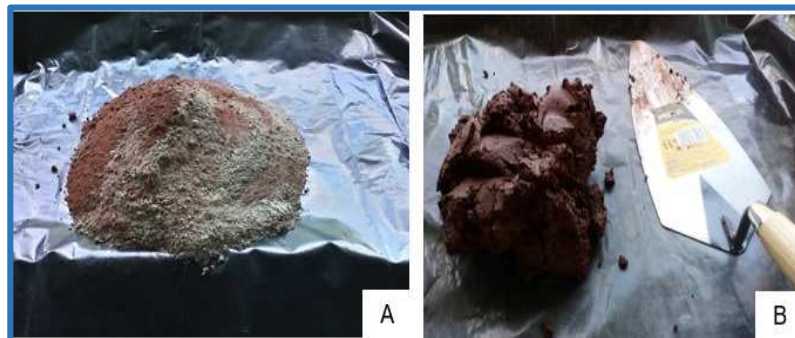


Figura 4.6 A) Mezcla en seco, B) Mezcla con agua

La mezcla hidratada fue colocada en el molde (previamente humedecido) y se montó sobre la base del dispositivo. Puesto el molde se aplicó presión por medio del gato hidráulico hasta llegar a las marcas puestas en las varillas roscadas y en el polín, ejerciendo presión alrededor de 30 segundos, posteriormente el molde fue desarmado y los ladrillos fueron colocados sobre un plástico cerca de un lugar ventilado en donde se identificaron y se dejaron secar. En la figura 4.7 se ilustra el procedimiento anterior.

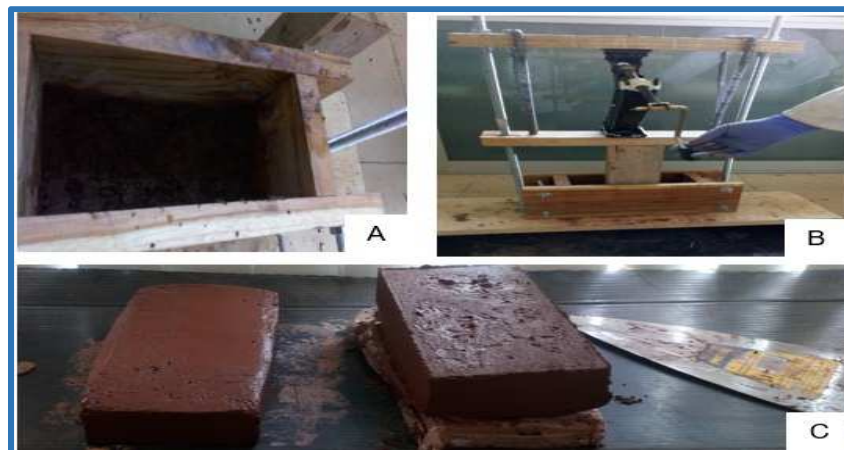


Figura 4.7 A) Molde con mezcla dentro, B) Molde montado en el dispositivo para elaborar ladrillos, C) Ladrillos después de retirar el molde



Los ladrillos se dejaron secar durante dos días, posteriormente se transportaron a un contenedor para el proceso de curado mediante inmersión en agua. El contenedor mencionado era de plástico rígido de aproximadamente 78 cm de largo, 44 cm de ancho y 34 cm de alto, una vez transportados los ladrillos a éste, se vertió agua con ayuda de un recipiente hasta que los ladrillos quedaran completamente cubiertos por ésta. El curado duró 28 días, la figura 4.8 muestra el proceso de curado.



Figura 4.8 Ladrillos en el proceso de curado

Transcurridos los 28 días los ladrillos se sacaron del contenedor y fueron colocados una semana en un lugar ventilado para que se secaran, posteriormente fueron preparados y llevados a las pruebas de compresión mecánica.

4.8 Análisis de riesgo

Para llevar a cabo el análisis de riesgo se utilizó el software Spatial Analysis of Decision Assistance (SADA) versión 5.0 el cual permite llevar a cabo el análisis de riesgo de acuerdo a la metodología de la EPA. Fue desarrollado por la Universidad de Tennessee. Algunas de sus características más destacadas son:

- Es un software de libre distribución.
- Permite la evaluación de riesgo humano y ecológico.
- Sus escenarios de riesgo son: suelo de tipo residencial, industrial, para la agricultura, recreacional y excavación.
- Permite la modificación de parámetros como frecuencia de exposición, tiempo de vida, vías de exposición, etc.

4.8.1 Limitaciones

No incluye modelos de flujo y transporte por lo que las concentraciones en los diferentes medios deben determinarse analíticamente o estimarse a partir de modelos externos (Ilarri, 2017). El registro de contaminantes, la matriz donde estos se encuentran, así como las coordenadas, son registrados en un archivo de excel, el cual posteriormente se carga a SADA.

El programa solo acepta un máximo de 250 columnas. En la figura 4.9 se observa un diagrama con la información requerida por paquete computacional.

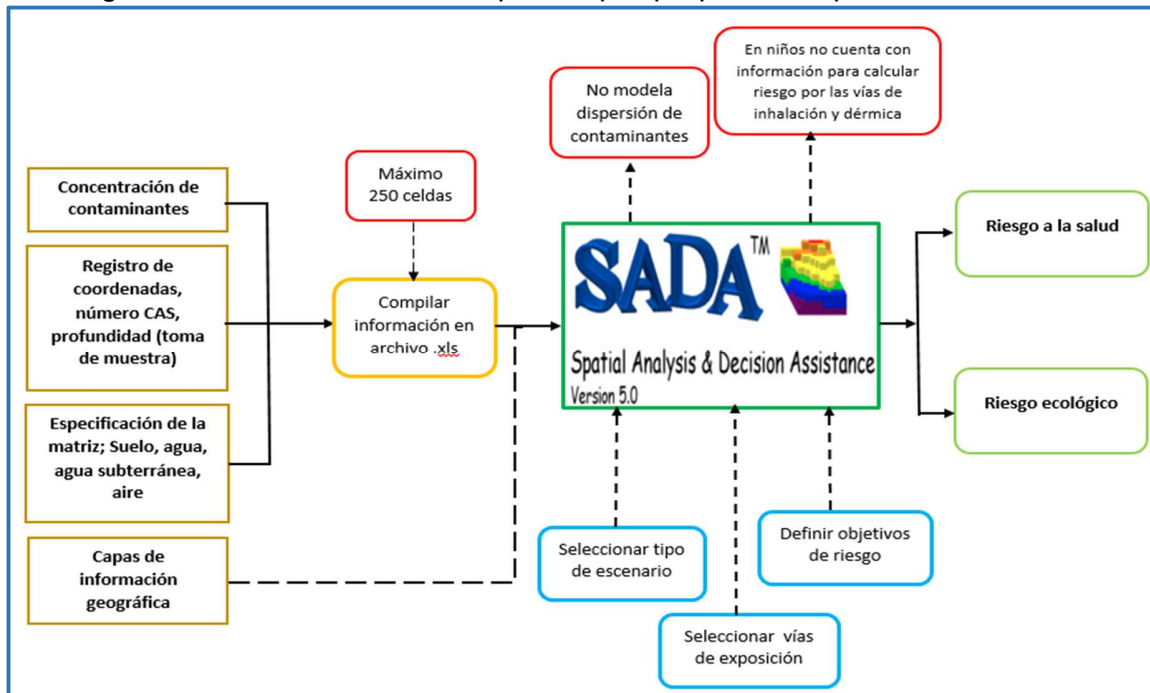


Figura 4.9 Información requerida por el Software así como sus limitaciones.

4.8.2 Vías de exposición

La vía de exposición considerada para realizar los cálculos en el software SADA se muestra indicada por una línea roja en la figura 4.10.

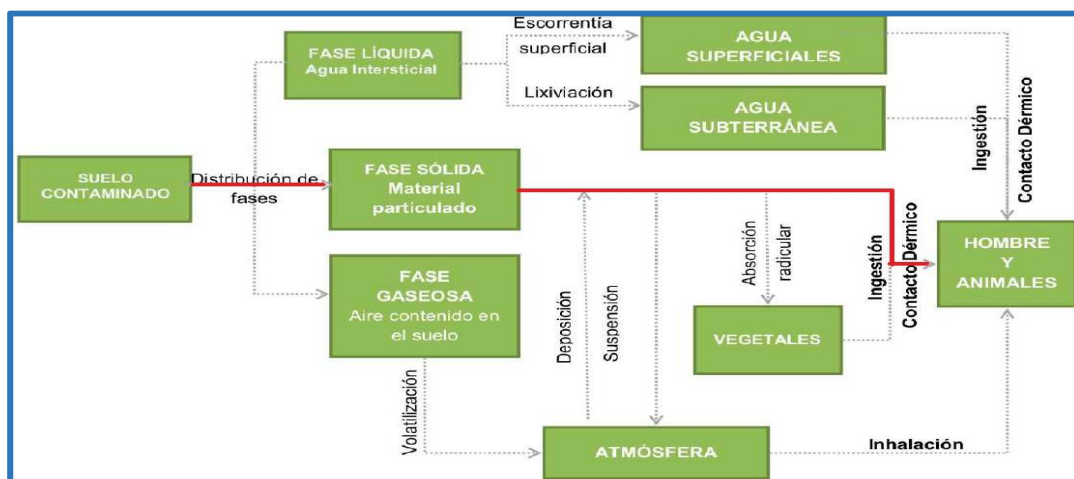


Figura 4.10 Vía de exposición considerada para la evaluación del riesgo en el software SADA (Ilarri, 2017)



Los datos de concentración de metales alimentados al software antes mencionado fueron los obtenidos mediante la técnica de fluorescencia de rayos x para el caso del antimonio y se hizo la diferencia entre la concentración de cromo total (fluorescencia rayos x) y cromo (VI) (NOM-157-SEMARNAT-2009) para obtener la concentración de cromo (III).

4.9 Ecuaciones utilizadas por el software para el cálculo de riesgo

Para el cálculo de riesgo se seleccionaron las vías de exposición; ingestión, dérmica y respiratoria. Para cada vía así como para cada escenario SADA utiliza diferentes ecuaciones y consideraciones. Es importante aclarar que el escenario utilizado para los cálculos de riesgo es el de tipo de suelo industrial y residencial. Algunas de las ecuaciones principales utilizadas por el paquete se muestran a continuación.

4.9.1 Ingestión

Ecuación utilizada por SADA

$$Cantidad_{ing} = \frac{C_{sn} \times CF_1 \times EF \times FI \times ED \times IR}{CF_2 \times BW \times AT}$$

En la tabla 4.4 se describen los términos de la ecuación anterior

Tabla 4.4 Términos de la ecuación de la vía de ingestión

Término	Descripción	Valor
C _{sn}	Concentración en suelo	-----
CF ₁	Factor de conversión	10 ⁻⁶ (kg/mg)
EF	Frecuencia de exposición	250 días/año (EPA, 1992)
FI	Fracción ingerida	1 (sin unidades)
ED	Duración de la exposición	25 (EPA. 1991)
IR	Tasa de ingestión de sólidos	200 mg/día (EPA, 1989)
CF ₂	Factor de conversión	365 días/año
BW	Peso corporal	70 kg (EPA, 1991)
AT	Tiempo promedio	25 años

4.9.2 Inhalación

Ecuación utilizada por SADA

$$Cantidad_{inh} = \frac{C_{sn} \times EF \times ED \left(\frac{1}{VF} + \frac{0.036(1-V) \left(\frac{U_m}{U_t}\right)^3 F(x)}{\left(\frac{Q}{C}\right) CF_3} \right) IR_{air}}{CF_2 \times BW \times AT}$$



En la tabla 4.5 se describen los términos de la ecuación anterior.

Tabla 4.5 Términos de la ecuación de la vía de inhalación

Término	Descripción	Valor
C _{sn}	Concentración en suelo	-----
EF	Frecuencia de exposición	250 días/año (EPA, 1992)
ED	Duración de la exposición	25 años (EPA, 1991)
VF	Factor de volatilización	-----
V	Fracción de la cobertura vegetal	25 (EPA, 1991)
U _m	Velocidad media anual del viento	4.69 m/s (EPA, 1996)
U _t	Valor umbral equivalente de la velocidad del viento	11.32 m/s (EPA, 1996)
IR _{air}	Tasa de inhalación de sólidos	20 m ³ /día (EPA, 1989)
F(X)	Función dependiente de U _m /U _t	0.194 sin unidades (Cowherd, 1985)
Q/C	Inverso de la concentración principal a 0.5 de la fuente	90.8 (gm ³)/(m ² ·skg) (EPA, 1996)
CF ₂	Factor de conversión	365 días/año
CF ₃	Factor de conversión	36000 s/h
BW	Peso corporal	70 kg (EPA, 1991)
AT	Tiempo promedio	25 años

4.9.2 Dérmica

Ecuación utilizada por SADA

$$Cantidad_{der} = \frac{C_{sn} \times CF_4 \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{CF_2 \times BW \times AT}$$

En la tabla 4.6 se describen los términos de la ecuación anterior

Tabla 4.6 Términos de la ecuación de la vía dérmica

Término	Descripción	Valor
C _{sn}	Concentración en suelo	----
CF ₄	Factor de conversión	0.01 (kg cm ²)/(mg m ²)
EF	Frecuencia de exposición	250 días/año (EPA, 1992)
ED	Duración de la exposición	25 años (EPA, 1991)
SA	Área de la superficie	0.316 m ² /día (EPA, 1992)
AF	Factor de adherencia	1 mg/cm ² (EPA, 1992)
ABS	Factor de absorción	0.01 sin unidades (EPA, 1995)
CF ₂	Factor de conversión	365 días/año
BW	Peso corporal	70 kg (EPA, 1991)
AT	Tiempo promedio	25 años

Capítulo 5. Resultados y su evaluación

5.1 Muestreo

5.1.1 Materiales usados

Los materiales usados para recolectar las muestras fueron los especificados por la norma NMX-AA-132-SCFI-2006 “muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides y manejo de la muestra”.

5.1.2 Plan de muestreo

En el plan de muestreo se definió un patrón rectangular, ya que este es el que más se adecuaba a la forma de la presa Boleo Estrella. Para determinar el número de puntos donde tomar las muestras se utilizó la tabla No.1 de la norma NMX-AA-132-SCFI-2006, en la cual se ubicó el número de hectáreas (16.2) de la presa de jales y de acuerdo a esta cantidad el número de puntos mínimos de muestreo fue de 27. En la figura 5.1 observan los puntos donde se tomaron las muestras y en la tabla 5.1 se muestran las coordenadas de los mismos.

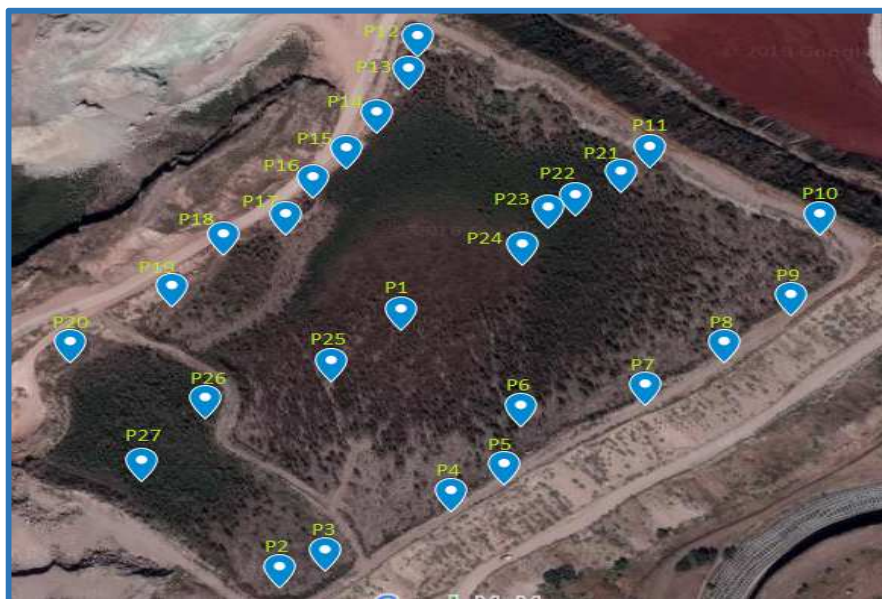


Figura 5.1 Puntos donde se tomaron las muestras

Tabla 5.1 Coordenadas de los puntos de muestreo

Coordenadas					
Punto	Norte	Oeste	Punto	Norte	Oeste
1	24°3'16.632"	104°39'56.807"	15	24°3'21.708"	104°39'58.211"
2	24°3'8.496"	104°39'59.904"	16	24°3'20.772"	104°39'59.039"
3	24°3'9.036"	104°39'58.571"	17	24°3'19.62"	104°39'59.76"
4	24°3'10.908"	104°39'55.548"	18	24°3'18.972"	104°40'1.344"
5	24°3'11.736"	104°39'54.179"	19	24°3'17.352"	104°40'2.64"
6	24°3'13.572"	104°39'53.784"	20	24°3'15.588"	104°40'5.232"
7	24°3'14.256"	104°39'50.58"	21	24°3'20.952"	104°39'51.228"
8	24°3'15.588"	104°39'48.599"	22	24°3'20.196"	104°39'52.38"
9	24°3'17.064"	104°39'46.872"	23	24°3'19.836"	104°39'53.063"
10	24°3'19.584"	104°39'46.151"	24	24°3'18.648"	104°39'53.711"
11	24°3'21.744"	104°39'50.471"	25	24°3'14.976"	104°39'58.608"
12	24°3'25.236"	104°39'56.376"	26	24°3'13.824"	104°40'1.811"
13	24°3'24.192"	104°39'56.627"	27	24°3'11.844"	104°40'3.431"
14	24°3'22.824"	104°39'56.626"			

La toma de muestras se llevó a cabo a 30 cm de profundidad, se obtuvo una cantidad de aproximadamente 4 kg en cada punto. Durante la toma de las mismas se observó una extensa vegetación así como una cantidad abundante de hormigueros, Oniscideas (cochinillas) y arañas, de igual forma se presentaron una gran cantidad de raíces, en la figura 5.2 se presentan algunos ejemplos.

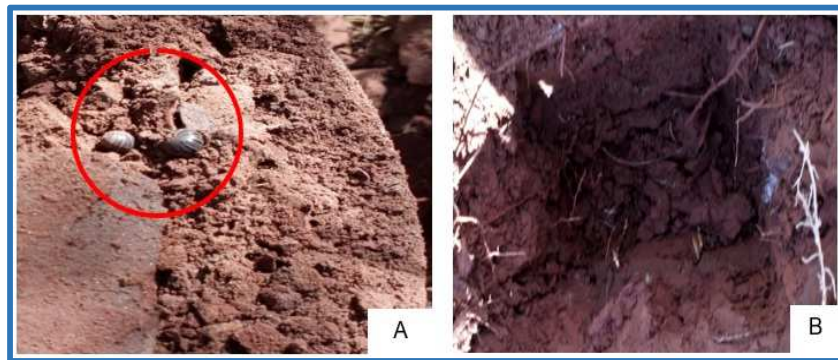


Figura 5. 2 A) Oniscideas presentes en los jales, B) Raíces presentes a 30 cm de profundidad en la presa de jales

5.1.3 Transporte y cadena de custodia

Las muestras obtenidas se pusieron en cubetas de plástico, con tapa de rosca, las cubetas antes mencionadas tenían dimensiones de 70 cm de altura y 40 cm de diámetro. El acomodo de las muestras se hizo como se muestra en la figura 5.3.

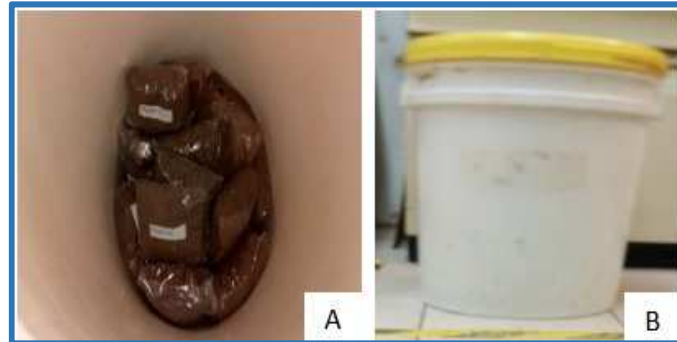


Figura 5.3 A) Acomodo de los jales dentro de los cilindros, B) Contenedores para el transporte

Debido a la cantidad de muestras recolectadas se utilizaron dos recipientes de plástico de forma cilíndrica para transportarlas. Los cilindros fueron cerrados con sus respectivas tapas y les fue colocada una etiqueta de identificación, posteriormente se enviaron al laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria (LISA) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en la Ciudad de México.

5.2 Tratamiento de las muestras

5.2.1 Secado

Para realizar el secado se utilizó papel Kraft y plástico. Los trozos de plástico y papel Kraft previamente identificados con la muestra contenida fueron dispuestos en las mesas del laboratorio, se dejaron secar una semana. En la figura 5.4 se puede observar el secado de las muestras.

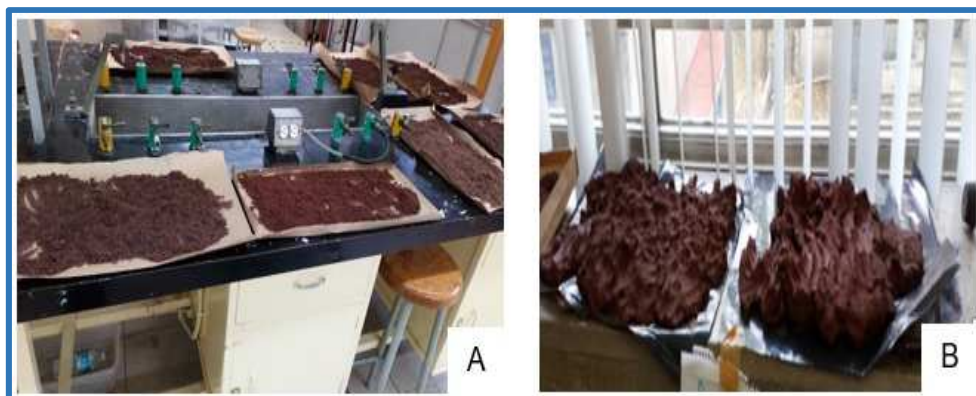


Figura 5.4 A) Secado de jales en papel Kraft, B) Secado de jales en plástico

Cuando las muestras estuvieron secas se pusieron en bolsas de plástico herméticas nuevas para posteriores análisis.



5.2.3 Cuarteo

El cuarteo de las muestras se realizó de acuerdo al punto 7.3.4 de la norma NMX-AA-132-SCFI-2006.

5.2.2 Granulometría de los jales

Posteriormente, se determinó la granulometría de la mezcla compuesta de las 27 muestras de jales de acuerdo a la norma ASTM C 136-01 "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates" los resultados se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5. 2 Determinación de granulometría de los jales

#malla	Apertura (mm)	Masa retenida(g)	%ret(g)	%Racum	% pasa	Módulo de finura
8	2.36	14.61	2.92	2.92	97.33	2.6
16	1.18	26.01	5.20	8.12	92.177	
30	0.6	37.67	7.53	15.66	84.34	
50	0.3	69.91	13.98	29.64	70.35	
100	0.15	128.14	25.63	55.28	44.73	
200	0.075	16.93	3.4	58.66	41.34	
>200	-----	206.65	41.34	100.00		
Suma		499.92	100			

De acuerdo con Mena y Loera (1972) el valor de módulo de finura obtenido mediante la norma ASTM C 136-01 se puede clasificar a los jales obtenidos de la presa Boleo Estrella como agregados ligeramente finos.

5.3 Análisis de las muestras

Como parte de las pruebas presuntivas se realizaron las pruebas de pH de acuerdo a la NMX-AA-013-SCFI-2006 y la "Prueba de Balance Ácido-Base para jales que contienen sulfuros de metales" la cual se encuentra en la NORMA Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003. Dicha prueba, consta a su vez de dos determinaciones; "Potencial de Neutralización" y "Potencial de Acidez", estas fueron realizadas para determinar si los jales eran potenciales generadores de drenaje ácido.

5.3.1 Determinación de pH

El potencial de hidrógeno (pH), se determinó de acuerdo a la NMX-AA-25-1984 con el propósito de conocer si las muestras son ácidas o alcalinas. En las figuras 5.5 y 5.6 se observa el equipo utilizado y los valores de pH obtenidos.



Figura 5.6 Potenciómetro utilizado

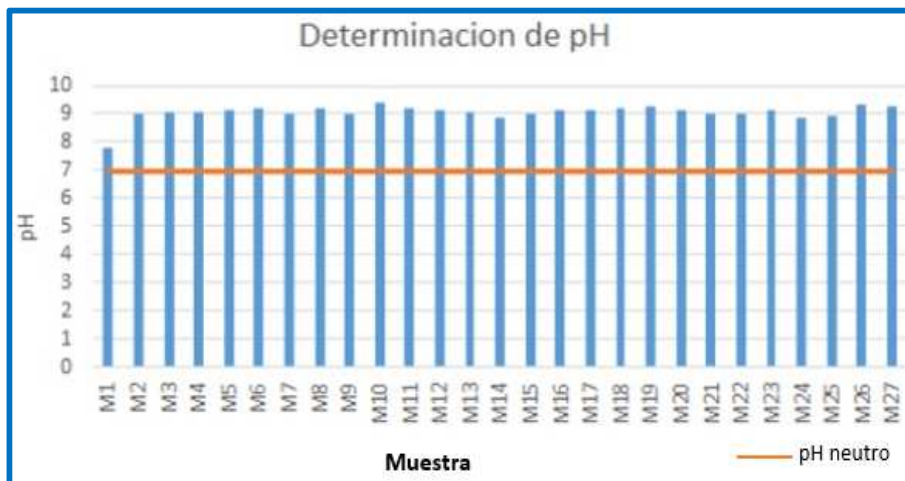


Figura 5. 5 pH de las muestras de jales

De acuerdo con Morint y Hunt (2001) la clasificación de drenajes en función del pH es para el caso de la presa Boleo Estrella “casi neutro”, el cual va de valores de pH de 6 a 9 o 10 y los autores antes mencionados los describen como:

- Dependiendo de la abundancia de los minerales, en determinados periodos pueden ser ácidos o alcalinos.
- Concentración de metales disueltos algunas veces puede exceder niveles tóxicos.

En la figura 5.6 se tiene que para todas las muestras los valores de pH son de entre 7 y 9, lo cual indicaría que estamos ante un tipo de drenaje alcalino. Aduvire (2006) menciona que aunque no es frecuente, las aguas alcalinas en algunos casos pueden ser tan dañinas como las aguas ácidas.



5.3.2 Determinación del potencial de neutralización

Inicialmente se realizó la medición cualitativa de carbonatos, la cual consiste en agregar gotas de ácido clorhídrico diluido a una pequeña muestra de jal y observar si hay efervescencia, posteriormente se califica la reacción como nula, moderada o fuerte. 25 muestras calificaron como “fuerte” y 2 calificaron como “moderado”. Lo anterior se realizó de acuerdo a lo estipulado en la NOM-141-SEMARNAT-2003. En la tabla 5.2 se observan las calificaciones obtenidas en cada muestra.

Tabla 5.3 Medición cualitativa de carbonatos

Medición cualitativa de carbonatos					
Muestra	Calificativo	Muestra	Calificativo	Muestra	Calificativo
1	Fuerte	10	Fuerte	19	Fuerte
2	Fuerte	11	Fuerte	20	Fuerte
3	Fuerte	12	Fuerte	21	Fuerte
4	Fuerte	13	Fuerte	22	Fuerte
5	Fuerte	14	Fuerte	23	Fuerte
6	Fuerte	15	Fuerte	24	Fuerte
7	Fuerte	16	Fuerte	25	Fuerte
8	Fuerte	17	Fuerte	26	Moderado
9	Fuerte	18	Fuerte	27	Moderado

Después de la medición cualitativa de carbonatos se realizó la prueba de Potencial de Neutralización (PN) de acuerdo al procedimiento estipulado en la norma antes mencionada. Los datos se reportan como kg CaCO₃/ton de jales, utilizando la siguiente fórmula:

$$PN = \frac{(Vf \text{ en ml de HCl}) - (0.1x \text{ vol en ml de NaOH})}{\text{peso de la muestra}} \times 50$$



La figura 5.7 muestra los resultados obtenidos de la prueba de Potencial de Neutralización para cada muestra.

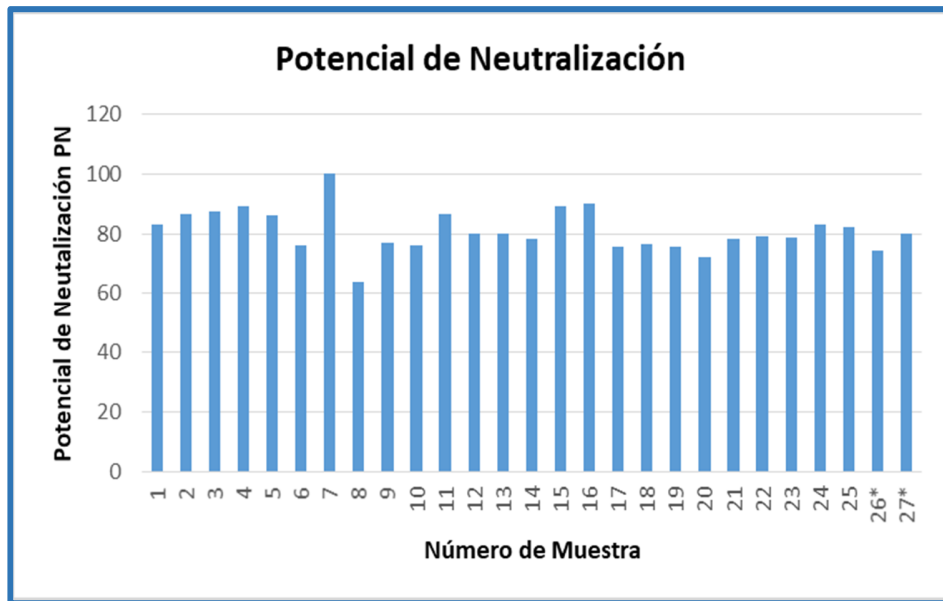


Figura 5.7 Potencial de neutralización de los jales

5.3.3 Determinación del potencial de acidez

La NOM-141-SEMARNAT-2003 menciona que el azufre total se determina 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. En este caso se utilizaron dos métodos; Determinación del azufre que está en forma de sulfatos y se cuantifican los sulfatos por el método turbidimétrico y se analizaron en el laboratorio del Instituto de Geofísica de la UNAM mediante un equipo de análisis de azufre por infrarrojo Leco S-144DR. En el caso de las pruebas hechas en el laboratorio del Instituto de Geofísica de la UNAM los resultados de dicho laboratorio en % de azufre fue NO DETECTABLE por el equipo con l.d. = 1% de azufre total. En la Figura 5.12 se muestra el equipo de análisis de azufre por infrarrojo Leco S-144DR.



Figura 5.8 Equipo utilizado para la determinación de azufre en los jales

Para el caso de la determinación de azufre que está en forma de sulfatos por el método turbidimétrico se estimó la concentración de sulfatos en la muestra por comparación de la lectura de la turbiedad, se utilizaron patrones de concentraciones de $BaSO_4$ de 0 a 40 mg/L, en incrementos de 5 mg/L. Así mismo, las muestras testigo fueron tratadas de forma similar pero sin agregar el reactivo de sulfato de bario con la finalidad de corregir el error causado por el calor y la turbiedad de la muestra, lo anterior fue realizado de acuerdo a la NOM-AA-74-1981.

Con base en los análisis de potencial de neutralización (PN), determinación de %S y % de sulfatos, se obtuvo la relación de PN/PA, siendo ésta mayor a 1.2, la NOM-141-SEMARNAT-2003 establece que si esta relación es mayor a 1.2 los jales no son potenciales generadores de drenaje ácido (figura 5.13)

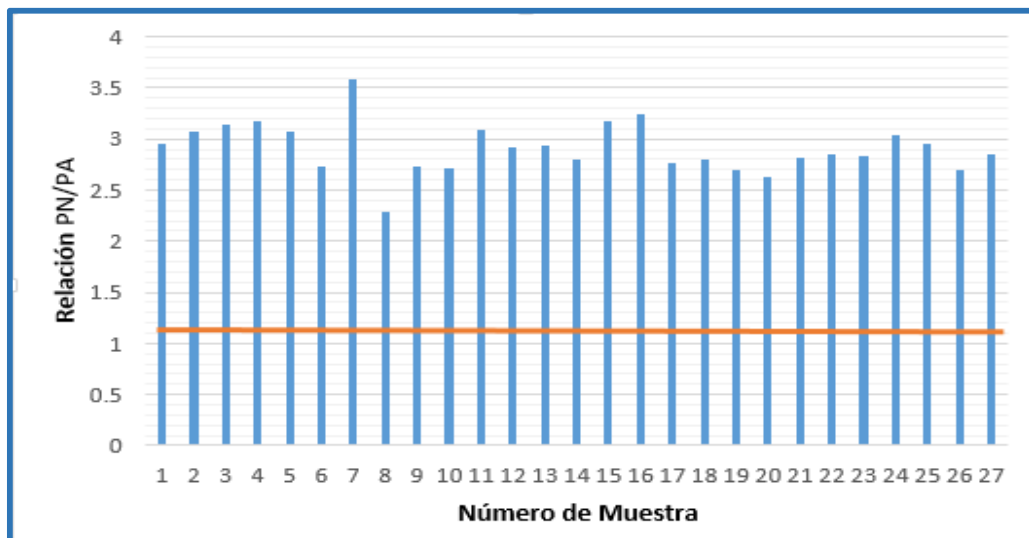


Figura 5.9 Relación PN/PA en cada muestra de jales



Lo anterior está relacionado con el hecho de que la cantidad de azufre en forma de sulfuros es muy baja, ya que estuvo por debajo del límite de detección del equipo utilizado para su determinación. Aduvire (2006) describe la formación de drenaje ácido a partir de la oxidación de los sulfuros en presencia de aire y agua (vapor o líquida) y como elemento catalizador las bacterias. Los jales de la presa Boleo Estrella están sujetos a intemperismo por lo cual están en contacto con el oxígeno y a la lluvia empero al no contener sulfuros en una cantidad significativa la generación de drenaje ácido no es posible en esta presa.

En cuanto al azufre en forma de sulfatos, Ziemkiewics et al. (2000) mencionan que los drenajes ácidos pueden contener elevadas concentraciones de SO_4 , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Al^{3+} y otros iones, puede tener o no bajo pH, pero la presencia de Fe^{3+} , Al^{3+} y Mn disueltos pueden generar iones H^+ por hidrólisis y bajar el pH. En cambio en los drenajes de mina neutros o alcalinos (como es el caso de la presa Boleo Estrella) también pueden tener elevadas concentraciones de SO_4^{2-} , Fe^{3+} , Mn^{2+} y otros solutos, pero la disolución de los minerales carbonatados neutralizan la acidez y remueven Fe^{3+} , Al^{3+} y otros iones metálicos.

5.3.4 Determinación de metales y metaloides en la muestras

La determinación de metales y metaloides presentes en las muestras de jales se llevó a cabo mediante el envío de las mismas al laboratorio de geoquímica ambiental del Instituto de Geología en donde se utilizó el método US-EPA 6200, "análisis semicuantitativo por Fluorescencia de Rayos X" mediante el equipo: Pistola Nitton XL3t Ultra.

El análisis dio como resultados que en las muestras se tiene la presencia de los siguientes metales; Zr, Sr, Rb, As, Zn, Cu, Mn, Ti, Fe, Ni, Cr, V, Ba, Sb y Ca. Los metales que se encuentran por debajo del límite de detección (LOD por sus siglas en inglés) son Pb, W, Mo, U, Tl, Au, Se, Hg, Co, Cd y Pd. Algunos metales como el cromo y antimonio están por encima del límite máximo permisible (LMP) que establece la NORMA Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, mientras que otros metales considerados potencialmente tóxicos como el arsénico y bario están por debajo del LMP que establece dicha ley. En la Figura 5.10 se muestra la cantidad de metales y metaloides en cada muestra, los valores exactos se muestran en el anexo 1.

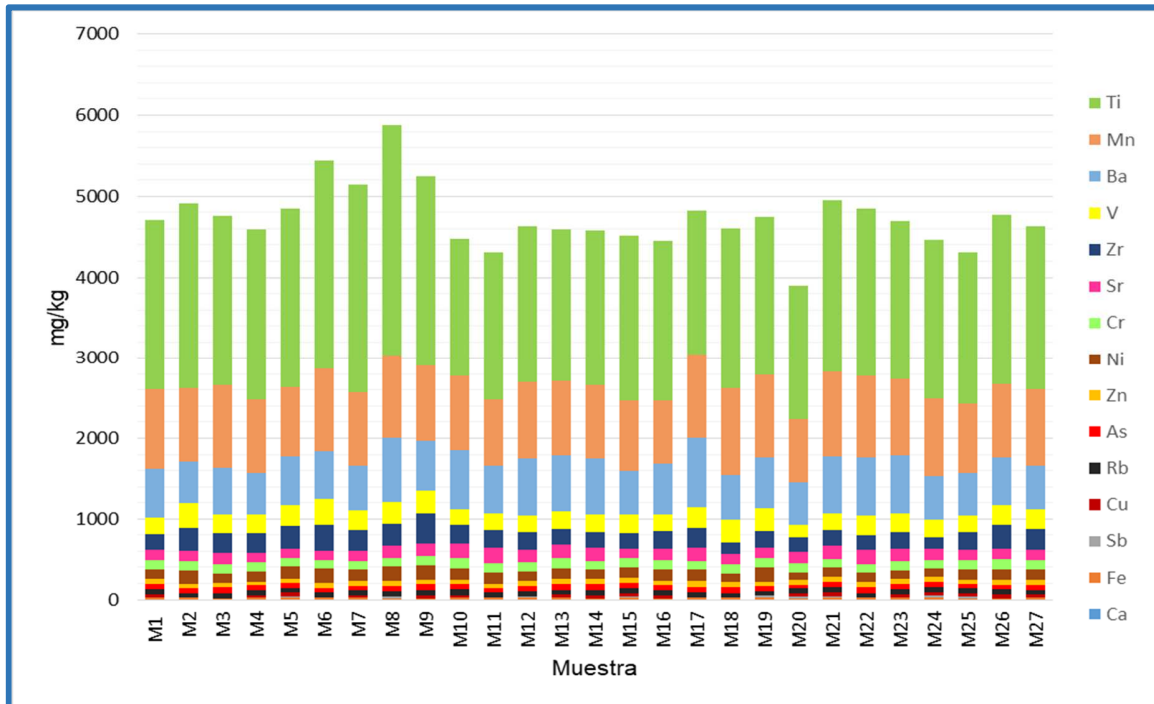


Figura 5.10 Metales y metaloides presentes en los jales

5.3.5 Determinación del estado de oxidación de cromo

Con base en el análisis de determinación de metales y metaloides se encontró que el cromo excede el límite máximo permisible establecido por la NOM-157-SEMARNAT-2009. Sin embargo este se halla en rocas, en el suelo, en animales y en las plantas, en concentraciones variables. Presenta valencia tres (III) y seis (VI). El cromo trivalente es esencial para los seres humanos, en los que promueve la acción de la insulina. Los derivados del cromo hexavalente (cromatos y dicromatos), usualmente, son de origen antropogénico, que en sus altas concentraciones producen toxicidad a los humanos y plantas (Severiche & González, 2013).

En concordancia con lo anterior se determinó el estado de oxidación del cromo presente en la presa de jales mediante la técnica "digestión alcalina para cromo hexavalente" registrada en la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. En dicha técnica mediante la adición de difenilcarbazida el Cr^{6+} se reduce a Cr^{3+} y la difenilcarbazida se oxida a difenilcarbazona, reacción redox caracterizada por el desarrollo de un color violeta.

En la Figura 5.11 se muestran algunas etapas de la determinación.

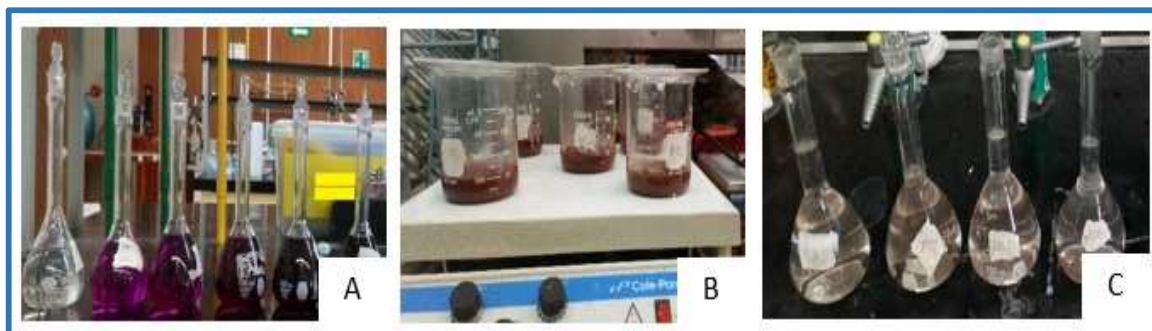


Figura 5.11 A) Curva de calibración, B) Muestras durante prueba, C) Muestras para leer en espectrofotómetro

Los resultados de concentración de Cr^{6+} presentes en las 27 muestras se presentan en tabla 5.3.

Tabla 5.4 Concentración de cromo VI en las muestras de jales

Muestra	Conc. Cr VI (mg/kg)	Muestra	Conc. Cr VI (mg/kg)	#Muestra	Conc. Cr VI (mg/kg)
1	0.065	10	0.026	19	0.026
2	0.018	11	0.01	20	0.037
3	0.029	12	0.048	21	0.034
4	0.074	13	0.049	22	0.065
5	0.03	14	0.034	23	0.037
6	0.017	15	0.006	24	0.034
7	0.052	16	0.071	25	0.02
8	0.008	17	0.01	26	0.044
9	0.026	18	0.014	27	0.01

La tabla anterior muestra los valores de cromo VI muy por debajo de las concentraciones total de referencia estipuladas en la NOM-147-SEMARNAT/ SSA1-2004 (290 mg/kg para uso agrícola y 510 mg/kg para uso industrial). Zayed y Terry (2001) mencionan que en suelos el cromo se encuentra generalmente en el estado Cr^{3+} y en condiciones reductoras el Cr^{6+} puede reducirse a Cr^{3+} , así mismo la reducción del Cr^{6+} es dependiente del pH, aumentando ésta a valores bajos de pH. Sin embargo para suelos aireados alcalinos la reducción de Cr^{6+} a Cr^{3+} es posible si el suelo contiene presencia de materia orgánica para llevar a cabo la reacción redox (Jardine et al, 1999).

Adriano (2001) describe que el agente reductor más importante en el suelo es la materia orgánica, en suelos bien aireados el oxígeno actúa como el aceptor de electrones más fuerte seguido del Fe^{2+} y sulfuros. Así mismo Adriano menciona que la reacción de oxidación de Cr^{3+} a Cr^{6+} se favorece con la presencia de óxidos de magnesio.

La presa de jales Boleo Estrella presentaba materia orgánica la cual se traduce en una intensa vegetación. La superficie de la presa de jales presentaba cuarteaduras profundas por las cuales ésta se puede airear. De acuerdo con lo reportado por Adriano (2001) y Zayed y Terry (2003) es de esperarse que la especie de cromo presente en la presa de jales sea la reducida (Cr^{3+}) (en los primeros 30 cm) lo cual se ve reflejado en los bajos valores de Cr^{6+} reportados en la tabla 5.3.

5.4 Extracto PECT de los jales

En el lixiviado solo se leyeron cromo y antimonio ya que fueron los únicos que superaron los LMP base seca establecidos en la NOM-157- SEMARNAT-2009, por lo que dicha norma establece que se deben realizar las pruebas de movilidad a los elementos que hayan rebasado el respectivo LMP. Para la determinación del extracto PECT de los jales, se homogenizó mediante cuarteo las 27 muestras para obtener una mezcla compuesta, posteriormente fue aplicado el procedimiento de extracción 9.3 establecido en la NOM-141-SEMARNAT-2003.

Una vez filtradas las muestras, se leyó cromo en un espectrofotómetro de absorción atómica GBC Avanta en el laboratorio de absorción atómica del LISA. El antimonio se determinó mediante la técnica de espectroscopia de masas por plasma acoplado inductivamente (ICPS-MS) en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología con un equipo 7500 ce Aligent utilizando argón como gas acarreador. En la figura 5.12 se observa el procedimiento de extracción y los equipos utilizados.

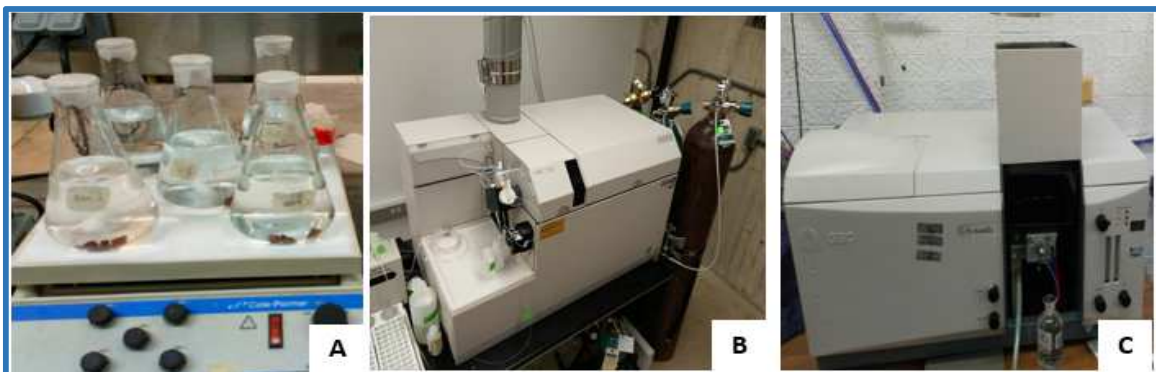


Figura 5. 12 A) Muestras durante extracción, B) Equipo de ICP utilizado (Western Washington University, 2018), C) Equipo de AA utilizado

Los resultados obtenidos muestran que el cromo se encuentra por debajo de los 2 mg/ml en el lixiviado, el cual fue el valor establecido como límite de detección. Para el caso del antimonio el valor registrado en el lixiviado fue de 2.1 mg/ml. Al comparar los valores obtenidos de los lixiviados con los de la NOM-157- SEMARNAT-2009, el cromo se encuentra por debajo del LMP que es de 5 mg/ml mientras que el antimonio supera el LMP establecido en la norma referida, el cual es de 0.53 mg/ml debido a lo anterior los jales de la presa Boleo Estrella deben ser considerados como peligrosos.

5.5 Dimensiones de los ladrillos

Las mediciones de las dimensiones de los ladrillos se realizaron con lo establecido en la norma NMX-C-038-ONNCE-2013, esta establece el método de ensayo para la determinación de dimensiones de los bloques, ladrillos, tabiques y tabicones para la construcción. Los valores se muestran en la siguiente tabla 5.5, siendo J=jal, C=cemento, V=vidrio y P=puzolana.

Tabla 5.5 Medidas promedio de los ladrillos de cada tratamiento

# Tratamiento	Promedio Largo (cm)	Promedio ancho (cm)	Promedio alto (cm)
1 (60J-40C)	20.3	10.1	5.2
2 (70J-30C)	20.2	10.1	5.2
3 (80J-20C)	20.2	10.2	5.1
4 (60J-20V-20C)	20.2	10.2	5.4
5 (70J-15V-15C)	20.1	10.1	5.5
6 (80J-10V-10C)	20.1	10.1	5.2
7 (60J-20P-20C)	20.2	10.2	5.4
8 (70J-15P-15C)	20.2	10.1	5.5
9(80J-10P-10C)	20.1	10.1	5.1

5.6 Prueba de absorción de agua

La prueba de absorción de agua se llevó a cabo conforme a lo establecido en la Norma Mexicana NMX-C-037-ONNCE-2005 "Industria de la Construcción - Bloques, Ladrillos o Tabiques y Tabicones-Determinación de la Absorción de Agua y Absorción Inicial de Agua".

La prueba realizada fue la de absorción máxima inicial, definida en dicha norma como la cantidad de agua que absorbe un espécimen por una de sus caras bajo determinadas condiciones durante diez minutos de inmersión en agua potable donde ésta lo cubra 5 milímetros, manteniendo el nivel de agua constante en el recipiente y se expresa por un coeficiente de absorción. La figura 5.13 ilustra el proceso.

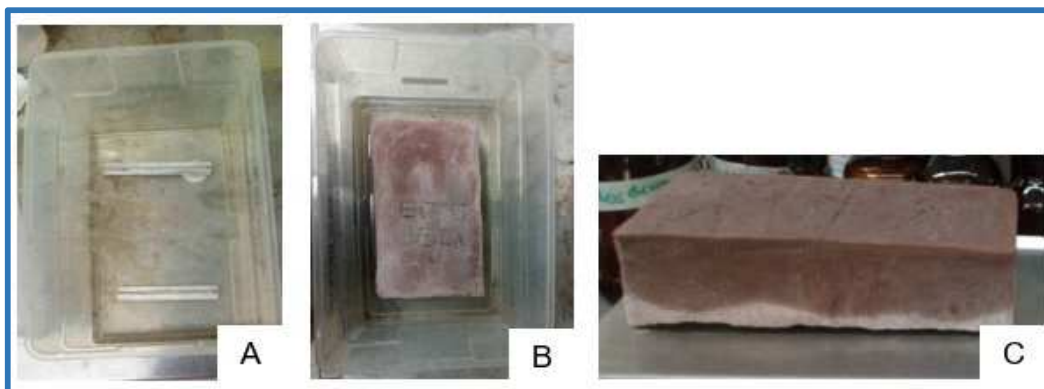


Figura 5.13 Ladrillos durante prueba de absorción de agua

Los resultados de la prueba de absorción inicial se muestran en la figura 5.14.

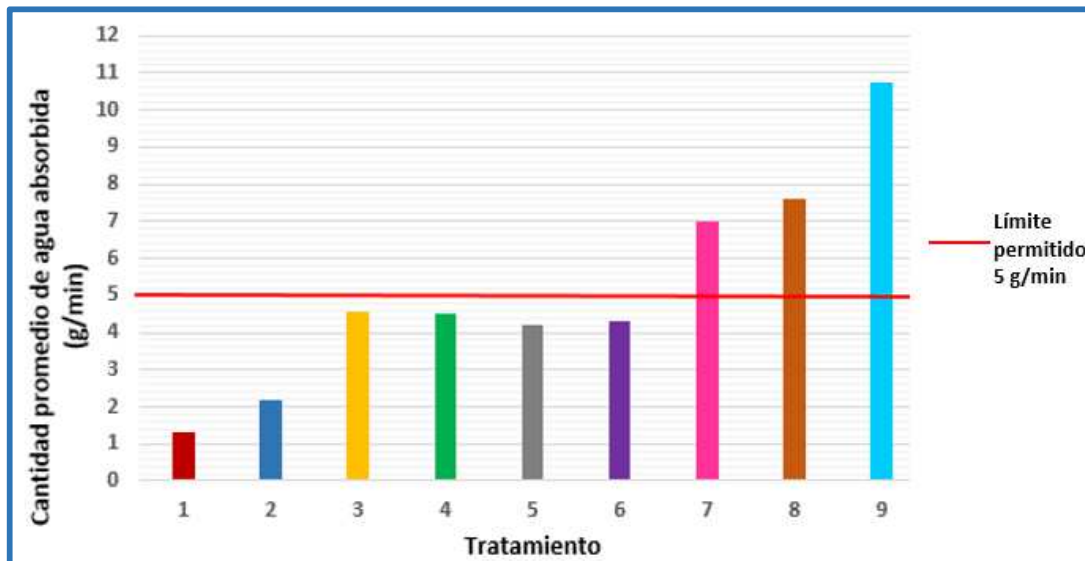


Figura 5.14 Valores de absorción de agua de los tratamientos

Se observa en la figura 5.18 que los ladrillos de los tratamientos 1,2,3,4,5 y 6 están por debajo del valor máximo establecido por la NMX-C-404-ONNCE-2005 que es de 5 g/min de absorción inicial, mientras que los tratamientos restantes (7,8,9) superan este valor, así mismo se puede observar que a medida que disminuye la cantidad de cemento (tratamientos 1, 2 y 3) aumenta la cantidad de agua absorbida, los ladrillos del tratamiento 3 absorben agua de manera similar a los ladrillos de los tratamientos 4, 5 y 6. Con ayuda del Software R se obtuvo el análisis de varianza y prueba de comparaciones múltiples de Tukey para ver los tratamientos que son diferentes entre sí. La anova se muestra a continuación:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	8	200.875	25.1093	43.569	3.19e-10
Residuals	18	10.374	0.5763		

Con un p-value de 3.19e-10 y un nivel de significancia de 5% se rechaza la hipótesis nula, es decir que existe diferencia entre los tratamientos. Para ver la diferencia entre tratamientos con el software R se realizó la prueba de Tukey, los resultados se muestran en la tabla 5.6 (la tabla completa se muestra en el anexo 1).



Tabla 5.6 Comparaciones de absorción de agua entre tratamientos

Tratamiento	Media	Comparación entre tratamiento								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.292		ES	D	D	D	D	D	D	D
2	2.17	ES		D	D	D	D	D	D	D
3	4.2	D	D		ES	ES	ES	D	D	D
4	4.32	D	D	ES		ES	ES	D	D	D
5	4.527	D	D	ES	ES		ES	D	D	D
6	4.542	D	D	ES	ES	ES		D	D	D
7	6.978	D	D	D	D	D	D		ES	D
8	7.623	D	D	D	D	D	D	ES		D
9	10.753	D	D	D	D	D	D	D	D	

*EI=Estadísticamente similares; D=Diferentes entre sí

En la tabla anterior con la media, el p-value (anexo 1) y al realizar el cruce entre tratamientos para compararlos, se observa que 1 y 2 son estadísticamente similares y distintos a todos los demás tratamientos, los tratamientos 3, 4, 5, 6 son similares entre ellos, por último los tratamientos 7 y 8 son similares. Existe diferencia en la absorción de agua cuando se agrega igual o menos del 20 % de cemento en los tratamientos, lo cual se observa el tratamiento 3, sin embargo los tratamientos 4, 5 y 6 son similares al tratamiento 3. Agregar vidrio en los tratamientos tiene un efecto positivo en la absorción de agua ya que estos tratamientos tienen menor cantidad de cemento pero absorben agua de manera similar al tratamiento 3 el cual tiene mayor cantidad de cemento.

Otro factor importante es la presión de moldeado a la que se sometieron los ladrillos, Thormann (1970) asevera que la porosidad de los ladrillos disminuye al aumentar la presión de compactación. En este caso de estudio no se midió la presión de compactación a la que fueron sometidos los ladrillos, se trató que fuera la misma mediante las marcas puestas en la máquina de hacer ladrillos.

El Instituto de Promoción Cerámica (IPC) menciona que una absorción muy alta puede llevar a la deshidratación del mortero, así como una absorción muy baja imposibilita la adherencia mecánica. Así mismo, dicha institución menciona que la absorción está condicionada con la porosidad del material, para el caso de los ladrillos, mientras más grandes sean los poros mayor será la absorción.

Existe diferencia porosidad entre los diversos ladrillos, en los que más se puede apreciar es en los tratamientos que contienen puzolana ya que son los que presentan mayor absorción de agua. Se corrobora lo antes mencionado mediante la observación de eflorescencias en la superficie de estos ladrillos (figura 5.19) con lo cual se deduce que los materiales como vidrio molido y puzolana tienen influencia sobre la estructura porosa del tabique.



Figura 5.15 Ladrillo con eflorescencias

Azkaráte et al. (2006) describen que este fenómeno en materiales cerámicos como los ladrillos dependen de la humedad a la que han estado expuestos y a las sales que pueden contener las materias primas utilizadas para la elaboración de estos. De igual manera los materiales muy porosos facilitan la entrada y arrastre de las sales catalizando su transporte hacia la superficie, por otro lado, Igone et al. (2006) mencionan que el fenómeno es un problema puramente estético.

5.7 Cabeceo de Ladrillos

Para asegurar que los ladrillos fueran lo suficientemente homogéneos en sus caras se cabecearon con base en lo establecido en la norma NMX-036-ONNCCE-2013 “Resistencia a la Compresión de Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones y Adoquines” se utilizó una mezcla 4-1 de yeso con cemento. En la figura 5.16 se presenta dicho proceso.

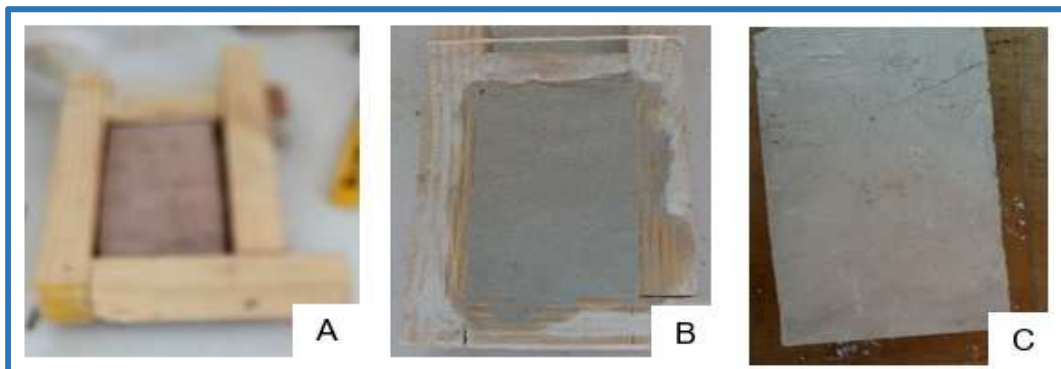


Figura 5.16 A) Molde para cabeceo, B) Ladrillo con pasta para cabecear, C) Ladrillo cabeceado

Después que fueron cabeceados los ladrillos se transportaron al laboratorio de la División de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería en el laboratorio de pruebas mecánicas, utilizando una prensa mecánica Instron, con una capacidad de carga de hasta 15000 kg, en donde fue realizada la prueba de compresión mecánica a 27 ladrillos. En el software del equipo de compresión se registraron las dimensiones de los ladrillos (20 ± 0.5 cm largo, 5.5 ± 0.5 cm de alto y 10 ± 0.5 cm de ancho) y se procedió a la aplicación de la prueba.

La figura 5.17 ilustra algunas etapas antes descritas.

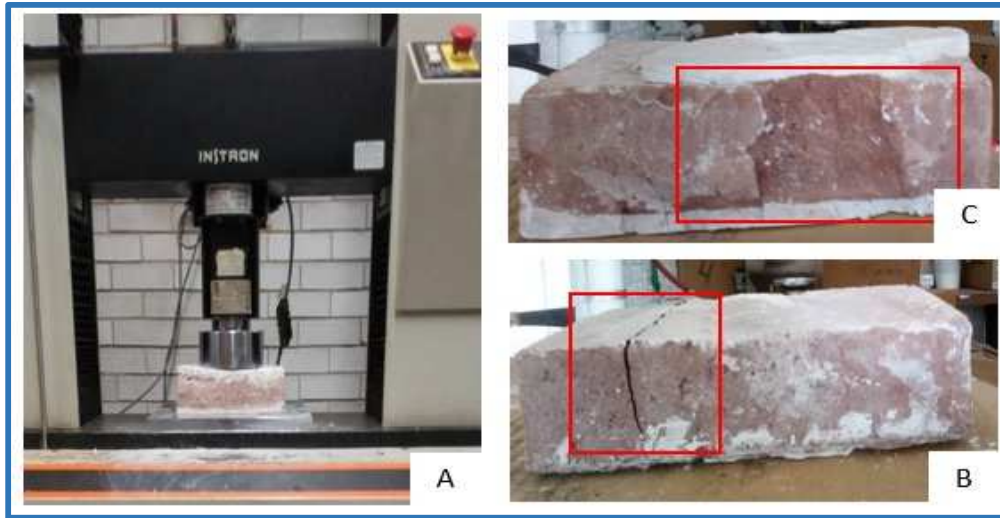


Figura 5.17 A) Ladrillo en prueba de compresión, B), C) Ladrillos después de la prueba de compresión

5.8 Resultados de las pruebas de compresión

Los resultados promedio de las pruebas de compresión para los nueve tratamientos se muestran en la tabla 5.7.

Tabla 5.7 Valores de resistencia a la compresión

Tratamiento	Resistencia promedio (kgf/cm ²)	Tratamiento	Resistencia promedio (kgf/cm ²)	Tratamiento	Resistencia promedio (kgf/cm ²)
1	38.41	4	35.3	7	15.92
2	38.17	5	37.64	8	37.23
3	38.5	6	36.35	9	25.96

En la Figura 5.18 se grafica la resistencia a la compresión de los nueve tratamientos

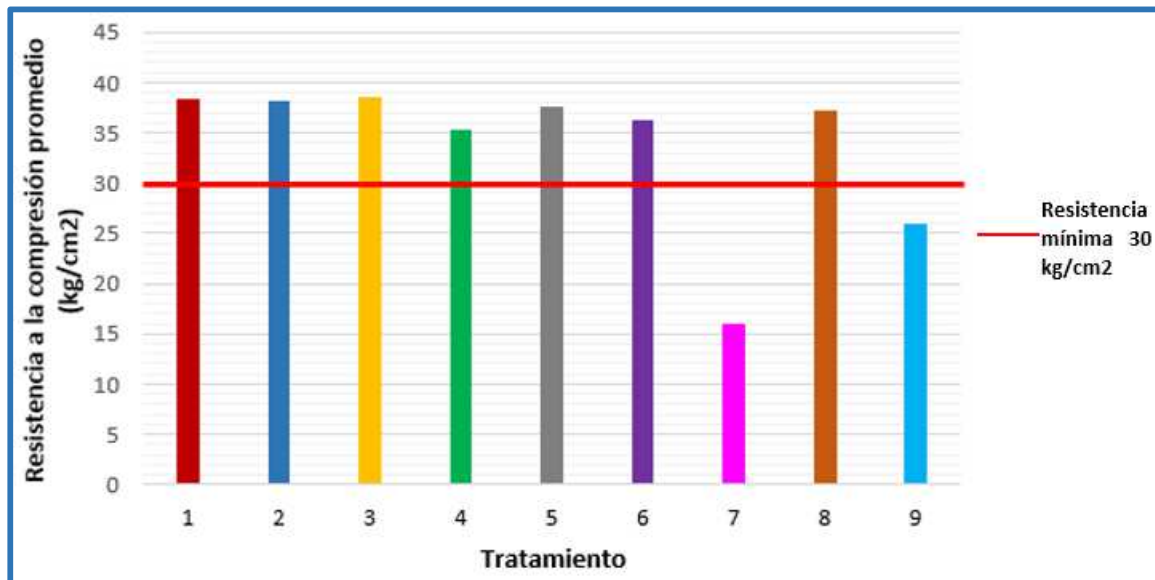


Figura 5.18 Valores promedio de resistencia a la compresión

La figura 5.18 muestra que siete tratamientos (1, 2, 3, 4, 5, 6 y 8) cumplen con la resistencia mínima promedio establecida en la norma NMX-C-441-ONNCE-2005 el cual es 30 kgf/cm², el bajo valor promedio de compresión del tratamiento siete se debe a que la prueba de compresión se realizó a dos ladrillos sin cabecear, a esto se le añade que presentaban irregularidad en sus caras debido al proceso de fabricación y una vez bajo la prensa estos se rompieron rápidamente.

El ladrillo de este tratamiento que fue cabeceado registró un valor de compresión de 43.97 kgf/cm², se esperaría que si los otros dos ladrillos se hubiesen cabeceado registrarían un valor similar a éste y por lo tanto este tratamiento cumpliría con el valor promedio de resistencia a la compresión mínima establecida por la norma antes mencionada.

González (2012) describe un aumento en la porosidad al añadir 10% en masa de vidrio a una mezcla para hacer ladrillos, por otro lado Quintero (2011) en un estudio de materiales cerámicos como el concreto relaciona el aumento en la porosidad con una disminución en la resistencia a la compresión. Sin embargo, tres tratamientos que contienen vidrio molido cumplen con el valor de resistencia a la compresión individual establecido por la norma NMX-C-441-ONNCE-2005 que es de 20 kgf/cm².

Toniolo & Boccaccini así como Bagheri et al., en 2017 investigaron el uso de residuos de vidrio que contiene borosilicatos como reemplazo de aluminosilicatos llegando a la conclusión de que el vidrio es una buena opción para la síntesis de geopolímeros además de ser un proceso amigable con el ambiente. Por otro lado los resultados obtenidos por estos investigadores muestran que la resistencia a la



compresión de un geopolímero elaborado con borosilicatos es mayor a la de un geopolímero elaborado con aluminosilicatos, lo cual concuerda primeramente en que los tratamientos que contienen vidrio tienen una resistencia similar a los tratamientos que contiene solo cemento y segundo los tratamientos que contiene vidrio molido presentan una resistencia a la compresión ligeramente más alta que en los tratamientos en donde se usó puzolana, los cuales pueden considerarse como un geopolímero a base de aluminosilicatos. Es importante mencionar que el material volcánico y el vidrio molido se usaron con granulometrías distintas lo que afecta en los valores de resistencia a la compresión.

En cuanto puzolanas como la ceniza volcánica Hossain & Lachemi en 2004 reportaron el uso de ésta en proporciones del 0 al 40% para la elaboración de concreto, en los cuales se observó un incremento en la resistencia a la compresión, lo cual se atribuye a su contenido de sílice. En este caso de estudio el tratamiento 9 que contiene 10 % de puzolana no cumple con la resistencia a la compresión mínima promedio lo cual puede deberse a que en este tratamiento se presenta una mayor porosidad, lo anterior se puede observar en los altos valores de absorción (figura 5.14) registrados por los tres ladrillos de este tratamiento.

Risdareni et al., (2015), Yankwa et al., (2016) utilizaron ceniza volcánica como base de un geopolímero el cual funcionaría como reemplazo, encontrando que la ceniza volcánica aumenta la resistencia a la compresión después de un curado de 28 días, la cual a su vez aumenta cuando se aumenta el tiempo y temperatura de curado, los datos obtenidos del primer ladrillo del tratamiento 7 y los del tratamiento 8 concuerdan con los reportados por los autores ya que se cumplen con los valores de resistencia a la compresión mínima establecida en la norma antes mencionada.

Autores como Tchakoute et al., (2012) agregan alumnina a la ceniza volcánica para mejorar sus propiedades mecánicas. Por otro lado Yankwa et al., (2016) sugieren una activación mecánica de la ceniza volcánica mediante una molienda de la misma. En los tratamientos 7, 8 y 9 no se activo la ceniza de ninguna forma sin embargo se cumple con la resistencia mínima para ladrillos de uso no estructural como los desarrollados en este trabajo.

Los resultados de resistencia a la compresión obtenidos por los autores antes mencionados están dentro del rango de los mega pascales y en el caso de los tratamientos aplicados a los jales los valores están dentro del rango de los kilopascales lo cual indica que una activación con NaOH o KOH así como la activación de la puzolana tienen un gran impacto en la resistencia a la compresión y juega un papel importante en la obtención del geopolímero.

5.9 Prueba de intemperismo acelerado

A los 27 ladrillos restantes les fue aplicada la prueba de intemperismo acelerado, realizada en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica de Materiales (UDIATEM) en el laboratorio de corrosión del departamento de mecánica de la Facultad de Ingeniería. La prueba está basada en la norma ASTM G151 para determinar el envejecimiento de especímenes mediante variaciones de humedad y temperatura.

En la cámara se simularon humedad y temperatura similares a las de la ciudad de Durango con un ciclo de 12 minutos equivalentes a un día, los ciclos se repitieron hasta completar 1 año de envejecimiento. En la figura 5.19 se observa el equipo utilizado así como los ladrillos antes de la prueba.

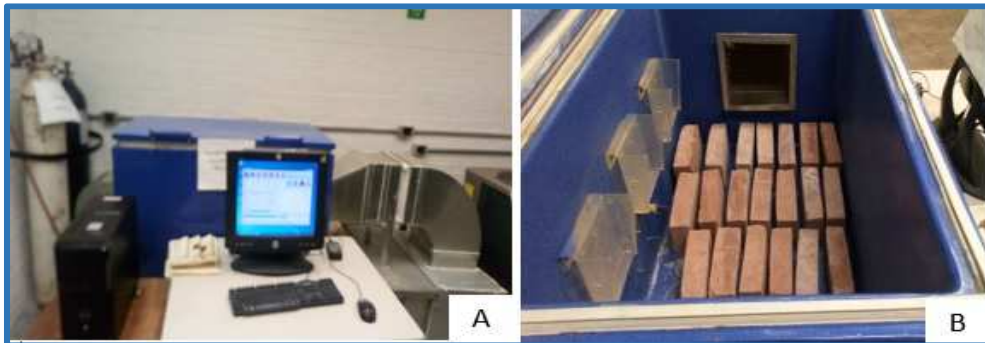


Figura 5.19 A) Equipo utilizado para la prueba, B) ladrillos dentro de la cámara

Después de la prueba de intemperismo acelerado los ladrillos se cabecearon y llevaron nuevamente a la prueba de resistencia a la compresión, con el equipo y procedimiento descrito. Los resultados de resistencia a la compresión se observan en la tabla 5.8.

Tabla 5.8 Valores de resistencia a la compresión después de la prueba de intemperismo acelerado

Tratamiento	Resistencia promedio (kgf/cm ²)	Tratamiento	Resistencia promedio (kgf/cm ²)	Tratamiento	Resistencia promedio (kgf/cm ²)
1	37.29	4	37.6	7	35.34
2	37.86	5	38.27	8	36.64
3	37.25	6	34.35	9	35.03

En la figura 5.20 se observa la comparación de la prueba de compresión aplicada a los ladrillos antes y después de la prueba intemperismo acelerado.

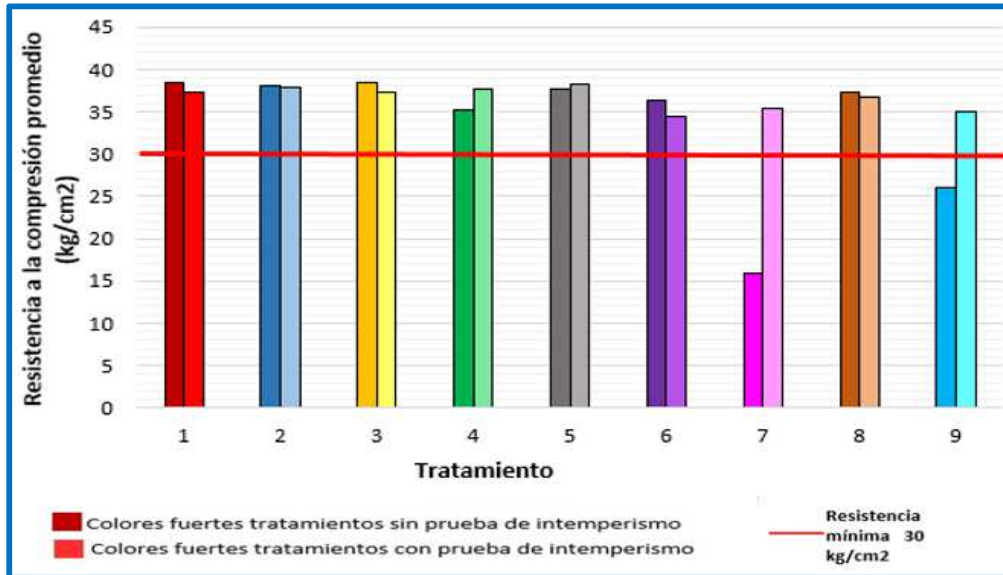


Figura 5.20 Valores de resistencia a la compresión de los tratamientos con y sin intemperismo acelerado

Para saber si influyó el intemperismo acelerado en la resistencia de los tratamientos se utilizó el software R. En este análisis estadístico se descartó el tratamiento 7 ya que en dos ladrillos del tratamiento 7 que no fue sometido a la prueba antes mencionada por motivos de geometría registraron una resistencia a la compresión muy baja por lo cual al momento de hacer el análisis estadístico existe una varianza grande entre tratamientos que no permite discernir correctamente que tratamientos son similares o distintos entre sí.

$$\text{Modelo estadístico: } y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

La anova muestra lo siguiente:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Cámara	1	7.712	7.712	1.2146	0.2786498
Tratamiento	7	277.040	39.577	6.2330	0.0001185 ***
Cámara:Tratamiento	7	136.299	19.471	3.0665	0.0137747 *
Residuals	32	203.188	6.350		

Con un valor de p-value de 0.0137 y un nivel de significancia del 5% se rechaza la hipótesis nula: $H_{01} : \tau\beta_{ij} = 0$, es decir, existe interacción significativa entre los factores cámara-tratamiento por lo cual puede decirse que influye en la resistencia a la compresión de los tratamientos el intemperismo acelerado.



La tabla 5.9, de comparaciones (prueba de Tukey) entre tratamientos se muestra a continuación.

Tabla 5.9 Comparaciones entre cámara de intemperismo y tratamientos

Comparaciones Cámara: Tratamiento			
Comp.	P-value	Comp.	P-value
0:1-1:1	0.99	0:5-1:5	1
0:2-1:2	1	0:6-1:6	0.999
0:3-1:3	0.999	0:8-1:8	0.999
0:4-1:4	0.998	0:9-1:9	0.0087

En la tabla 5.9, las comparaciones se interpretan de la siguiente manera, 0:1 significa el tratamiento 1 sin someter al envejecimiento artificial en la cámara de intemperismo mientras que 1:1 indica que el tratamiento 1 fue sometido a la prueba antes mencionada. Las demás comparaciones se interpretan de la forma antes descrita. La tabla de todas las comparaciones se muestran en el anexo 1.

Tomando en cuenta los valores del p-value se asevera que solo hubo efecto de la cámara de intemperismo acelerado en el tratamiento 9, ya que en éste se registró un aumento a la resistencia a la compresión después de la prueba. Para los tratamientos restantes (1, 2, 3, 4, 6 y 8) se concluye que la prueba de intemperismo no afecta la resistencia a la compresión y por lo tanto sus resistencias a la compresión son estadísticamente iguales si se someten o no a la cámara descrita.

Cabe mencionar que en la figura 5.20 así como en la tabla 5.9, los tratamientos 1 al 8 (excepto el 7) son estadísticamente iguales, es decir, su resistencia a la compresión es igual, el único tratamiento distinto es el 9. González (2016) y Gutiérrez (2018) reportaron resultados similares en monolitos fabricados a base de jales de dos minas distintas, cemento, zeolita y otros agregados, destacando que el intemperismo lejos de disminuir la resistencia a la compresión en algunos casos la mejora.

5.10 Extracto PECT de los tratamientos

Para obtener el extracto PECT de los tratamientos se seleccionó una porción que tuviera granulometría de 9.5 mm (procedimiento EPA 1311). Posteriormente fue aplicado el procedimiento de extracción 9.3 establecido en la NOM-141-SEMARNAT-2003. Los extractos obtenidos se leyeron de la misma manera y con los mismos equipos reportados en el inciso 5.5.

Respecto al cromo el límite de detección utilizado fue de 2 mg/L, todas las muestras estuvieron por debajo de este valor cumpliendo con el LMP establecido en NOM-157- SEMARNAT-2009 que es de 5 mg/L. En cuanto al antimonio se muestran los resultados en la tabla 5.10.



Tabla 5.10 Concentraciones de antimonio y cromo en el extracto PECT

Trat.	Cr mg/ml	Sb mg/ml	Trat.	Cr mg/ml	Sb mg/ml	Trat.	Cr mg/ml	Sb mg/ml
1	< 2	0.486	4	< 2	0.539	7	< 2	1.066
2	< 2	0.534	5	< 2	0.606	8	< 2	1.429
3	< 2	0.593	6	< 2	0.3934	9	< 2	1.3406

En la figura 5.25 se muestran las concentraciones promedio de antimonio en los lixiviados en cada tratamiento.

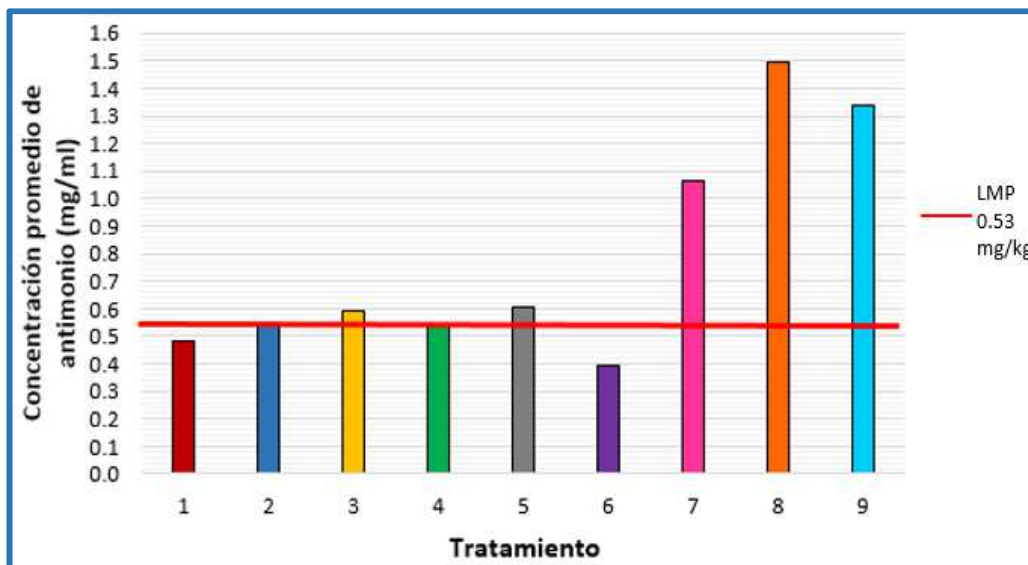


Figura 5.21 Concentración de antimonio en los lixiviados

Con el fin de saber si existe diferencia entre tratamientos se utilizó el software R para obtener el análisis de varianza, la cual se muestra a continuación.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	8	3.9670	0.49587	12.132	7.841e-06
Residuals	18	0.7357	0.04087		

Con un p-value de 7.841e-06 y un nivel de significancia del 5% se rechaza la hipótesis nula, es decir, existe diferencia entre tratamientos al momento de encapsular antimonio. Para conocer qué tratamientos son diferentes, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey. A continuación se muestran las comparaciones, en la tabla 5.11 solo aparecen los tratamientos comparados y el p-value, los datos de la comparación completos se muestran el anexo 1.



Tabla 5.11 Comparaciones de encapsulación entre tratamientos

Tratamiento	Media	Comparación entre tratamiento								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	0.393	D	D	D	D	D	D	ES		ES
4	0.539	ES	ES	ES		ES	ES	ES	D	D
3	0.593	ES	ES		ES	ES	EI	ES	D	D
5	0.605	ES	ES	ES	ES		ES	ES	D	D
1	0.6492		ES	ES	EI	ES	EI	D	D	D
2	0.734	ES		ES	ES	ES	ES	D	D	D
7	0.941	D	D	ES	ES	ES	D		ES	ES
9	1.244	D	D	D	D	D	D	ES	ES	
6	1.492	ES	ES	ES	ES	ES		D	D	D

*EI=Estadísticamente similares; D=Diferentes entre sí

La tabla anterior muestra que los tratamientos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 son estadísticamente similares entre sí y diferentes a los tratamientos 7, 8 y 9, los cuales a su vez son similares entre sí. Lo anterior puede observarse en la figura 5.21 en donde se observa que los últimos tratamientos (7, 8 y 9) superan por más del doble el LMP de antimonio en el lixiviado. Es de resaltar que algunos factores como la relación Si:Al y pH no se controlaron durante la experimentación por lo cual el análisis estadístico no refleje completamente la similitud entre tratamientos además de que esto genere una varianza grande entre tratamientos.

Los valores de concentraciones del antimonio en el extracto PECT en los primeros 6 tratamientos se encuentran ligeramente por arriba del LMP (0.53 mg/L) establecido en la NOM-157- SEMARNAT-2009, sin embargo en todos los tratamientos las concentraciones de antimonio en el extracto son menores al valor de este mismo metal presente en el lixiviado de los jales sin tratamiento (2.1 mg/ml) lo cual indica que se ha logrado inmovilizar al antimonio mediante los tratamientos aplicados a los jales.

Es de mencionar que los tratamientos en los cuales se agregó cemento y vidrio molido presentan una encapsulación similar, lo que demuestra que es posible sustituir una parte del cemento por vidrio molido sin perder propiedades como resistencia a la compresión y encapsulación de metales pesados. Sin embargo para tener mayor certeza sobre la encapsulación se necesitan más repeticiones por tratamiento.

González (2012), González (2016) y Gutiérrez (2018) estudiaron la inmovilización de metales pesados en jales provenientes de Parral, Chihuahua y Zimapán, Hidalgo utilizando cemento y otros agregados, encontrando que el contenido de metales pesados en los lixiviados después de aplicado un tratamiento con cemento a los jales se encontraba por debajo de los LMP establecidos en la legislación mexicana.



Los datos reportados por los autores mencionados concuerdan con los obtenidos en esta tesis, ya que se logra obtener concentraciones bajas de metales pesados en los lixiviados de los tratamientos con cemento en comparación a los lixiviados de los jales que no recibieron tratamiento con cemento.

En los tratamientos 4, 5, 6, 7, 8 y 9, donde se usó vidrio molido y puzolana la encapsulación es posible atribuirla a una reacción de geopolimerización. No se utilizó NaOH o KOH para generar un medio muy básico y así comenzar la activación del aluminio y boro presente en el vidrio molido y lapilli, en su lugar se aprovechó el pH de los jales en disolución acuosa, en donde el agua utilizada después del curado presentó un valor de pH entre 11 y 12.

De acuerdo con los datos anteriores se puede aseverar que los tratamientos 4, 5 y 6 reducen en un 74.3%, 71.2% y 81.3%, respectivamente, la cantidad de antimonio en el lixiviado, mientras que los tratamientos 7, 8 y 9 reducen el 48.2%, 28.9% y 36.2%, respectivamente, la cantidad de antimonio en el lixiviado. Lo anterior es tomando en cuenta que la cantidad de antimonio presente en el lixiviado de los jales sin tratamiento es de 2.1 mg/ml.

Panait et al., en 2012, utilizaron ceniza volante y residuos de vidrio proveniente de tubos de rayos catódicos para elaborar un geopolímero y encapsular al plomo presente en los tubos de rayos catódicos, logrando lo anterior de manera exitosa. Por otro lado, Robayo & Mejía en 2015 reportan la encapsulación de Cr, Ba, S, Sr, y Zn mediante la mezcla de ceniza volcánica y escorias activadas con NaOH, en los lixiviados se encontró que los metales mencionados se encontraban por debajo de los LMP establecidos por la EPA.

Xu et al., en 2006 estudiaron la capacidad de los geopolímeros para encapsular metales pesados, llegando a la conclusión de que uno de los factores determinantes para obtener una buena encapsulación es la concentración de la solución activadora. Los tratamientos que contienen vidrio molido así como ceniza volcánica no fueron activados mediante una solución alcalina sino por el medio básico que crearon los jales al ser hidratados, es de esperarse que una activación previa del vidrio molido así como de la ceniza volcánica disminuyera la concentración de antimonio en los lixiviados.



Capítulo 6. Análisis de riesgo

El programa de desarrollo urbano de Durango 2020, en el punto 1.3.12, referente a medio ambiente menciona a empresas que generan contaminantes en las diferentes etapas de sus procesos, entre las empresas se encuentra la mina Cerro de Mercado, de esta el plan de desarrollo antes mencionado describe lo siguiente: Contamina las zonas con la emisión de polvo rojizo producto de la explotación del mineral de hierro, el cual por efecto del viento y las tolvaneras cae sobre las viviendas localizadas en las colonias aledañas, ocasionando problemas de salud. Lo anterior se corroboró durante la visita a las zonas aledañas de la mina, el polvo rojo se observaba en las calles así como en los automóviles estacionados.

Aplicando lo estipulado por el CENAPRED en el punto 2.8 a los jales de la presa Boleo Estrella, se obtiene lo siguiente:

- Criterio de peligro número 1, proceso. En la mina Cerro de Mercado se utiliza el proceso de flotación para la obtención del hierro, por lo cual con base en la tabla 2.5, a este proceso le corresponde un criterio de peligro de 3.
- Criterio de peligro número 2, producción al día del metal. El Servicio Geológico Mexicano (2017) reporta una producción de 1200 toneladas por día en la mina Cerro de Mercado, por lo que a este criterio corresponde un valor de 3 (tabla 2.6).
- Criterio de peligro número 3, estatus de la planta. Al estar activa la mina mencionada le corresponde un criterio de peligro de 3 (tabla 2.7).

La suma de los niveles de peligro es de 9 por lo tanto el nivel final de peligrosidad de los jales de la mina Cerro de Mercado es alto (tabla 2.8). Sin embargo, como lo menciona el CENAPRED, este valor es solo una aproximación subjetiva del peligro que representan los jales debido a sus características intrínsecas. En consecuencia, se calculó el riesgo asociado a los jales, para saber la probabilidad de que la población sufra problemas a la salud debido a su exposición a este tipo de residuo.

Con base en la información de los trabajadores de la mina Cerro de Mercado, muchas viviendas de los alrededores de la mina están construidas sobre presas de jales, por lo cual, las personas que habitan dichas viviendas se encuentran en contacto directo con jales. Los jales superan los LMP base seca establecidos en la NOM-157-SEMARNAT-2009, por lo que, con base en la norma mencionada son considerados peligrosos.



Para saber el riesgo al que está expuesta la población aledaña a la mina Cerro de Mercado, se utilizó el software SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance) tomando en cuenta un escenario recreativo. En este se aborda la exposición a niños y adultos que pasan una cantidad limitada de tiempo en o cerca del sitio mientras realizan actividades al aire libre. El escenario de uso recreativo también se conoce como el escenario de intruso o visitante del sitio. Se consideró que de los cinco escenarios éste es el más apropiado para realizar los cálculos de riesgo debido a que la presa de jales Boleo Estrella está cercana a la población y al ser una presa antigua los jales presentes en ésta se encuentran secos, por lo cual se dispersan fácilmente por acción del aire a la población aledaña.

El software SADA calcula PRG (Preliminary Remediation Goals), estas, son las concentraciones superiores de una determinada sustancia en un medio específico, en este caso en suelo, los cuales garantizan la protección de la salud y el ecosistema. Estos valores corresponden a efectos mínimos y admisibles en individuos que causarían efectos mínimos en el resto de la población o comunidad.

Los datos alimentados al software fueron las concentraciones de metales como: antimonio, arsénico, bario, cromo (III), estroncio, manganeso, níquel, vanadio y zinc obtenidos mediante la técnica de fluorescencia de rayos x, además que estos fueron las sustancias con los que contaba la base de datos SADA. En el caso del cromo III, se restó al valor de cromo total obtenido mediante fluorescencia de rayos x, el valor de cromo (VI) obtenido mediante la NOM-147-SEMARNAT/ SSA1-2004 (Tabla 5.3).

Los parámetros de exposición del escenario seleccionado utilizados por SADA, como tiempos de exposición para niño y adulto, tiempo de vida, etc. se muestran en la figura 6.1. Se utilizó un tiempo de vida de 74 años (INEGI, 2016).

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

General	Adult	Child	kg	Mass loading factors	Residential	Agricultural	unitless
Body weight	70	15		Plant MLF	0.26	0.26	
Lifetime	74	years		Pasture MLF	0.26	0.26	

Figura 6.1 Parámetros de exposición para el escenario seleccionado



Para los cálculos se seleccionaron las siguientes vías: ingestión, Inhalación y dérmica, lo anterior se observa en la figura 6.2



Figura 6.2 Vías y escenario utilizados en SADA

Para realizar los cálculos se seleccionó un índice de peligro HI de 1 (figura 6.3). Debido a que la mayoría de los elementos presentes en los jales son no carcinógenos (EPA, 2017). Un HI menor o igual a uno indica que no es probable experimentar efectos adversos a la salud por la exposición a una determinada sustancia química por todas las vías (inhalación, ingestión y dérmica) en un medio dado (agua, suelo, aire, etc.), por lo cual el riesgo es despreciable.

El HI es utilizado para referir el nivel de riesgo asociado a los efectos de sustancias no carcinógenas (EPA, 2017). Así mismo, el HI es la suma de cocientes de peligro (HQ), un HQ es la relación entre la exposición potencial a una sustancia y el nivel en el que esperan efectos adversos, calculada como la concentración de exposición entre una concentración de referencia. SADA utiliza el HI en vez del HQ debido a que el HI es para una o más sustancias en múltiples vías de exposición, mientras que el HQ es para una sustancia en una sola vía de exposición (EPA, 2017). Para el caso de arsénico que es carcinógeno se usó un objetivo de riesgo de $1E-6$.

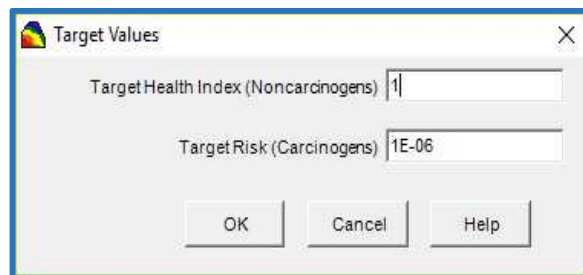


Figura 6.3 Valores objetivos seleccionados



Los resultados de los cálculos hechos por SADA se muestran en la tabla 6.1

Tabla 6.1 Cálculos realizados por el software SADA

		PRG (mg/kg); (THI=1)				CRT (mg/kg)
		Ingestión	Dérmica	Inhalación	THI	
Nombre	No. CAS	Adulto	Adulto	Adulto	Adulto	Adulto
Antimonio	7440360	0.0044	0.012	9.3E-7	0.0164	470
Arsénico	7440382	0.035	0.0045	-	0.0395	22
Bario	7440393	0.0015	0.0011	0.00011	0.00271	67000
Cromo III	16065831	1.2E-5	0.00013	1.9E-6	0.000144	1.8E+06
Estroncio	7440246	3.9E-5	1E-5	-	4.9E-5	7E+05
Manganeso	7439965	0.0033	0.0044	0.0016	0.0093	2.6E+04
Níquel	7440020	0.0011	0.00022	0.00013	0.00145	1600
Vanadio	7440622	0.0056	0.03	2.6E-5	0.0356	78
Zinc	7440666	3.2E-5	1E-5	-	0.00042	3.5E+05

Para saber si existe un riesgo a la población adulta aledaña a la presa de jales Boleo Estrella se comparan los valores de las columnas THI y la columna CRT. Los datos de la columna THI así como las de ingestión, dérmica e inhalación fueron los valores calculados por SADA, mientras que los valores de la columna CRT fueron obtenidos para el caso del arsénico, bario, níquel y vanadio de la NOM-157-SEMARNAT/SSA1-2004.

Las concentraciones anteriores son definidas en la norma mencionada como masa del elemento químico regulado expresado en mg, por unidad de masa del suelo de estudio expresada en kg, por encima de la cual se considera que existe riesgo de que se generen efectos adversos a la salud. Las concentraciones de los elementos restantes (antimonio, cromo III, manganeso, níquel y vanadio) fueron obtenidas de la EPA (2018).

En la tabla 6.1, las concentraciones en la columna THI son menores a los de la de columna CRT, lo cual indica que la probabilidad de que las personas adultas sufran afecciones a la salud es muy poca, razón por la cual, el riesgo puede considerarse despreciable (EPA, 1986) (Fowle & Dearfield, 2000). Los valores de HI individuales para cada vía de exposición (ingestión, inhalación y dérmica) son menores a 1 en todos los casos, lo que indica que es muy poco probable observar afecciones a la salud de las personas debido a la exposición a jales por cualquiera de las vías de exposición mencionadas.

En el caso de los niños, se muestran los resultados obtenidos mediante el software y las concentraciones de referencia totales en la tabla 6.2



Tabla 6.2 Determinación de riesgo por exposición a jales para niños

Nombre	No. CAS	PRG (mg/kg); (THQ=1)	CRT (mg/kg)
		Ingestión	
Antimonio	7440360	0.041	32
Arsénico	7440382	0.33	39
Bario	7440393	0.014	16000
Cromo III	16065831	0.00011	1.2E+05
Estroncio	7440246	0.00037	47000
Manganeso	7439965	0.031	1900
Níquel	7440020	0.01	1600
Vanadio	7440622	0.052	390
Zinc	7440666	0.00037	23000

En la tabla 6.2 se observa solo una vía de exposición, ya que SADA no cuenta con la información suficiente para calcular las vías faltantes. Comparando el valor de concentración en la vía de ingestión con los valores de la columna CRT (EPA, 2016) (EPA, 2018) se observa que todos los valores están por debajo de las CRT, por lo que, la probabilidad de que los niños cercanos a la presa de jales Boleo Estrella sufran problemas a la salud es baja, por lo que el riesgo se puede considerar despreciable.

El arsénico es identificado en la base de datos del software como una sustancia que puede causar efectos carcinógenos y no carcinógenos, los cálculos para los efectos carcinógenos se seleccionó un nivel de riesgo de $1E-6$, establecido por la EPA (figura 5.28). Los resultados se muestran en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Cálculos para efectos carcinogénicos por arsénico y concentración de referencia

Nombre	No. CAS	PRG(mg/kg); ($Tr=1E-6$)				CRT (mg/kg)
		Ingestión	Dérmica	Inhalación	TI	
Arsénico	7440382	1.7E-5	8.2E-7	9.7E-9	1.8E-5	0.68

La tabla 6.3 muestra que el valor de concentración de TI es inferior al de CRT, de acuerdo con esto, la población aledaña a la presa de jales no desarrollaría algún tipo de cáncer relacionado a la exposición de arsénico. Lo anterior es una aproximación del riesgo al que la población puede estar expuesto, sin embargo, para que el análisis fuera más certero, se necesitaría conocer el verdadero tiempo de exposición de la población a los jales de la presa en estudio.

Si bien, hay evidencia de que las personas están en contacto prolongado con los jales de la mina Cerro de Mercado, es difícil saber a qué cantidad de jales provenientes de la presa de jales Boleo Estrella están expuestos en realidad, debido a que hay más presas en la mina.



Para tener una panorámica del riesgo en un escenario de exposición prolongada a los jales se hizo el cálculo de con SADA para un escenario diferente, en este caso un escenario residencial. En este tipo de escenario la exposición se calcula para toda la vida y generalmente resulta en las exposiciones y riesgos potenciales más altos. En este nuevo escenario se asume que la población solo está en contacto con jales de la presa Boleo Estrella ya que no se tiene información sobre la caracterización de las otras presas.

Para los cálculos en el software, se usaron los parámetros del escenario residencial (figura 6.1), así mismo, se usaron los mismos objetivos de riesgo mostrados en la figura 6.3. Los resultados obtenidos por SADA para el escenario residencial se muestran en la tabla 6.4.

Tabla 6.4 Cálculos de riesgo para escenario residencial

		PRG (mg/kg) (THI=1)				CRT (mg/kg)
		Ingestión	Dérmica	Inhalación	THI	
Nombre	No. CAS	Adulto				Adulto
Antimonio	7440360	0.038	0.01	8.1E-6	0.048	31
Arsénico	7440382	0.31	0.039	-	0.349	22
Bario	7440393	0.013	0.0098	0.00096	0.024	67000
Cromo III	16065831	0.00011	0.0011	-	0.00121	1.8E+06
Estroncio	7440246	0.00034	9.1E-5	-	0.000431	47000
Manganeso	7439965	0.029	0.0044	0.014	0.0474	1800
Níquel	7440020	0.0097	0.0019	0.0011	0.0127	1600
Vanadio	7440622	0.049	0.26	0.00023	0.309	78
Zinc	7440666	0.00028	7.4E-5	-	0.000354	23000

En la tabla anterior se observa que efectivamente las concentraciones cada vía de exposición es mayor que los reportados en la tabla 6.1 y es debido precisamente al mayor tiempo de exposición manejado en este escenario que es de 350 días, en comparación el recreacional que es de 40 días.

En la tabla 6.4, se observa que todas las concentraciones de la columna THI son menores a las CRT, con lo cual se asevera que es poco probable que la población adulta aledaña al sitio de estudio experimente efectos adversos a la salud inclusive estando expuestos de por vida a los jales. Para el caso de los niños los resultados se muestran en la tabla 6.5.



Tabla 6.5 Cálculos de riesgo para exposición a jales en niños en escenario residencial

		PRG (mg/kg); (THQ=1)		CRT (mg/kg)
Nombre	No. CAS	Ingestión		
Antimonio	7440360	0.36		32
Arsénico	7440382	2.8		39
Bario	7440393	0.12		16000
Cromo III	16065831	0.00099		1.2E+05
Estroncio	7440246	0.0032		47000
Manganeso	7439965	0.27		1900
Níquel	7440020	0.091		1600
Vanadio	7440622	0.46		390
Zinc	7440666	0.0026		23000

La tabla anterior muestra que para un tiempo de exposición prolongado como es el escenario residencial no se espera observar efectos adversos en la salud, debido a que los valores de concentraciones de ingestión son menores a los valores de CRT. Con base en lo anterior se puede aseverar que el riesgo de los niños a sufrir problemas en su salud puede considerarse despreciable. En el caso de los efectos carcinógenos del arsénico los resultados se muestran en la tabla 6.6.

Tabla 6.6 Cálculos de riesgo a la población por exposición a arsénico en escenario residencial

		PRG (mg(kg); (TR=1E-6)				CRT (mg/kg)
Nombre	No. CAS	Ingestión	Dérmica	Inhalación	TI	
Arsénico	7440382	1.5E-4	7.2E-6	8.5E-8	1.6E-4	0.68

Al igual que en la tabla 6.3, la tabla 6.6 muestra que el valor de la concentración TI es menor al de la CRT, con base a esto, el riesgo de que la población desarrolle algún tipo de cáncer debido al arsénico presente en los jales puede despreciarse, aun cuando el tiempo de exposición es mayor.



Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Después de realizar este trabajo la hipótesis de que la solidificación/estabilización permite el encapsulamiento se acepta. La hipótesis que establece lo siguiente: los jales de la presa Boleo Estrella, debido a su contenido de EPT pueden ser potencialmente riesgosos para el ecosistema se rechaza.

Inicialmente se consultó la legislación nacional y el estado del arte sobre el manejo, tratamiento y disposición de residuos mineros en medios electrónicos, encontrando que la peligrosidad de estos depende del proceso de extracción del mineral, así como de diversos factores ambientales. La legislación nacional e internacional menciona pruebas de laboratorio para evaluar el posible impacto de los residuos mineros al ambiente y a las personas. En tanto se constató que las técnicas de solidificación/estabilización son una buena opción para el tratamiento, disposición y recientemente reutilización de jales viejos.

De los resultados obtenidos sobre la composición química de la presa de jales Boleo Estrella se obtuvo que:

- El cromo y antimonio sobrepasaron los límites máximos permisibles en la NOM-157-SEMARNAT-2009 por lo cual pueden representar un riesgo a la salud y el ambiente.
- El pH de las 27 muestras de jales, presentaron valores superiores a 8.
- Los resultados de la prueba de potencial de neutralización y potencial de acidez (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) comprueba que los jales analizados no son generadores de drenaje ácido y por lo tanto la lixiviación de metales pesados hacia mantos acuíferos no es posible, lo anterior se atribuye a que los jales de la presa Boleo Estrella poseen la suficiente cantidad de carbonatos para neutralizar la acidez provocada por la oxidación de sulfuros.

Del efecto de los aditivos utilizados en la técnica de solidificación/estabilización se puede mencionar lo siguiente:

- Cualquiera de los primeros seis tratamientos puede ser empleado para encapsular antimonio.
- En cuanto a la resistencia a la compresión, de los tratamientos que no fueron sometidos a la prueba de intemperismo, solo el tratamiento 9 cumplió con el valor a la resistencia mínima a la compresión (30 kgf/cm²) establecida en la NMX-C-404-ONNCE-2005, por lo cual, los demás ladrillos pueden ser usados como ladrillos de uso no estructural (paredes, bardas etc).



- Los tratamientos que fueron sometidos a la prueba de intemperismo acelerado también cumplieron con el valor de resistencia antes mencionado, resaltando que el tratamiento 9 después de la prueba cumplió con el valor de resistencia mínima.
- La prueba de intemperismo acelerado muestra que hay una relación entre la resistencia a la compresión y la prueba de intemperismo, la cual incrementa levemente la resistencia a la compresión.
- En concordancia con lo anterior el método de solidificación/estabilización más adecuado para el tratamiento de jales puede ser cualquiera de los primeros seis tratamientos ya que fueron los que con base en los diseños estadísticos son los que absorben agua y encapsulan contaminantes de manera similar así como superan los valores de resistencia a la compresión promedio.

Los análisis químicos de los jales de la presa Boleo Estrella muestran que contienen cromo y antimonio en concentraciones que superan los LMP establecidos en la NOM-157-SEMARNAT-2009. La determinación del estado de oxidación del cromo muestra que éste se encuentra en su estado menos tóxico (Cr^{3+}).

De acuerdo con los cálculos del software, los EPT presentes en los jales se encuentran por debajo de las concentraciones establecidas en la normatividad mexicana (470 mg/kg para antimonio, 1.8×10^6 mg/kg para Cr^{3+} en un escenario recreacional y 31 mg/kg para Sb, 1.8×10^6 mg/kg Cr^{3+} en un escenario residencial), sobre las cuales se esperaría observar efectos adversos a la salud. Lo antes mencionado se realizó simulando dos escenarios con distintos tiempos de exposición y en ambos se encontró que los jales aparentemente no representan un peligro, por las vías de exposición dérmica, inhalación e ingestión para la población aledaña a la mina Cerro de Mercado.

El análisis de riesgo es una aproximación de la situación que vive la población aledaña a la mina Cerro de Mercado, para un mejor análisis se recomienda realizar estudios de específicos, determinando también la dosis total por las vías de exposición a través del muestreo de agua y aire, de esta manera se tendrá un panorama más completo del riesgo al que pudiera estar expuesta las personas.

Recomendaciones

- Con el fin de tener un panorama más amplio sobre los jales es necesario tomar muestras de alguna presa que no lleve tanto tiempo fuera de operación, a diversas profundidades y realizar la caracterización de los mismos para compararlos con los de la presa Boleo Estrella y observar el efecto del intemperismo en los jales.



- Para un mejor encapsulamiento de metales pesados, resistencia a la compresión y absorción de agua es necesario activar previamente el vidrio molido y la puzolana mediante una solución de hidróxido de sodio o hidróxido de potasio, la bibliografía recomienda concentraciones por arriba de 13 molar. Para el caso especial de la tefra la activación puede ser mecánica mediante una molienda de ésta.
- Es necesario modificar la máquina formadora de ladrillos para dar una mejor forma y presión uniforme a todos los tratamientos y de esta manera evitar contratiempos en la prueba de resistencia a la compresión. Por otro lado es muy importante buscar un equipo que mida la presión que se ejerce sobre los ladrillos.
- Además de las pruebas de compresión mecánica, convendría realizar pruebas de permeabilidad a los ladrillos para determinar el coeficiente de permeabilidad correspondiente a cada uno de ellos. Lo anterior para revisar la posibilidad de utilizar la mejor mezcla de los materiales utilizados en la fabricación de los ladrillos, como sistema de impermeabilización en los rellenos sanitarios.
- Llevar a cabo un análisis de costos y la valoración de los beneficios ambientales para conocer la viabilidad de la posible inserción de los ladrillos en el mercado de la construcción.
- Una forma de observar de mejor manera en el efecto del intemperismo acelerado es simular un envejecimiento más prolongado.



Referencias

- Abood, A., Badanoiu, A., Inout, N., & Stoleriu, S. (2017). Synthesis and properties of alkali activated borosilicate inorganic Polymers based on waste glass. *Construction and Building Materials*, 299-305.
- Adriano, D. (2001). Trace Elements In Terrestrial Enviroments . In *Biochemistry, Bioavalability and Risk of metals* (pp. 315-320). USA: Uiniversity of Georgia.
- Aduvire , O. (2006). *Drenaje Ácido de Mina Generación y Tratamiento*. Madrid: Instituto Geológico de España .
- AG Roadway Products. (2012). *SlidePlayer*. Retrieved from <https://slideplayer.com/slide/2477460/>
- Ahmari, S., & Zhang, L. (2012). Production of Eco-Friendly Bricks from Copper Mine Tailings through Geopolymerization. *Construction and Building Materials*, 29, 323-331.
- Ahmari, S., & Zhang, L. (2013). Durability and leaching behavior of mine tailings-based geopolymer bricks. *Construction and Building Materials*, 44, 742-750.
- Alvarádo , M., & Volke, S. (2004). *Informe de Resultados del Proyecto: Método de Análisis y Propuesta Para el Manejo de los Residuos Mineros del Sitio Nacozari, Sonora*. SEMARNAT-INE.
- Alves, C., Nobrega , S., Diniz, P., & Martins, M. (2018). Steel slag and iron ore tailings to produce solid brick. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1089-1095.
- Aparicio, E. M. (2009). Los riesgos de la contaminación minera y su impacto en los niños. *Boliviarevista*, 1-21 obtenido de <http://www.scielo.org.bo/pdf/rbcst/v12n27/v12n27a05.pdf> el 6 de noviembre de 2017.
- Arcos, M. (2018, Octubre). *Centro Nacional para la Prevención de Desastres* . Retrieved from Peligros por Residuos Mineros en México: http://www1.cenapred.unam.mx/DIR_SERVICIOS_TECNICOS/SANI/PAT/2018/1er%20trimestre%202018/2876%20DAyGR/13177/Marzo/Informe%20residuos%20mineros.docx.
- Arraras, A. (2014). *Prcoeso de extracción de minerales*.
- ATSDR. (2010). *La toxicidad del arsénico*. Retrieved from Agencia Para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades: https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/efectos_fisiologicos.html Consultado el 13 de octubre de 2017
- ATSDR. (2016). *Mercurio (Azogue) (Mercury)*. Retrieved from https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts46.html
- ATSDR. (2016). *Resúmenes de Salud Pública- Selenio (Selenium)* . Retrieved from Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs92.html Consultado el 13 de octubre de 2017



- Azkaráte , I., Ballester, P., Coll, R., Lechuga, J., Masó, D., Millán , M., . . . Tébar, A. (2006). *Morteros de revestimiento*. Madrid, España: Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.
- Bagheri, A., Nazari , A., Sanjayan, J., & Rajeev, P. (2017). Alkali activated materials vs geopolymers: Role of boron as an eco-friendly Replacement. *Construction and Building Materials*, 297-302.
- Barranzuela, L. (2014). Proceso Productivo de los Ladrillos de Arcilla Producidos en la Región de Piura . Piura, Perú: Universidad de Piura.
- Bellenfant, G., Guezennec , A., Bodéan , F., D'Hugues, P., & Cassard, D. (2013). Reprocessing of Mining Waste: Combining Environmental Management and Metal Recovery? Mine Closure 2013. *Cornwall, United Kingdom*, 571e582.
- Breytenbach, M. (2017, noviembre 24). *Farming for Minerals*. Retrieved from Mining Weekly: https://www.miningweekly.com/article/agromining-may-provide-new-opportunities-to-extract-remaining-value-from-mined-land-2017-11-24/rep_id:3650
- Calva, J. L. (2007). *Sustentabilidad y Desarrollo Ambiental*. México D.F: UNAM , Migéel Ángel Porrúa.
- Cashman, K., & Rust, A. (2016). Volcanic Ash: Generation and Spatial Variations. In *Volcanic Ash, Hazardous Observations* (pp. 5-22). School of Earth Sciences, University of Bristol, Bristol, United Kingdom.
- Choque, R., & Huaman, M. (2009). *Adobes Comprimidos Suelo Cemento Una Alternativa Ecológica*. Puno, Perú: Instituto de la Construcción y Ggerencia, XVII Congreso de ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú.
- COGERSA. (2011). *Solidificación-estabilización*. Retrieved from Planta de solidificación-estabilización : <http://www.cogersa.es/metaspaces/portal/14498/19205>
- Coll, A., Sánchez, S. M., & Morales, J. (2002). *La minería en México; geografía, historia, economía y medio ambiente*.
- Collado, T. P. (2005). Control de ejecución de tabiquerías y cerramientos. In *Manual práctico del encargado en obra* (pp. 20-40). España: Lex Nova.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. (2006). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Retrieved from Cámara de Diputados: http://www3.diputados.gob.mx/camara/001_diputados/012_comisioneslxii/01_ordinarias/002_agua_potable_y_saneamiento/13_marco_juridico/01_constitucion_politica_de_los_estados_unidos_mexicanos Consultado el 14 de octubre de 2017
- Corona , E., Tapia , Z., Henríquez , F., Tritlla , J., Morales Izuna Azucena , Levresse, G., & Pérez , F. (2009). *Geología y Mineralización del yacimiento de hierro Cerro de Mercado*. Durango. México D.F. Obtenido de: http://www.rodolfocorona.com/archivos/pdf/2009_Corona_Yacimiento_Fe_Cerro_de_Mercado2GEM_202.pdf el 8 de noviembre de 2017: Servicio Geológico Mexicano.



- Corona , R., Tapia , Z., Bueno, R., & Acuña , P. (2003). *Yacimiento Cerro de Mercado, Durango: Situación Actual* . Retrieved from <https://mineriaenlinea.com/2012/10/yacimiento-de-cerro-de-mercado-durango-situacion-actual/> consultado el 8 de noviembre de 2017
- Corona, E. R., & Henríquez, F. (2004). *Modelo Magmático del yacimiento de hierro Peña Colorada, Colima, y su relación con la exploración de otros yacimientos de hierro en México*. México D.F : Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cortinas de Nava, C. (2006). *Regulación de los Residuos Peligrosos en México*. México: SEMARNAT.
- Covarrubias , S., & Peña , C. J. (2017). Contaminación Ambiental Por Metales Pesados en México: Problemática y Estrategias de Fitorremediación. *Rev. Int. Contam, Amb. , 33*, 7-21. Recuperado el 1 octubre 2017 de: ninive.uaslp.mx/jspui/bitstream/i/4114/1/2016_PMPCA_M_MontesRocha_160318.pdf
- Davidovits, J. (1994). Recent Progresses in Concretes for Nuclear Waste and Uranium Waste. *Concrete International*, 53-58.
- Davidovits, J. (1999). *Chemistry and Geopolymeric Systems Terminology Proceedings*. "Geopolymer 99".
- Davidovits, J. (1999). Geopolymeric Reactions in the Economic Future of Cements and Concretes, Worldwide Migration of Carbon Dioxide Emission, Proceedings. "Geopolymer 99", 111-112.
- Diario Oficial de la Federación . (2017). *DECLARATORIA de vigencia de la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016*. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5475373&fecha=06/03/2017 consultado el 17 de noviembre de 2017
- EPA. (2016, mayo). *Regional Screening Levels (RSLs) - Generic Tables* . Retrieved from https://19january2017snapshot.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables-may-2016_.html
- Escobar , L. (2016). *Aprovechamiento de los recursos volcánicos en el campo de Calatrava*. Castilla-La Mancha: Universidad de Castilla-La Mancha.
- Eswed, B., Yousef, R., Alshaaer, M., Hamadneh, I., Al-Gharabli, S., & Khalili, F. (2015). Stabilization/solidification of heavy metals in kaolin/zeolite based geopolymers. *International Journal of Mineral Processin*, 137, 34-42.
- Fowle, J., & Dearfield, K. (2000). *RISK CHARACTERIZATION HANDBOOK*. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- García, L. T. (2007). *La constitución Mexicana y los Principios Rectores del Derecho Ambiental*. México: UNAM, Instituto de investigaciones Jurídicas.
- Giannopoulou, I., & Panias, D. (2004). Geopolymers: a new generation of inorganic polymeric novel materials. *Discover conferences papers, posters, and presentations presented at*



International Conference in Advance in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology. National Technical University of Athens.

- Gómez , G. (2009). El Médio Ambiente en el Sistema Jurídico Mexicano. *REVISTA AMICUS CURIAE*, No 3 (2), 1-6 . Sistema de Univerisidad Abierta, Facultad de Derecho UNAM [en línea] obtenida de :<http://www.revistas.unam.mx/index.php/amicus/issue/view/1316/showToc>.
- Gómez, J. S. (2017). *Situación Actual del Manejo de los Residuos Peligrosos Generados en México por los Diferentes Giros de los Servicios y Transportación*. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal/xix.pdf>
- González , S. (2016). *Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental de la UNAM. Propuesta para el aprovechamiento de residuos metalúrgicos no ferrosos*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- González M., A. (2012). *Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental de la UNAM. Inmovilización de sustancias peligrosas a través de solidificaciones monolíticas con diferentes materiales*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Guo, X., Hu, W., & Shi, H. (2014). Microstructure and self-solidification/stabilization (S/S) of heavy metals of nano-modified CFA-MSWIFA composite geopolymers. *Construction Building Materials*(56), 81-86.
- Gutiérrez , A., Ramírez , H., Encarnación , A., & Medina , A. (2012). *Diagnóstico Básico Para La Gestión Integral De Los Residuos* . México: INECC, SEMARNAT.
- Gutiérrez, B. (2018). *Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental de la UNAM. PROPUESTA PARA LA DISPOSICIÓN DE JALES AGOTADOS, PREVIAMENTE CARACTERIZADOS Y ESTABILIZADOS, EN CAVIDADES MINERAS*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Gutiérrez, R. M., Romero, F., & González , H. G. (2007). Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 24 (2), 170-184. Recuperado 1 octubre de 2017, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742007000200005&lng=es&tlng=es.
- Hermann, E., Kunze, C., Gatzweiler, R., Kiebig, G., & Davidovits, J. (1999). Solidification of Various Radioactive Residues by Geopolymeric Cement (K,Ca)-Poly(sialate-siloxo) with Special Emphasis on Long-Term Stability, Proceedings,. "Geopolymer 99", 211-228.
- Hossain , K., & Lachemi , M. (2004). Residual strength and durability of volcanic ash concrete exposed to high temperature. *ACI Materials Journal*, 6(101), 493-500.
- INECC. (2007, noviembre 15). *Industria Minera*. Retrieved from http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/16/parte3_12.html
- INEGI. (2010). *Compendio de Información Geográfica Municipal*. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/compendio.aspx> Consultado el 10 de noviembre de 2017



- INEGI. (2016). *Mortalidad. Esperanza de vida al nacimiento por entidad federativa y sexo*. Retrieved from <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/dur/poblacion/dinamica.aspx?tema=me&e=10>
- Instituto de Geografía, UNAM, & CENAPRED. (2018). *Calibración de datos de nubes de ceniza para los Volcanes Mexicanos*. Ciudad de México.
- Instituto de Promoción Cerámica. (2007). *Absorción/Succión*. Retrieved from http://www.ipc.org.es/guia_colocacion/info_tec_colocacion/sopor_sup_colocacion/superficie_colocacion/absorcion.html consultado el 8 de Noviembre de 2018
- Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. (1997). *Caracterización de materia particulada aeroportada asociada a la actividad del volcán Popocatepetl (verano de 1997)*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Dirección General de Salud Ambiental.
- Jardine , P., Fendorf, S., Mayes, M., Larsen, I., Brooks, S., & Bailey, W. (1999). Fate and Transport of Hexavalent Chromium in Undisturbed Heterogeneous. *Environmental Science and Technology*, 3, 2939-2944.
- Kauppila, P., Räisänen, M., & Myllyoja, S. (2011). Best Environmental Practices in Metal Ore Mining. *Finnish Environment*, 214.
- Lara, D. R., & Melgoza, A. R. (2009). *Solidificación- Estabilización de cromo, níquel y plomo en una matriz sólida de hormigón fabricada con cemento Portland*. Retrieved from Información tecnológica 20(1), 29-38: <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v20n1/art05.pdf>
- Li, Z., Ma, Z., Jan van der Kuijp, T., Yuan, Z., & Huang, L. (2014). A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 843-853.
- López, S. P., & Ferro, N. A. (2006). *Derecho Ambiental*. México D.F.: IURE Editores.
- Lozano, A. M. (2012). Uso de Vidrio de Desecho En la Fabricación de Desechos de Arcilla. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 5-14.
- Malatse, M., & Ndlovu, S. (2015). The viability of using the witwatersrand gold mine tailings of brickmaking. *Metallurgy and Materials Sciences*, 321-325.
- Martínez , F., Souza, A., Bucio , O., Gómez , Q., & Gutiérrez , R. (2013). Cadmio: efectos sobre la salud. Respuesta celular y molecular . *Acta toxicológica argentina* , 21(1), 33- 49. Recuperado en 07 de octubre de 2017, de : http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-37432013000100004&lng=es&tlng=es.
- Martínez, J. (2005, Septiembre). *Guía para la gestión integral de los residuos peligrosos*. Retrieved from Fundamentos Tomo I: http://www.cempre.org.uy/docs/biblioteca/guia_para_la_gestion_integral_residuos/gestion_respel01_fundamentos.pdf



- Matte, T. (2003). Efectos del plomo en la salud de la niñez. *Salud Pública de México*, 45 (supl. 2), 220-224. Recuperado en 07 de octubre de 2017, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342003000800008&lng=es&tlng=es.
- Meddah, M. (2015). Durability performance and engineering properties of shale and volcanic ashes concretes. *Construction Buildings Materials*(79), 73-82.
- Medel , R. A., Ramos , G. S., Avelar , G. F., Mora , T. L., & Rodríguez, V. F. (2008). Caracterización de Jales mineros y evaluación de su peligrosidad con base en su potencial de lixiviación. *Conciencia Tecnológica [en línea]*, 32-35 Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94403504>> ISSN 1405-5597.
- Megchún, E. F. (2014). *GEOQUÍMICA Y MINERALOGÍA DE JALES EN MINA AURORA, XICHÚ*. Unam, Ciencias de la Tierra . México: Ciencias de la Tierra UNAM.
- Mejía, J., Cañizares, L., Rodríguez , V., Jiménez, M., & Díaz , F. (1999). Un método para la evaluación de riesgos para la salud en zonas mineras. *Salud Pública de México* , Vol. 41, núm. 2 pp 132-140 obtenido de: <http://www.redalyc.org/pdf/106/10609410.pdf>.
- Mena, V., & Loera, S. (1972). *Guía para fabricación y control de concreto en obras pequeñas* . México: UNAM.
- Meyer , C. (2003). *Glass Concrete Putting Sustainability to Work In A Decorative Way*. New York: Columbia University.
- Miliarium. (2008). *Miliarium.com Ingeniería civil y medio ambiente* . Retrieved from Estabilización y Solidificación : <http://www.miliarium.com/Prontuario/TratamientoSuelos/EstabilizacionSolidificacion.asp>
- Ministerio de Minería de Chile. (2002). *Gestión de Residuos Industriales Sólidos Mineros y Buenas Prácticas*. Retrieved from http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Recursos/archivos/MineriaDesarrolloSostenible/ProduccionLimpia/ampl_residuos_solidos.pdf
- Miri , M., Derakhshan, Z., Abdollahnejad, A., Aval, H., & Ehrampoush, M. (2017). Human health impact assessment of exposure to part particulate matter: an AirQ software modeling. *Environmental Science and Pollution Research*, 16513–16519 |.
- Moreno, Y. B. (2017). Módulo 4: Tecnologías para el tratamiento de los residuos . In *Gestión y Tratamiento de Residuos* (pp. 86-89). España : CIEMAT.
- Morin, K., & Hutt, N. (2001). *Relocation of net-acid-generating waste to improve post-mining water* .
- Nájera , M. (2010). *Legislación Ambiental* . Estado de México: Tecnológico de Estudios Superiores Oriente del Estado de México .
- NOM-141-SEMARNAT-2003, N. O. (2004). *Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio*,



proyecto, construcción, operación y postoperación de las presas de jales. México: SEMARNAT.

- Núñez, R. (2003). SITUACIÓN EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS EN MÉXICO. *Revista de la Facultad de Salud Pública y Nutrición Universidad Autónoma de Nuevo León.*
- Oliveira, M., Santana, R., Ataíde, C., & Barrozo, M. (2011). Recovery of apatite from flotation tailings. *Separ. Purif. Technol.*, 79-84.
- OMS. (2016). *Organización Mundial de la Salud.* Retrieved from Arsénico: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/> consultado el 13 de octubre de 2017
- OMS. (2016). *Organización Mundial de la Salud.* Retrieved from Intoxicación por plomo y salud: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/es/>
- OMS. (2017). *El mercurio y la Salud.* Retrieved from Organización Mundial de la Salud: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/es/> Consultado el 13 de octubre de 2017
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. (2004). *Norma Mexicana NMX-C-036-ONNCE-2004 "Industria de la Construcción- Bloques, Tabiques o Ladrillos, Tabicones y Adoquines- Resistencia a la Compresión-Método de Prueba".* México: Diario Oficial de la Federación.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. (2005). *Norma Mexicana NMX-C-037-2005 Industria de la Construcción-Bloques, Ladrillos y Tabiques y Tabicones-Determinación de la Absorción de Agua y Absorción Inicial de Agua.* México: Diario Oficial de la Federación.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. (2005). *Norma Mexicana NMX-C-441-ONNCE-2005 "Industria de la Construcción- Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones Para Uso No Estructural-Especificaciones".* México: Diario Oficial de la Federación.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. (2014). *Norma Mexicana NMX-C-038-ONNCE-2013 Industria de la Construcción-Mampostería-Determinación de las dimensiones de Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones-Método de Ensayo.* México: Diario Oficial de la Federación.
- Panait, A.-M., Matei, E., Stoleriu, S., Badanoiu, A., & Georgescu, M. (2012). Alkali activated binders as matrices for the immobilization of glass waste with Pb content. *International Conference on Building Materials in Weimar.* Weimar.
- Pérez, C. . (2016). *Estabilización/Solidificación de metales peligrosos en matrices geopoliméricas que contienen zeolitas.* Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Phair, J., Van Deventer, J., & Smith, J. (2004). Effect of Al source and alkali activation on Pb and Cu immobilization in fly-ash based geopolymers. *Geochem*, 423-434.



- PNUMA. (2002). *Evaluación Mundial sobre el mercurio* . Ginebra : PNUMA Productos Químicos .
- Poveda , R., Granja, V., Hidalgo, D., & Ávila , C. (2015, Febrero). Análisis de la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste en adoquines de hormigón tipo A. *Revista Politécnica*, 35(3), 1-10.
- PROFEPA. (2014, febrero 10). *Control de Residuos Peligrosos*. Retrieved from http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/1370/1/mx/control_de_residuos_peligrosos.html
- Quintero, O. L., Herrera, J., Corzo, L., & García, J. (2011). Relación entre la resistencia a la compresión y la porosidad del concreto evaluada a partir de parámetros ultrasónicos. *Revista ION*, 24(1), 69-76.
- Ramírez, A. (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos Actuales para evaluar exposición ambiental y ocupacional con indicadores biológicos . *Anales de la Facultad de Medicina* , vol. 63, num. 1, pp 51-54. recuperado en 07 de octubre de 2017, de: https://www.academia.edu/27312655/Toxicolog%C3%ADa_del_Cadmio._Conceptos_actuales_para_evaluar_exposici%C3%B3n_ambiental_u_ocupacional_con_indicadores_biol%C3%B3gicos.
- Ramos, G. M., Avelar , J., Medel , R. A., Yamamoto, L., Godínez , L., Ramírez , M., . . . Rodríguez , F. (2012). MOVILIDAD DE METALES EN JALES PROCEDENTES DEL DISTRITO MINERO DE GUANAJUATO, MÉXICO. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental [en línea]*, 28 (sin mes), 49-59 Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37023172005> ISSN 0188-4999 .
- Rangel , M. A., Montañez , H., Luévanos , E., & Balagusuramy , N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana* , vol. 23, núm. 2, pp. 103-108. Recuperado en 07 de octubre de 2017, de: <http://www.redalyc.org/pdf/573/57339210001.pdf> .
- Relaves. (2015, noviembre 19). *Relaves.org*. Retrieved from <http://www.relaves.org/remediacion/> fecha de consulta: 23 septiembre de 2017
- Risdareni, P., Karjanto, A., & Khakim, F. (2015). Physical Properties of Volcanic Ash Based Geopolymer Concrete. *Material Science Forum*, 1-7.
- Robayo, S., & Mejía, R. (2015). ENCAPSULACIÓN DE METALES PESADOS EN GEOPOLIMEROS BASADOS EN DOS TIPOS DE PUZOLANA VOLCÁNICA. *Universidad del Valle*.
- Romero, C., Pellerano, R., Acevedo, H., & Vázquez , F. (2007). *Estandarización condiciones preliminares para la determinación de cromo en muestras ambientales* . Argentina: Universidad Nacional del Nordeste .
- Romero, F. M., & Gutiérrez, M. (2010). *Comparative hazard study of mine tailings in two mining areas in Southern and Central Mexico*. Retrieved from Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 62(1), 43-44: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-33222010000100004&script=sci_arttext&tlng=en



- Romero, F., Armienta M., A., & González-Hernández . (2007). *The solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, México. Appl. Geochem.*
- Rostagno, H. (2017). *Los riesgos de la minería* . Retrieved from Empresalud : <http://www.empresalud.com.ar/revista/nota/los-riesgos-de-la-mineria/> consultado el 8 de noviembre de 2017
- Sánchez, G. (2003). Manejo de residuos industriales. Aguas Calientes: Universidad Autónoma de Aguas Calientes.
- Secretaría de Economía. (2009). *Minería*. Retrieved from http://www.un.org/esa/dsd/dsd_aofw_ni/ni_pdfs/NationalReports/mexico/Mineria.pdf
- SEMARNAT. (2002). *Bases Conceptuales y Diagnóstico del Programa Para La prevención y Manejo Integral de Residuos Peligrosos*. Retrieved from Paot: <http://centro.paot.org.mx/index.php/porinstituciones/federales/23-semarnat/196-manejo-integral-de-residuos-peligrosos>
- SEMARNAT. (2003). *NORMA Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003. Que establece los procedimientos para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, y operación de presas de jales*. México: Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2005). *NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio*. México: Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2008). *Programa Nacional Para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* . México D.F.
- SEMARNAT. (2011). *Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros*. México: Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2013). *Información de la Situación del Medio Ambiente en México, Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012*. México.
- Servicio Geológico Mexicano. (2015). *Panorama Minero del Estado de Durango*. Retrieved from <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/DURANGO.pdf> consultado el 8 de noviembre de 2017
- Severiche , S., & González, G. (2013, Enero-Junio). Verificación Analítica Para las Determinaciones de Cromo Hexavalente En Aguas Por Espectrofotometría. *Revista de Ingenierías USBMED*, 4(1), 22-26.
- Shao, H., Liang, K., Peng, F., Zhou, F., & Hu, A. (2005). Production and properties of cordierite-based glass-ceramics from gold tailings. *Minerals Engineering*, 18, 635-637.



- Shreekant , R., Aruna, M., Harsha , V., & Shanth, A. (2015). Development of value added product using iron ore waste for its effective utilization. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 30-35.
- Tchakoute, K., Elimbi, A., Mbey, J., Ngally Sabouang, C., & Njopwouo, D. (2012). The effect of adding alumina-oxide to metakaolin and volcanic ash on geopolymer products: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 960-969.
- Thomas, L. (2016). *Toxicidad del Selenio*. Retrieved from NEWS MEDICAL LIFE SCIENCES: [https://www.news-medical.net/health/Selenium-Toxicity-\(Spanish\).aspx](https://www.news-medical.net/health/Selenium-Toxicity-(Spanish).aspx) Consultado el 13 de octubre de 2017
- Thormann, P. (1970). Una contribución a la determinación y la influencia de la adherencia entre ladrillos silíceos-calcareos y morteros. *Tonindustrie-ztg*(2), 50-56.
- Toniolo, N., & Boccaccini, R. (2017). Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review. *Ceramics International*, 14545-14551.
- Torres-Carrasco, M., Palomo, J., & Puertas , F. (2015). Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation. *Journal of Cleaner Production*(90), 397-408.
- TREZZA, M. A. (2006). Influencia del fillers calcáreo en la solidificación/estabilización de metales pesados. *Materia (Rio de Janeiro)*, 11(2) 162-173. <https://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762006000200010>.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2018, noviembre). *Risk Assessment*. Retrieved from Regional Screening Levels (RSLs) - Generic Tables: <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>
- Urbano, G. R., Veloz R., M. A., Canales Cabañas, C. A., & González Martínez, I. (2007). *Caracterización electroquímica de suelos contaminados por residuos mineros (jales)*. Pachuca: universidad Nacional Autónoma del Estado de Hidalgo.
- VAN JAARSVELD, J., VAN DEVENTER, J., & SCHWARTZMAN, A. (1999). THE POTENTIAL USE OF GEOPOLYMERIC MATERIALS TO IMMOBILISE TOXIC METALS: PART II. MATERIAL AND LEACHING CHARACTERISTICS. *Minerals Engineering*, 75-91.
- Vite, T., Vite , T., & Díaz , C. (2005). *Elaboración de Materiales de Construcción a Partir de Residuos Mineros* . Toluca: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.
- Volke , S., & Velásco, T. (2002). *Tecnologías de remediación para Suelos Contaminados*. México: INE-SEMARNAT.
- Volke, S. T., Velasco, T. J., & de las Rosas, P. D. (2005). *Suelo contaminado por metales y metaloides: muestreo y alternativa para su remediación*. México: INE-SEMARNAT. Retrieved from [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/B1E761B1E2F24A5C05257D490070F94F/\\$FILE/SuelosContaminadosPorMetalesYMetaloides.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/B1E761B1E2F24A5C05257D490070F94F/$FILE/SuelosContaminadosPorMetalesYMetaloides.pdf)



- Waijarean, N., Asavapisit, S., & Sombatsompop, K. (2014). Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals. *Construction Buildings Materials*, 486-491.
- Wang, J.-F., & Yi Hu. (2012). Environmental health risk detection with GeogDetector. *Environmental Modelling & Software*, 114-115.
- Wcislo, E., Dlugosz, J., & Korcz, M. (2005). A Human Health Risk Assessment Software for Facilitating Management of Urban Contaminated Sites: A Case Study: The Massa Site, Tuscany, Italy. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1005-1024.
- Western Washington University . (2018). *Agilent 7500ce (ICPMS)*. Retrieved from <https://cse.wvu.edu/amsec/agilent-7500ce-icpms>
- Wilson, D., kalbau , F., & Thurgood, M. (2002). *Manual de gestión en residuos peligrosos para países en vías de desarrollo*. Naciones Unidas.
- World Economic Forum. (2016). *Mapping mining to the sustainable development*. Retrieved from <http://unsdsn.org/wp-content/uploads/2016/11/>
- Xu, H., & Van Denever, J. (2000). The geopolymerization of aluminosilicate minerals. *Int. J. Miner. Process*, 59, 247-266.
- Xu, J., Zhou, Y., Chang, Q., & Qu, H. (2006). Study on the factors of affecting the immobilization of heavy metals in fly ash-based geopolymers. *Material Letters* , 820-822.
- Yankwa , D., Elimbi, A., Kouamo, T., & Kumar, S. (2016). Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials* , 606-615.
- Zayed, A., & Terry, N. (2002). Chromium in the environment: factors affecting biological remediation. *Plant and soil*, 139-156.
- Zheng , L., Wang , W., & Shi , Y. (2010). The effects of alkaline dosage and Si/Al ratio on the immobilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer. *Chemosphere*, 665–671.
- Zheng, L., Wang, W., & Shi, Y. (79 (2010)). The effects of alkaline dosage and Si/Al ratio on the immobilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer. *Chemosphere*, 665-671.
- Ziemkiewicz, P., Donovan, J., Frazier, J., Daly, M., Black, C., & Wener, E. (2000). *Experimental injection of alkaline lime slurry for in-situ remediation of an acidic surface-mine aquifer*. Morgantown, WV, USA: West Virginia University.



Anexo 1 Resultados de los análisis que se hicieron a las muestras de jales de la mina Cerro de mercado

Analito	Zr	Sr	Rb	Pb	As	Zn	W	Cu	Mn	Ti	Fe
LDI (mg/kg)	15	11	10	13	11	25	35	35	85	160	100
Clave cliente	mg/kg										
M1	185.6	135.5	63.2	<LOD	65.6	65.8	<LOD	43.8	990.9	2101.5	14.87
M2	284.8	123.6	55.0	<LOD	66.6	54.8	<LOD	<LOD	903.9	2287.0	16.46
M3	246.1	135.6	63.0	<LOD	66.2	55.8	<LOD	<LOD	1033.1	2096.5	14.38
M4	244.1	113.5	60.3	<LOD	57.1	50.4	<LOD	36.4	920.4	2106.4	15.11
M5	289.4	111.5	61.2	<LOD	59.2	57.5	<LOD	39.9	859.9	2222.6	15.32
M6	316.6	122.5	56.6	<LOD	59.4	58.5	<LOD	<LOD	1019.8	2573.2	22.69
M7	262.7	121.6	54.3	<LOD	58.3	59.9	<LOD	34.6	910.0	2570.3	17.05
M8	278.9	154.6	58.5	<LOD	67.8	57.8	<LOD	<LOD	1024.5	2838.1	14.13
M9	373.0	153.1	56.1	<LOD	74.4	59.1	<LOD	39.7	932.3	2350.2	13.26
M10	230.0	178.8	70.7	<LOD	64.2	53.6	<LOD	32.9	925.5	1699.4	15.81
M11	224.9	190.6	65.6	<LOD	56.7	55.1	<LOD	<LOD	824.4	1822.9	15.45
M12	216.4	161.1	60.9	<LOD	66.4	65.8	<LOD	<LOD	954.0	1930.5	15.79
M13	189.0	161.4	62.6	<LOD	73.2	57.8	<LOD	39.0	919.7	1878.1	14.93
M14	198.1	166.5	60.5	<LOD	71.3	64.6	<LOD	35.8	907.0	1924.5	14.72
M15	185.5	124.5	61.4	<LOD	70.6	66.7	<LOD	35.6	885.3	2040.4	15.86
M16	218.4	140.4	62.4	<LOD	60.8	58.2	<LOD	36.4	793.3	1976.1	12.45
M17	240.4	167.3	62.5	<LOD	75.0	66.6	<LOD	<LOD	1046.7	1776.3	17.89
M18	149.2	118.2	60.5	<LOD	67.5	64.8	<LOD	<LOD	1088.1	1976.2	18.62
M19	202.3	133.2	60.1	<LOD	64.1	53.7	<LOD	<LOD	1032.4	1957.1	17.03
M20	178.4	142.4	63.9	<LOD	51.1	59.3	<LOD	34.5	782.4	1654.3	12.01
M21	192.1	170.3	63.6	<LOD	67.3	65.9	<LOD	42.2	1066.4	2110.6	16.32
M22	182.3	178.7	59.5	<LOD	71.8	66.8	<LOD	<LOD	1015.2	2068.0	16.77
M23	200.8	158.1	62.0	<LOD	68.8	60.6	<LOD	39.9	958.5	1957.3	16.24
M24	142.7	129.7	63.4	<LOD	67.7	65.6	<LOD	42.1	959.3	1974.4	14.85
M25	217.2	118.9	62.4	<LOD	55.7	50.9	<LOD	33.3	857.0	1881.4	13.95
M26	294.1	134.7	64.7	<LOD	54.3	56.5	<LOD	46.8	904.1	2099.8	14.28
M27	267.1	125.6	58.0	<LOD	65.6	59.9	<LOD	40.3	946.2	2020.8	15.22



hhjj	Zn	Ni	Co	Cr	V	Ba	Sb	Ca
LDI (mg/kg)	15	11		10	13	11		25
Clave cliente	mg/kg							
M1	65.8	112.8	<LOD	113.3	215.5	595.8	<LOD	4.59
M2	54.8	163.7	<LOD	114.6	311.2	520.6	<LOD	5.17
M3	55.8	115.7	<LOD	119.1	237.4	577.6	<LOD	4.50
M4	50.4	125.4	<LOD	111.7	237.9	510.7	<LOD	5.25
M5	57.5	153.6	<LOD	100.2	257.7	595.7	24.4	4.87
M6	58.5	180.9	<LOD	103.6	327.2	591.7	<LOD	4.46
M7	59.9	138.6	<LOD	109.7	239.2	559.6	<LOD	4.94
M8	57.8	179.7	<LOD	105.2	267.0	799.9	22.3	5.16
M9	59.1	171.7	<LOD	122.2	285.8	618.2	<LOD	4.55
M10	53.6	149.0	<LOD	122.5	191.5	738.5	<LOD	4.61
M11	55.1	135.8	<LOD	116.9	207.8	590.1	<LOD	4.66
M12	65.8	118.6	<LOD	109.4	206.5	705.8	20.9	4.27
M13	57.8	132.8	<LOD	135.9	224.2	695.0	<LOD	4.39
M14	64.6	120.3	257.4	106.3	208.9	697.8	<LOD	4.27
M15	66.7	125.3	272.3	108.1	239.3	530.4	21.6	4.62
M16	58.2	135.4	<LOD	124.0	206.9	618.8	<LOD	5.04
M17	66.6	141.3	<LOD	113.3	250.2	862.8	<LOD	4.58
M18	64.8	111.1	<LOD	114.6	280.5	548.4	<LOD	4.27
M19	53.7	173.5	<LOD	119.1	286.3	621.9	23.9	4.34
M20	59.3	89.6	<LOD	111.7	163.8	524.5	20.7	4.12
M21	65.9	113.9	<LOD	100.2	207.8	701.5	23.6	4.38
M22	66.8	114.6	<LOD	103.6	237.5	727.3	<LOD	4.75
M23	60.6	111.8	<LOD	109.7	236.9	713.5	<LOD	4.28
M24	65.6	104.2	281.8	105.2	219.8	548.9	26.5	4.59
M25	50.9	130.1	<LOD	122.2	206.5	535.6	20.3	5.17
M26	56.5	135.4	<LOD	122.5	238.2	602.1	<LOD	4.50
M27	59.9	125.4	266.9	116.9	240.4	544.5	<LOD	5.25

<LOD: por debajo del límite de detección
LDI: límite de detección instrumental

Programaciones en software R

Aleatorización de tratamientos

```
f <- factor(rep(c(1,2,3,4,5,6,7,8,9), each=3))
fac <- sample(f, 27)
f
fac
ue <- 1:27
plan <- data.frame(ladrillo = ue, trat=fac)
```



plan

Programación para ver el efecto de la adición de vidrio molido y ceniza volcánica en la absorción de agua.

```
datos <- read.table("absorcion.txt",header=T)
datos
attach(datos)
absorcion
Tratamiento
names(datos)
is.numeric(absorcion)
is.factor(Tratamiento)
Tratamiento <- as.factor(Tratamiento)
m1 <- lm(absorcion~ Tratamiento)
TukeyHSD(aov(absorcion~Tratamiento))
```

\$Tratamiento	diff	lwr	upr	p adj
2-1	0.8790000	-1.29285439	3.050854	0.8767192
3-1	3.2503333	1.07847894	5.422188	0.0014186
4-1	3.2353333	1.06347894	5.407188	0.0014910
5-1	2.9143333	0.74247894	5.086188	0.0043489
6-1	3.0290000	0.85714561	5.200854	0.0029640
7-1	5.6870000	3.51514561	7.858854	0.0000010
8-1	6.3316667	4.15981228	8.503521	0.0000002
9-1	9.4616667	7.28981228	11.633521	0.0000000
3-2	2.3713333	0.19947894	4.543188	0.0263682
4-2	2.3563333	0.18447894	4.528188	0.0276864
5-2	2.0353333	-0.13652106	4.207188	0.0763840
6-2	2.1500000	-0.02185439	4.321854	0.0535575
7-2	4.8080000	2.63614561	6.979854	0.0000110
8-2	5.4526667	3.28081228	7.624521	0.0000018
9-2	8.5826667	6.41081228	10.754521	0.0000000
4-3	-0.0150000	-2.18685439	2.156854	1.0000000
5-3	-0.3360000	-2.50785439	1.835854	0.9997030
6-3	-0.2213333	-2.39318772	1.950521	0.9999873
7-3	2.4366667	0.26481228	4.608521	0.0212996
8-3	3.0813333	0.90947894	5.253188	0.0024889
9-3	6.2113333	4.03947894	8.383188	0.0000003
5-4	-0.3210000	-2.49285439	1.850854	0.9997879
6-4	-0.2063333	-2.37818772	1.965521	0.9999926
7-4	2.4516667	0.27981228	4.623521	0.0202766
8-4	3.0963333	0.92447894	5.268188	0.0023674
9-4	6.2263333	4.05447894	8.398188	0.0000003
6-5	0.1146667	-2.05718772	2.286521	0.9999999
7-5	2.7726667	0.60081228	4.944521	0.0069851
8-5	3.4173333	1.24547894	5.589188	0.0008175
9-5	6.5473333	4.37547894	8.719188	0.0000001
7-6	2.6580000	0.48614561	4.829854	0.0102416
8-6	3.3026667	1.13081228	5.474521	0.0011929
9-6	6.4326667	4.26081228	8.604521	0.0000002
8-7	0.6446667	-1.52718772	2.816521	0.9759939
9-7	3.7746667	1.60281228	5.946521	0.0002565
9-8	3.1300000	0.95814561	5.301854	0.0021161



Programación para ver el efecto de la adición de vidrio molido y ceniza volcánica en la retención de metales pesados

Lixiviados de los ladrillos

```
datos <- read.table("~/Desktop/Lixiviados.txt",header=T)
datos
attach(datos)
Lixiviado
Tratamiento
names(datos)
is.numeric(Lixiviado)
is.factor(Tratamiento)
Tratamiento <- as.factor(Tratamiento)
```

lixiviado como factor.

```
m1 <- lm(Lixiviado~ Tratamiento)
names(m1)
```

de análisis de varianza

```
anova(m1)
```

Comparaciones múltiples TUKEY

```
TukeyHSD(aov(Lixiviado~Tratamiento))
```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

```
Fit: aov(formula = Lixiviado ~ Tratamiento)
```

```
$Tratamiento
      diff      lwr      upr    p adj
2-1 0.049666667 -0.528728095 0.6280614 0.9999966
3-1 0.108000000 -0.470394762 0.6863948 0.9988464
4-1 0.054000000 -0.524394762 0.6323948 0.9999935
5-1 0.120666667 -0.457728095 0.6990614 0.9975019
6-1 -0.091666667 -0.670061428 0.4867281 0.9996456
7-1 0.580666667 0.002271905 1.1590614 0.0486722
8-1 1.007333333 0.428938572 1.5857281 0.0002501
9-1 0.854666667 0.276271905 1.4330614 0.0016258
3-2 0.058333333 -0.520061428 0.6367281 0.9999883
4-2 0.004333333 -0.574061428 0.5827281 1.0000000
5-2 0.071000000 -0.507394762 0.6493948 0.9999473
6-2 -0.141333333 -0.719728095 0.4370614 0.9928173
7-2 0.531000000 -0.047394762 1.1093948 0.0866154
8-2 0.957666667 0.379271905 1.5360614 0.0004561
9-2 0.805000000 0.226605238 1.3833948 0.0030265
4-3 -0.054000000 -0.632394762 0.5243948 0.9999935
5-3 0.012666667 -0.565728095 0.5910614 1.0000000
6-3 -0.199666667 -0.778061428 0.3787281 0.9439930
7-3 0.472666667 -0.105728095 1.0510614 0.1634927
```



```

8-3 0.899333333 0.320938572 1.4777281 0.0009336
9-3 0.746666667 0.168271905 1.3250614 0.0062965
5-4 0.066666667 -0.511728095 0.6450614 0.9999673
6-4 -0.145666667 -0.724061428 0.4327281 0.9912736
7-4 0.526666667 -0.051728095 1.1050614 0.0909589
8-4 0.953333333 0.374938572 1.5317281 0.0004809
9-4 0.800666667 0.222271905 1.3790614 0.0031956
6-5 -0.212333333 -0.790728095 0.3660614 0.9229753
7-5 0.460000000 -0.118394762 1.0383948 0.1862379
8-5 0.886666667 0.308271905 1.4650614 0.0010921
9-5 0.734000000 0.155605238 1.3123948 0.0073816
7-6 0.672333333 0.093938572 1.2507281 0.0159460
8-6 1.099000000 0.520605238 1.6773948 0.0000846
9-6 0.946333333 0.367938572 1.5247281 0.0005238
8-7 0.426666667 -0.151728095 1.0050614 0.2581990
9-7 0.274000000 -0.304394762 0.8523948 0.7615258
9-8 -0.152666667 -0.731061428 0.4257281 0.9882500

```

Programación para ver el efecto de la cámara de intemperismo acelerado sobre los tratamientos

```

Camara <- c(rep(0:1,each=24))
Tratamiento <- c(rep(1,3),rep(2,3),rep(3,3),rep(4,3),rep(5,3),rep(6,3),rep(8,3),rep(9,3),
rep(1,3),rep(2,3),rep(3,3),rep(4,3),rep(5,3),rep(6,3),rep(8,3),rep(9,3))

```

```

Camara <- as.factor(Camara)
Tratamiento <- as.factor(Tratamiento)

```

```

y <- c(38.43,37.3,39.5,38.64,38,37.86,38.19,39.39,38.92,29.68,37.82,38.39
,38,37.08,37.84,40.92,38.45,29.67,35.05,38.86,37.77,23.78,27.02,27.08,

```

```

38.98,37.73,35.16,37.47,38.99,37.12,36.67,38.66,36.44,37.1,38.1,37.61,38.25,37.59,38.99,37.14,2
8.5,37.38,
36.07,36.71,37.16,35.69,34.19,35.18)

```

```

modelo <- lm(y ~ Camara*Tratamiento)
anova(modelo)

```

```

interaction.plot(Tratamiento,Camara,y,type="l",
main="Gráfica de interacción",
xlab="Tratamiento",ylab="resistencia kg/cm2",col=1:3)

```

```

# Comparaciones múltiples TUKEY
TukeyHSD(aov(y ~ Camara*Tratamiento), ordered=T) # las diferencias de medias son positivas
todas
plot(TukeyHSD(modelo))

```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

```

$`Camara:Tratamiento`
      diff      lwr      upr      p adj

```



1:6-0:9 8.38000000 0.7508196 16.009180 0.0205160
1:9-0:9 9.06000000 1.4308196 16.689180 0.0087479
0:4-0:9 9.33666667 1.7074863 16.965847 0.0061259
0:6-0:9 10.38666667 2.7574863 18.015847 0.0015294
1:8-0:9 10.68666667 3.0574863 18.315847 0.0010211
0:8-0:9 11.26666667 3.6374863 18.895847 0.0004649
1:3-0:9 11.29666667 3.6674863 18.925847 0.0004463
1:1-0:9 11.33000000 3.7008196 18.959180 0.0004265
1:4-0:9 11.64333333 4.0141529 19.272514 0.0002781
0:5-0:9 11.68000000 4.0508196 19.309180 0.0002645
1:2-0:9 11.90000000 4.2708196 19.529180 0.0001958
0:2-0:9 12.20666667 4.5774863 19.835847 0.0001287
1:5-0:9 12.31666667 4.6874863 19.945847 0.0001107
0:1-0:9 12.45000000 4.8208196 20.079180 0.0000923
0:3-0:9 12.87333333 5.2441529 20.502514 0.0000517
1:9-1:6 0.68000000 -6.9491804 8.309180 1.0000000
0:4-1:6 0.95666667 -6.6725137 8.585847 1.0000000
0:6-1:6 2.00666667 -5.6225137 9.635847 0.9996791
1:8-1:6 2.30666667 -5.3225137 9.935847 0.9984651
0:8-1:6 2.88666667 -4.7425137 10.515847 0.9857268
1:3-1:6 2.91666667 -4.7125137 10.545847 0.9843376
1:1-1:6 2.95000000 -4.6791804 10.579180 0.9826731
1:4-1:6 3.26333333 -4.3658471 10.892514 0.9596551
0:5-1:6 3.30000000 -4.3291804 10.929180 0.9559605
1:2-1:6 3.52000000 -4.1091804 11.149180 0.9286848
0:2-1:6 3.82666667 -3.8025137 11.455847 0.8750175
1:5-1:6 3.93666667 -3.6925137 11.565847 0.8512896
0:1-1:6 4.07000000 -3.5591804 11.699180 0.8195518
0:3-1:6 4.49333333 -3.1358471 12.122514 0.7009898
0:4-1:9 0.27666667 -7.3525137 7.905847 1.0000000
0:6-1:9 1.32666667 -6.3025137 8.955847 0.9999983
1:8-1:9 1.62666667 -6.0025137 9.255847 0.9999752
0:8-1:9 2.20666667 -5.4225137 9.835847 0.9990545
1:3-1:9 2.23666667 -5.3925137 9.865847 0.9989026
1:1-1:9 2.27000000 -5.3591804 9.899180 0.9987098
1:4-1:9 2.58333333 -5.0458471 10.212514 0.9950280
0:5-1:9 2.62000000 -5.0091804 10.249180 0.9942839
1:2-1:9 2.84000000 -4.7891804 10.469180 0.9876943
0:2-1:9 3.14666667 -4.4825137 10.775847 0.9699268
1:5-1:9 3.25666667 -4.3725137 10.885847 0.9603022
0:1-1:9 3.39000000 -4.2391804 11.019180 0.9458864
0:3-1:9 3.81333333 -3.8158471 11.442514 0.8777363
0:6-0:4 1.05000000 -6.5791804 8.679180 0.9999999
1:8-0:4 1.35000000 -6.2791804 8.979180 0.9999978
0:8-0:4 1.93000000 -5.6991804 9.559180 0.9997971
1:3-0:4 1.96000000 -5.6691804 9.589180 0.9997565
1:1-0:4 1.99333333 -5.6358471 9.622514 0.9997031
1:4-0:4 2.30666667 -5.3225137 9.935847 0.9984651
0:5-0:4 2.34333333 -5.2858471 9.972514 0.9981822
1:2-0:4 2.56333333 -5.0658471 10.192514 0.9953991
0:2-0:4 2.87000000 -4.7591804 10.499180 0.9864559
1:5-0:4 2.98000000 -4.6491804 10.609180 0.9810611
0:1-0:4 3.11333333 -4.5158471 10.742514 0.9724693
0:3-0:4 3.53666667 -4.0925137 11.165847 0.9262449
1:8-0:6 0.30000000 -7.3291804 7.929180 1.0000000
0:8-0:6 0.88000000 -6.7491804 8.509180 1.0000000
1:3-0:6 0.91000000 -6.7191804 8.539180 1.0000000
1:1-0:6 0.94333333 -6.6858471 8.572514 1.0000000
1:4-0:6 1.25666667 -6.3725137 8.885847 0.9999992
0:5-0:6 1.29333333 -6.3358471 8.922514 0.9999988
1:2-0:6 1.51333333 -6.1158471 9.142514 0.9999902
0:2-0:6 1.82000000 -5.8091804 9.449180 0.9998998



1:5-0:6 1.93000000 -5.6991804 9.559180 0.9997971
0:1-0:6 2.06333333 -5.5658471 9.692514 0.9995570
0:3-0:6 2.48666667 -5.1425137 10.115847 0.9966172
0:8-1:8 0.58000000 -7.0491804 8.209180 1.0000000
1:3-1:8 0.61000000 -7.0191804 8.239180 1.0000000
1:1-1:8 0.64333333 -6.9858471 8.272514 1.0000000
1:4-1:8 0.95666667 -6.6725137 8.585847 1.0000000
0:5-1:8 0.99333333 -6.6358471 8.622514 1.0000000
1:2-1:8 1.21333333 -6.4158471 8.842514 0.9999995
0:2-1:8 1.52000000 -6.1091804 9.149180 0.9999896
1:5-1:8 1.63000000 -5.9991804 9.259180 0.9999746
0:1-1:8 1.76333333 -5.8658471 9.392514 0.9999320
0:3-1:8 2.18666667 -5.4425137 9.815847 0.9991455
1:3-0:8 0.03000000 -7.5991804 7.659180 1.0000000
1:1-0:8 0.06333333 -7.5658471 7.692514 1.0000000
1:4-0:8 0.37666667 -7.2525137 8.005847 1.0000000
0:5-0:8 0.41333333 -7.2158471 8.042514 1.0000000
1:2-0:8 0.63333333 -6.9958471 8.262514 1.0000000
0:2-0:8 0.94000000 -6.6891804 8.569180 1.0000000
1:5-0:8 1.05000000 -6.5791804 8.679180 0.9999999
0:1-0:8 1.18333333 -6.4458471 8.812514 0.9999996
0:3-0:8 1.60666667 -6.0225137 9.235847 0.9999788
1:1-1:3 0.03333333 -7.5958471 7.662514 1.0000000
1:4-1:3 0.34666667 -7.2825137 7.975847 1.0000000
0:5-1:3 0.38333333 -7.2458471 8.012514 1.0000000
1:2-1:3 0.60333333 -7.0258471 8.232514 1.0000000
0:2-1:3 0.91000000 -6.7191804 8.539180 1.0000000
1:5-1:3 1.02000000 -6.6091804 8.649180 1.0000000
0:1-1:3 1.15333333 -6.4758471 8.782514 0.9999997
0:3-1:3 1.57666667 -6.0525137 9.205847 0.9999834
1:4-1:1 0.31333333 -7.3158471 7.942514 1.0000000
0:5-1:1 0.35000000 -7.2791804 7.979180 1.0000000
1:2-1:1 0.57000000 -7.0591804 8.199180 1.0000000
0:2-1:1 0.87666667 -6.7525137 8.505847 1.0000000
1:5-1:1 0.98666667 -6.6425137 8.615847 1.0000000
0:1-1:1 1.12000000 -6.5091804 8.749180 0.9999998
0:3-1:1 1.54333333 -6.0858471 9.172514 0.9999873
0:5-1:4 0.03666667 -7.5925137 7.665847 1.0000000
1:2-1:4 0.25666667 -7.3725137 7.885847 1.0000000
0:2-1:4 0.56333333 -7.0658471 8.192514 1.0000000
1:5-1:4 0.67333333 -6.9558471 8.302514 1.0000000
0:1-1:4 0.80666667 -6.8225137 8.435847 1.0000000
0:3-1:4 1.23000000 -6.3991804 8.859180 0.9999994
1:2-0:5 0.22000000 -7.4091804 7.849180 1.0000000
0:2-0:5 0.52666667 -7.1025137 8.155847 1.0000000
1:5-0:5 0.63666667 -6.9925137 8.265847 1.0000000
0:1-0:5 0.77000000 -6.8591804 8.399180 1.0000000
0:3-0:5 1.19333333 -6.4358471 8.822514 0.9999996
0:2-1:2 0.30666667 -7.3225137 7.935847 1.0000000
1:5-1:2 0.41666667 -7.2125137 8.045847 1.0000000
0:1-1:2 0.55000000 -7.0791804 8.179180 1.0000000
0:3-1:2 0.97333333 -6.6558471 8.602514 1.0000000
1:5-0:2 0.11000000 -7.5191804 7.739180 1.0000000
0:1-0:2 0.24333333 -7.3858471 7.872514 1.0000000
0:3-0:2 0.66666667 -6.9625137 8.295847 1.0000000
0:1-1:5 0.13333333 -7.4958471 7.762514 1.0000000
0:3-1:5 0.55666667 -7.0725137 8.185847 1.0000000
0:3-0:1 0.42333333 -7.2058471 8.052514 1.0000000